

Desenvolvimento de sistema de produção de eletricidade utilizando pirolisador de leito fluidizado multicomcombustível

Eduardo C. M. Loureiro, Adalberto N. Freire Jr., Avelino H. C. Melo, Guilherme C. G. Lima e Sérgio Peres.

Resumo – Para vencer os desafios do fornecimento de energia para o desenvolvimento do país, o investimento em fontes alternativas de energia torna-se imperioso. Dentre estas fontes a conversão da biomassa mostra-se bastante promissora. Este artigo relata o desenvolvimento de projeto de pesquisa cujo objetivo principal é a obtenção de gás a partir da conversão de biomassa em pirolisador de leito fluidizado multicomcombustível. Para tal fim, foi feito um levantamento da disponibilidade e qualidade de diferentes tipos de biomassa existentes na região de aplicação do projeto. Estudos iniciais foram desenvolvidos em um gaseificador de bancada em escala laboratorial. Um pirolisador piloto de leito fluidizado foi construído. Diversas adequações foram efetuadas para a produção de gás de pirólise. Foi obtido gás a partir da conversão de serragem de madeira de pequena granulometria. Resta agora a avaliação do comportamento do pirolisador utilizando diferentes tipos de matéria-prima.

Palavras-chave – biomassa, gaseificação, leito fluidizado, pirólise, produção de eletricidade.

I. INTRODUÇÃO

A utilização da energia da biomassa surge como uma alternativa promissora e ambientalmente viável para a redução do consumo de combustíveis fósseis e pode contribuir significativamente para a diminuição das emissões dos gases do efeito estufa. O interesse na utilização deste insumo renovável para geração de energia é atribuído, principalmente, ao fato de o mesmo ser capaz de produzir energia de forma contínua (energia firme), ser neutro na produção de dióxido de carbono, fornecer a energia nas diversas formas (combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, calor e eletricidade) conforme a sua aplicação [1]. Além disso, a utilização da

biomassa com base em culturas energéticas pode ajudar na restauração de terras improdutivas e degradadas, fertilização do solo e retenção de água.

A gaseificação é definida como um processo termoquímico de conversão de insumos líquidos ou sólidos em um combustível gasoso composto, principalmente, por H_2 , CO , CO_2 e CH_4 [2]. O gás combustível produzido pode ser usado para geração de energia elétrica e/ou mecânica através da queima em motores de combustão interna e turbinas a gás ou para geração direta de calor. Além disso, o gás pode ser utilizado como matéria-prima para obtenção de hidrocarbonetos líquidos em processos conhecidos como GTL (gas to liquid) [3]. A conversão termoquímica da biomassa por gaseificação garante segurança de longo suprimento termoeconômico e maior acessibilidade a comunidades isoladas, evita os danos ambientais causados pelas barragens e usinas (uma vez que pode utilizar resíduos industriais e agrícolas ou florestas energéticas de curta e média rotação) e contribui para a melhoria da qualidade de vida da população [4,5].

O estudo da biomassa e dos processos termoquímicos de conversão exigem análises preliminares detalhadas para determinação da composição, das características energéticas e do perfil térmico da matéria-prima inicial. Somente com os resultados dessas análises é que se deve avaliar o processo termodinâmico de conversão sólido-gás para a utilização da biomassa em escala industrial.

A alternativa de pirolisar a biomassa, transformando o seu potencial em gás e, posteriormente, em combustível para uma usina termelétrica que não dispõe de outro combustível fóssil, torna-se cada vez mais atraente, principalmente quando se trata de locais isolados e desprovidos de eletricidade.

As mais importantes fontes de energia de biomassa são a madeira e seus rejeitos, plantações da agricultura e seus rejeitos de produção, resíduos sólidos municipais, rejeitos animais, rejeitos do processamento de alimentação, plantas aquáticas e algas.

O objetivo principal do projeto de P&D, objeto deste artigo, é o desenvolvimento de um pirolisador multicomcombustível capaz de operar com os diversos tipos de combustíveis disponíveis na Região Sul do Brasil como alternativa tecnológica ao uso de gás natural em Usinas Termelétricas.

O código ANEEL para a pesquisa é 0610-1003/2010. O título do projeto é “Desenvolvimento de um sistema de geração de eletricidade por meio de um pirolisador multicomcombustível”. Estão sendo apresentados os resultados parciais, pois, a pesquisa se encontra em execução. A pesquisa está sendo patrocinada pela empresa AES Uruguiana. A execução deste projeto está a cargo da Associação Politécnica de

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL e consta dos Anais do VIII Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica (VIII CITENEL), realizado em Costa do Sauípe/BA, no período de 17 a 19 de agosto de 2015.

Agradecemos à empresa, AES Uruguiana que através do projeto GAPD-0610-1003/2010 patrocina esta pesquisa na sua totalidade.

Sérgio Peres é coordenador e Eduardo C.M. Loureiro é pesquisador do POLICOM-UPE – Laboratório de Combustível e Energia, ambos são também professores do Departamento de Engenharia Mecânica Industrial da Universidade de Pernambuco- UPE (emails: speres@poli.br, eduardoloureiro@poli.br).

Guilherme Cardim G. Lima trabalha no CGTI, (e-mail: guilherme@cgti.org.br).

Adalberto N. Freire Jr. e Avelino H.C. Melo são pesquisadores do POLICOM-UPE (e-mails: adalbertofreire2@gmail.com, ave.cardosom@gmail.com).

Consultoria (POLICONSULT), Universidade de Pernambuco (UPE) e Centro de Gestão de Tecnologia e Inovação. A pesquisa está sendo desenvolvida no Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM), da Escola Politécnica de Pernambuco, da Universidade de Pernambuco.

II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

Neste item são apresentados a metodologia empregada, os resultados obtidos e as dificuldades encontradas durante a execução do projeto. Os resultados parciais obtidos são citados imediatamente após à descrição da metodologia aplicada em cada etapa de trabalho realizada.

A. Metodologia empregada

O passo inicial para embasar o desenvolvimento da pesquisa foi o levantamento de insumos energéticos, para conversão de biomassa, na região próxima à UTE Uruguaiana. O levantamento concluiu que a espécie mais abundante na região é a casca de arroz, subproduto do seu beneficiamento. Amostras foram enviadas para o POLICOM - Laboratório da Universidade de Pernambuco e submetidas a uma série de análises em busca da caracterização desta biomassa. Para poder determinar a potencialidade de uma biomassa é necessário que se conheçam suas características físico-químicas. As características fundamentais são composição imediata e poder calorífico da biomassa [6].

A análise calorimétrica determina o poder calorífico da biomassa, definido como a quantidade de energia liberada na forma de calor pela combustão completa de uma determinada unidade de massa da mesma. A análise calorimétrica da casca de arroz foi realizada utilizando um calorímetro digital, marca Ike Werke, modelo C-2000 e os resultados são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. PCS e PCI da casca de arroz.

PCS (kJ/kg)	PCI (kJ/kg)
14.033 kJ/kg	13.883 kJ/kg

A análise termogravimétrica ou imediata foi realizada utilizando uma balança termogravimétrica marca Shimadzu, modelo DTG-60, e os resultados são mostrados de forma gráfica na Figura 1 e sintetizados na Tabela 2.

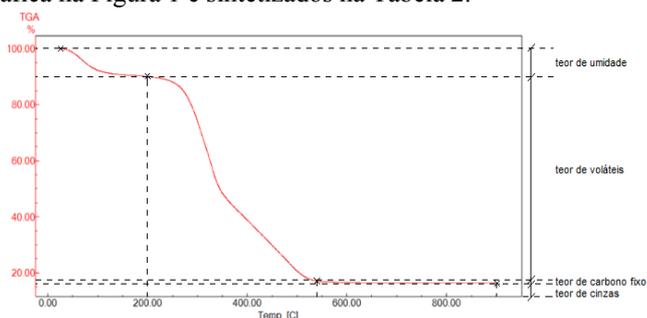


Figura 1. Análise termogravimétrica da casca de arroz.

Tabela 2. Resumo da termogravimetria da casca do arroz.

Massa inicial = 15,164 g		
	Percentual mássico na base seca	Massa (g)
Umidade	11,12	1,686
Mat. volátil	82,29	12,478
Carbono fixo	0,06	0,010
Cinzas	17,65	2,676

Além da casca de arroz, diversas amostras de biomassa presentes na região, de forma menos abundante, foram recebidas e caracterizadas no POLICOM.

O segundo passo na sequência do trabalho de pesquisa, foi a construção, para a realização de testes em escala de laboratório, de um pirolisador/gaseificador de bancada. O equipamento, exibido na Figura 2, foi construído para determinar a influência das variáveis de processo, tais como o tempo de residência e a temperatura de operação do reator, nas operações de pirólise/gaseificação.



Figura 2. Pirolisador de bancada

Vários experimentos com diferentes tipos de biomassa sendo processadas no pirolisador foram realizados. Os resultados do processamento da casca e da torta de mamona, por exemplo, foram publicados em uma dissertação de mestrado vinculada ao projeto de P&D [7].

Concomitantemente à realização de testes no pirolisador de bancada foi desenvolvido o projeto de um pirolisador piloto com capacidade de processamento de até 20 kg de biomassa por hora. No projeto foi feita a escolha do tipo e o dimensionamento do reator, onde foi feita a opção pelo reator do tipo leito fluidizado, que atualmente tem se mostrado mais apropriado. Foi também feita a escolha do tipo de aquecimento a ser utilizado, optando-se pelo aquecimento elétrico com três estágios. Também foram definidos diversos fatores importantes para a construção do pirolisador: Tempo de residência; diâmetro das partículas de biomassa; capacidade; temperatura de operação; vazão de fluidização; material; sistema de alimentação; sistema de limpeza do gás e sistema *quenching*.

No período que antecedeu o recebimento e instalação do pirolisador piloto, foram feitos vários experimentos com um gaseificador de leito fixo *downdraft* já instalado na Escola Politécnica de Pernambuco. O gaseificador, mostrado na

Figura 3, utilizando madeira como combustível (caibros serrados com maiores dimensões em torno de 5 cm), alimentou um grupo motogerador do ciclo Otto para obtenção de eletricidade.



Figura 3. Gaseificador de leito fixo *downdraft* ventilado.

Foi construído um coletor de admissão para permitir a mistura do gás com o ar atmosférico e a acomodação de um filtro de ar antes da entrada da mistura no motor (Figura 4). Percebe-se na figura, no alto à esquerda, o ponto em que é acoplada a mangueira de suprimento do gás e uma bifurcação em “T” para possibilitar a coleta de amostras imediatamente antes da entrada do coletor de admissão do motor. O controle da vazão do gás de madeira e do ar, ou seja, o processo de carburação foi feito manualmente com o auxílio de válvulas de esfera.



Figura 4. Coletor de admissão de ar + syngas.

Para consumir a carga proporcionada pelo grupo gerador, visando verificar a operacionalidade do sistema quando alimentado pelo gás proveniente do gaseificador, um banco de resistências elétricas foi construído. O gerador elétrico utilizado foi o Toyama Modelo TG12000CXE, monofásico, 60 Hz, cuja saída nominal é de 9,5 kVA e a máxima é de 10,5 kVA. A tensão de saída deste é de 110/220 V eficazes, com variação máxima de 1,5%, com carga. Considerando um fator de potência de 0,97, a potência ativa máxima gerada é de $9,5 \text{ kVA} \times 0,97 = 9,215 \text{ kW}$. Foram utilizadas 5 resistências de 26 ohms em paralelo, onde cada carga consome uma potência de 1,862kW (para tensão de saída de 220V), totalizando um consumo de 9,31 kW.

Considerando-se o consumo médio de uma residência rural como sendo da ordem de 1 kW, estimado pela utilização simultânea de vários eletrodomésticos e pontos de luz, a potência máxima gerada é suficiente para atender o consumo médio de 9 residências típicas.

Quando alimentado com gasolina, o grupo gerador conseguiu atingir 100% da potência nominal citada acima, com as cinco resistências ligadas. Entretanto, quando utilizando o gás produzido como combustível, o motor não conseguiu carregar o gerador ao ser acionada a quarta resistência. Portanto, com o uso do gás de madeira, no estágio atual desta pesquisa, a máxima potência alcançada na saída foi de 60% da carga nominal.

A composição do gás de madeira obtido no gaseificador de leito fixo foi determinada por análise cromatográfica. Ar, metano, dióxido de carbono, monóxido de carbono e hidrogênio foram quantificados utilizando a técnica de padronização externa, ou seja, foram comparados com a resposta a padrões de concentrações conhecidos dos referidos gases. Os resultados estão sintetizados na Tabela 3.

Tabela 3. Composição e poder calorífico do syngas obtido.

Composição (%)	
H ₂	18
CO	15,9
CO ₂	12,1
CH ₄	1,0
N ₂	53,0
PCS[MJ/kg]	4,23
PCI[MJ/kh]	3,87

Com o recebimento do pirolisador piloto de leito fluidizado, mostrado na Figura 5, o trabalho de pesquisa teve continuidade. A Figura 6 exibe um desenho esquemático do equipamento.

Para o entendimento de como funciona um pirolisador deste tipo todos os seus componentes, numerados na Figura 6, são descritos a seguir:

1 – Motor para acionamento do agitador de matéria prima. Tem a função de provocar o movimento da biomassa presente no silo, evitando a formação de *pontes* e garantindo uma entrada constante de material na rosca alimentadora.

2 – Silo de biomassa. Armazena determinada quantidade de biomassa a ser processada definindo a batelada.

3 – Inversor de frequência e motor de acionamento da rosca alimentadora. Permite o acionamento da rosca alimentadora em diversas velocidades de rotação proporcionando diferentes vazões mássicas de entrada de biomassa no reator do pirolisador.



Figura 5. Pirolisador piloto.

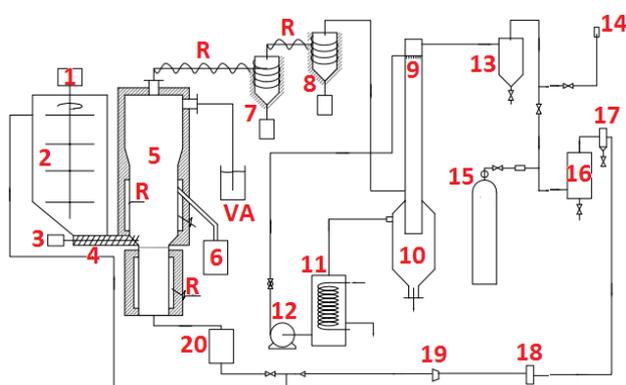


Figura 6. Esquema do pirolisador piloto.

4 – Rosca alimentadora. Transfere a biomassa do silo para o interior do reator.

5 – Corpo do reator e volume do leito fluidizado. A biomassa proveniente do silo adentra ao volume interno do reator onde o material inerte do leito (areia) em movimento fluidizado, encontra-se em temperatura elevada o suficiente para que, quando a biomassa entrar em contato com as partículas de areia e com as paredes do reator haja a troca de calor proporcionando os efeitos de pirólise e gaseificação.

6 – Depósito de carvão. Tem a função de armazenar o carvão produzido no processo.

7 e 8 – Ciclones. Dispositivos utilizados para recolher finos de carvão e maiores particulados após a saída do gás de pirólise do corpo do reator.

9 – Pulverizador de água. Neste ponto, o gás que se movimenta de forma ascendente pelo tubo entra em contato com água pulverizada que tem função de fixar a parte condensável do gás para a produção de bio-óleo. A água transporta os condensáveis para baixo até o separador de fases. Este processo é denominado *quenching*.

10 – Separador de fases. Permite a separação da água utilizada do bio-óleo produzido.

11 – Trocador de calor. Permite o arrefecimento da água utilizada no *quenching*.

12 – Bomba de recirculação. Garante a continuidade do *quenching*.

13 – Separador centrífugo. Tem a mesma função dos ciclones anteriores, ou seja, separar particulados limpando o gás produzido.

14 – Queimador. Ponto onde é realizada a queima do gás de pirólise.

15 – Cilindro de gás. Permite a inserção de gás inerte (CO_2 ou Argônio) no circuito.

16 – Resfriador com gelo. Trocador de calor tipo serpentina utilizado para resfriar os gases antes de passar no soprador.

17 – Filtro trap. Filtro do tipo armadilha para reter líquido ainda presente nos gases de recirculação.

18 – Filtro. Elemento filtrante para limpar ainda mais os gases de recirculação antes do soprador.

19 – Soprador. Ventilador utilizado para dar velocidade aos gases de suprimento do reator e proporcionar a fluidização do leito.

20 – Aquecedor elétrico. Sistema composto por resistências elétricas externas e limalhas de aço no interior para pré-aquecer o ar antes da entrada do reator de pirólise.

R – Resistências Elétricas. Utilizadas como fonte calor para proporcionar a temperatura adequada de pirólise e de gaseificação. São encontradas na parede externa e na tubulação posterior ao reator.

VA – Válvula de alívio. Dispositivo de segurança composto por uma tubulação unindo o interior do reator a um recipiente cheio com água. Caso a pressão dentro do reator supere a pressão hidrostática (altura da água no recipiente) haverá a expulsão da água e o alívio da pressão pela descarga dos gases na atmosfera.

O processo se inicia com biomassa vegetal seca e moída alimentada a partir do silo de alimentação agitado, com rosca transportadora selada com gás de pirólise ou outro gás inerte (ex: Argônio) para evitar fluxo de gases do reator para o silo.

O reator é um de Leito Fluidizado contendo areia fluidizada no início da pirólise com gás inerte e depois com gases não condensados da própria pirólise alimentados pelo soprador, na qual a biomassa vegetal é alimentada.

A altura do leito expandido deve atingir uma altura de 300 a 400 mm. O reator possui instalado externamente duas resistências elétricas, na base e no corpo do reator para aquecimento através da parede metálica. O carvão vegetal mais grosso produzido no reator é removido logo acima do leito de areia expandido para um Depósito de Carvão.

Os gases pirolíticos quentes, com temperatura entre 450°C a 600°C , arrastam os carvões mais finos, cinza e finos da areia formados por atrito na fluidização que passam através de dois ciclones aquecidos com filamentos de resistência elétrica necessários para início de operação e para evitar a condensação de alcatrão pesado na parede interna do equipamento. As frações de carvão vegetal provenientes dos ciclones são coletadas nos depósitos para carvão.

Os gases pirolíticos quentes provenientes do ciclone são enviados para o *quencher* adiabático e separador de fases. O líquido utilizado para o *quenching* é o condensado sobrenadante do separador de fases, por ser imiscível com o alcatrão pesado. Antes de ser alimentado no *quencher* o líquido é resfriado até 15°C e injetado em aspersores pela bomba sob pressão. A fase gasosa efluente do *quencher* encontra-se saturada e passa pelo separador ciclônico para remoção de gotas e em seguida é dividida em duas frações, uma para o

queimador de gás e outra para o resfriador com gelo para ser resfriada, com o objetivo de elevar o índice de remoção de voláteis condensáveis. Em seguida o gás é recirculado ao sistema através do soprador. Antes de ser injetada no leito fluidizado essa corrente é aquecida até 150-200 °C com o Aquecedor Elétrico. Após consumir totalmente a biomassa vegetal, durante o resfriamento dos equipamentos e das linhas, é realizada a purga com gás inerte proveniente do cilindro contendo argônio.

A descrição acima retrata o processo teórico para obtenção de gás de pirólise e bio-óleo. Na realidade, o processo não ocorreu conforme o preconizado acima e o equipamento fornecido sofreu diversas adequações para viabilizar a produção de gás de pirólise, tendo em vista as diversas falhas de projeto e execução que precisaram ser corrigidas e são relatadas a seguir.

Desde a entrega do equipamento, várias tentativas de obtenção de gás de pirólise foram realizadas. O texto a seguir enumera e descreve as várias intervenções necessárias para a solução dos problemas detectados no equipamento fornecido.

A primeira tentativa de gerar produtos de pirólise foi realizada utilizando como matéria prima serragem adquirida de marcenaria existente na região próxima à Escola Politécnica. Os procedimentos adotados foram os descritos no documento do fornecedor do pirolisador. No primeiro teste, a rotação da rosca alimentadora, comandada pelo inversor de frequência foi ajustada para garantir uma vazão de serragem mínima, em torno de 0,95 kg/h. Mesmo tendo sido adotados todos os procedimentos sugeridos no documento do fornecedor, a primeira rodada de testes produziu resultado totalmente insatisfatório. Durante o funcionamento foi constatada apenas a produção de vapor d'água. Diante desse insucesso a equipe de testes resolveu desmontar o reator para observar o seu interior e entender melhor o funcionamento do mesmo.

Após a retirada do corpo do reator, foi constatada a completa ausência de material inerte (areia), componente indispensável para a formação do leito fluidizado. Sem este material, a troca de calor necessária à pirólise/gaseificação é bastante prejudicada, impossibilitando a produção dos gases. A Figura 7 mostra a região da grelha de sustentação do leito depois da retirada do corpo do reator, resíduos de biomassa e ausência do material inerte do leito.

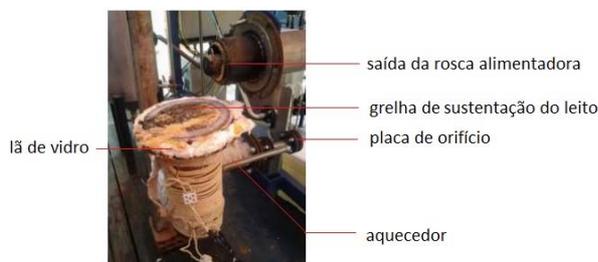


Figura 7. Retirada do corpo do reator.

A ausência do material inerte, bem como de resíduos de carvão no equipamento apontam para a indicação de que o mesmo não foi utilizado antes desta primeira tentativa realizada na Escola Politécnica. Observe-se que em visita prévia às instalações do fabricante, os engenheiros do POLICOM,

Sérgio Peres e Eduardo Loureiro, puderam assistir o desempenho de outro equipamento semelhante com uma duradoura e constante chama proveniente da queima do gás produzido. Ademais, o fabricante enviou ao POLICOM, laudo de laboratório da UNICAMP atestando a boa qualidade do gás produzido no equipamento. Como poderá ser verificado ao longo deste relatório, a partir da constatação da ausência de material inerte e dos inúmeros problemas apresentados pelo equipamento, ora relatados, o gás objeto do ensaio na UNICAMP não foi produzido pelo equipamento entregue à Escola Politécnica.

Para verificar a adequação do equipamento, foi realizado um teste para verificar se o escoamento dos gases propulsivos pelo soprador era capaz de promover a fluidização do leito no interior do corpo do reator. Desta forma, foi depositada pouca quantidade de areia sobre a grelha de sustentação do leito (ver figura 7) e o ventilador foi acionado. Conforme já esperado pela equipe do POLICOM, não foi detectada quase nenhuma movimentação da areia sobre a grelha.

A Figura 7 mostra a exagerada espessura da camada de lâ de vidro colocada sob a grelha de sustentação com o objetivo de evitar que o material do leito retorne pela tubulação. A camada teve sua espessura reduzida à dimensão mostrada na Figura 8. O ventilador foi acionado outra vez e, novamente, quase nenhuma movimentação do material inerte foi observada.



Figura 8. Redução de espessura de camada de lâ de vidro.

Em seguida foi verificada possível perda de ar nas conexões, incluindo entrada e saída do soprador. Não se verificou a presença de vazamentos relevantes que justificassem a baixa vazão apresentada.

Os resultados acima podem ser explicados após a análise do trajeto dos gases entre o soprador e a grelha de sustentação. A Figura 9 mostra um esquema da tubulação com os acessórios presentes no trajeto original. Pode-se observar a presença dos seguintes acessórios: uma válvula de retenção; um registro do tipo globo; um dispositivo medidor de vazão do tipo placa de orifício; uma expansão brusca para o aquecedor; uma redução brusca do aquecedor para a tubulação e nova expansão brusca para a base do reator, além de três cotovelos de 90 graus. Todos esses acessórios trazem uma

variada, e substancial, contribuição para a perda de carga na tubulação.

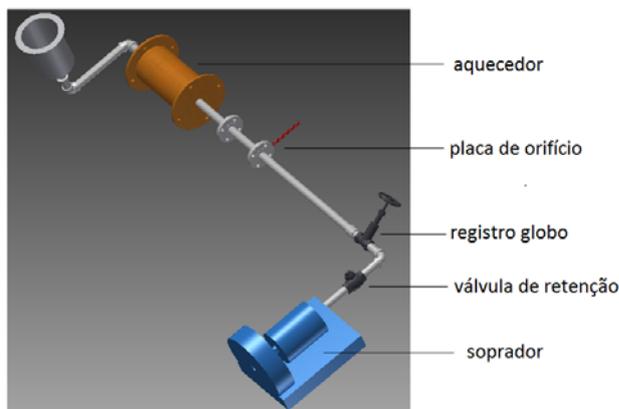


Figura 9. Tubulação inicial entre o soprador e base do reator.

Numa nova etapa de ensaio exploratório, a equipe de testes resolveu avaliar de modo mais preciso a vazão do soprador e possíveis restrições tanto na sucção quanto na tubulação de descarga do mesmo. Para isso foi utilizado o método de medição da vazão através do uso do medidor do tipo placa de orifício, já instalado no equipamento. Após a verificação da altura da coluna de líquido manométrico - água (820 mm), utilizando o procedimento de cálculo sugerido por BRUNETTI (2008), a altura manométrica correspondeu a uma vazão de 0,181 m³/min, o que corresponde a 14% da vazão anunciada na placa do soprador, mesmo com a admissão de ar externo em posição totalmente aberta.

Em função da constatação da baixa vazão de ar na entrada do pleno do reator, a equipe de testes resolveu desmontar novamente o equipamento para verificações de possíveis restrições ao escoamento. Ao desmontar a tubulação de recalque do soprador, além da válvula de restrição, registro globo, reduções e expansões bruscas que podem ser visualizadas externamente, foi constatada a presença de muito material metálico inserido na tubulação com o objetivo de melhorar a troca de calor com o ar, aumentando a área de superfície de material aquecido. A Figura 10 mostra o material metálico inserido na tubulação que, se melhora a transferência de calor no pré-aquecimento do ar antes do reator, o faz em detrimento da fluidização do leito devido à alta perda de carga adicionada.



Figura 10. Material metálico inserido no aquecedor elétrico.

Adicionalmente, contribuindo ainda mais para a perda de carga na tubulação de recalque do soprador, foi verificado que todo o interior do cilindro que compõe a base do reator foi preenchido com limalha de aço configurando-se em mais uma fonte de perda de carga do escoamento, conforme se vê na Figura 11.



Figura 11. Limalha de aço colocada no interior da base do reator.

Após todos estes procedimentos, ficou constatada a impossibilidade de o equipamento proporcionar o leito fluidizado necessário à eficiente troca de calor com a biomassa para a ocorrência do processo de pirólise/gaseificação.

Em todas as tentativas de produção de gás de pirólise realizadas até então, não foi obtido sucesso devido às não conformidades descritas acima e, principalmente porque a temperatura no interior do reator não alcançou o patamar necessário à ocorrência de pirólise.

Observe-se que o processo de verificação composto por remoção e remontagem de alguns itens (por exemplo: o corpo do reator) é tarefa cansativa e desgastante, pois é necessário o concurso de equipe de pelo menos três homens para suportar os esforços em função do tamanho e peso dos componentes.

Segundo o BTG - Biomass Technology Group (2012) [8] a pirólise rápida é um processo em que a biomassa é aquecida rapidamente a temperaturas entre 450 e 600 °C na ausência de oxigênio.

Durante as tentativas de operação, foram monitoradas, via indicadores no quadro elétrico do equipamento, as temperaturas medidas por termopares ao longo da trajetória dos gases. Em nenhuma ocasião foi alcançada pelo termopar, cuja união soldada encontra-se no interior do reator, temperatura suficiente para a ocorrência de pirólise.

Diante de todos os problemas levantados acima, foram projetadas, e executadas, pela equipe técnica do POLICOM adequações na configuração da tubulação de sucção e de recalque do soprador. Uma alteração no formato da base do reator também foi proposta onde a superfície plana inferior foi substituída por uma expansão progressiva na forma de cone. Estas alterações, propostas inicialmente pelo croqui mostrado na Figura 12, visaram resolver o problema de inexistência da fluidização, devido ao extraordinário valor das

perdas de carga ao longo da tubulação em sua configuração inicial.

Um novo sistema de aquecimento tanto das paredes, como dos gases na entrada do reator foi introduzido com as alterações realizadas. Nesta nova proposta o sistema de aquecimento por resistência elétrica foi substituído pelo sistema de aquecimento via combustão de gás simulando o reaproveitamento dos gases produzidos no pirólisador.

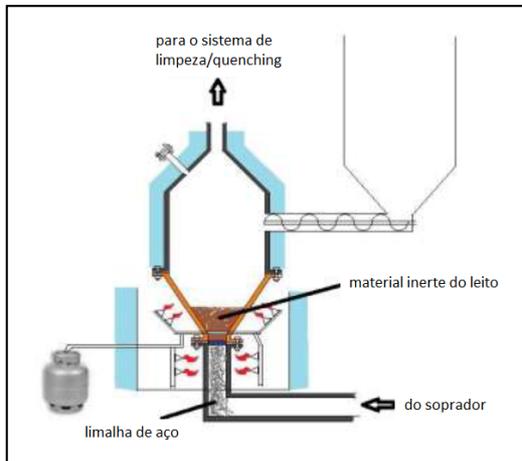


Figura 12. Sugestões de alteração de configuração.

Uma campânula foi introduzida para acomodar os gases queimados e para permitir o reaproveitamento destes gases já aquecidos no processo de fluidização, conforme ilustrado nas Figuras 13 e 14.

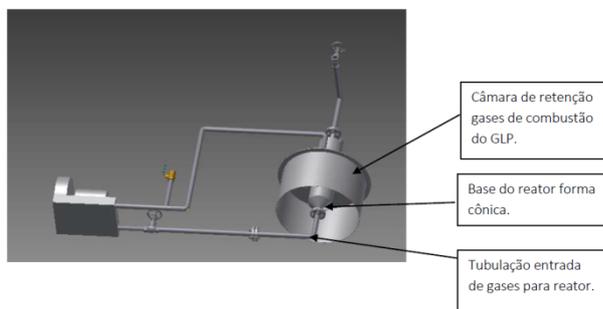


Figura 13. Nova configuração da tubulação e base do reator (vista inferior).

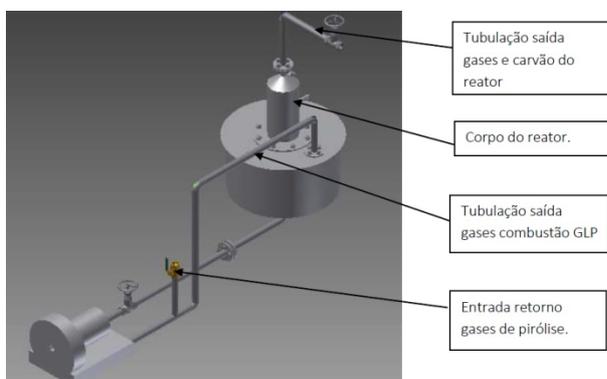


Figura 14. Nova configuração da tubulação e base do reator (vista superior).

A imagem mostrada à esquerda na Figura 15 evidencia a pouca distância entre a saída da rosca alimentadora e a grelha de sustentação do leito. Esta proximidade não favorece a mistura da biomassa introduzida e o material inerte do leito fluidizado, dificultando assim uma melhor troca de calor entre estes dois materiais e prejudicando o processo de obtenção da pirólise. A Figura 15, como um todo, mostra um comparativo entre a situação inicial e a configuração após a alteração no formato da base do reator. Note-se que a colocação de uma fina tela de aço inox entre os flanges de fixação da tubulação, na parte inferior da base do reator, permitiu a retirada da grelha de sustentação do leito e da espessa camada de lã de vidro que impedia o retorno de material para a tubulação na configuração inicial. A colocação da tela permitiu evitar a grande perda de carga causada pela presença dos dois componentes e da porção de limalha de aço que preenchia a base do reator. Além disso, o reposicionamento do ponto de sustentação do leito fluidizado proporcionou o seu rebaixamento, aumentando a distância entre este e a saída da rosca de alimentação.

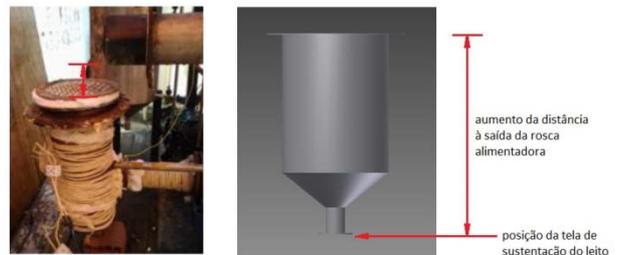


Figura 15. Reposicionamento do ponto de sustentação do leito.

Deve-se observar ainda que o novo posicionamento da tela que serve de sustentação ao leito fluidizado proporcionou a redução substancial do diâmetro, o que levou a um aumento considerável da velocidade do escoamento neste ponto. Este reposicionamento, associado à retirada de componentes desnecessários ao longo da tubulação de recalque permitiram efetivamente a fluidização do leito, conforme verificado em experimentos posteriores.

A Figura 16 exibe imagem das tubulações de sucção e de recalque do soprador na configuração original. Observa-se a tubulação de sucção (retorno do processo de limpeza/quenching) na parte anterior da imagem caracterizada pela presença da válvula de admissão de ar para gaseificação e de um registro globo para controle de vazão. Ao lado da tubulação de sucção visualiza-se a saída da tubulação de recalque do soprador com a presença da válvula de retenção. Em seguida, a tubulação faz uma curva à esquerda. O registro globo não pode ser visualizado, pois se encontra por trás da válvula de admissão de ar, porém, mais à frente pode-se ver o medidor de vazão tipo placa de orifício com sua tubulação ascendente conectada às mangueiras flexíveis do manômetro e o aquecedor elétrico. O corpo do reator também não pode ser visualizado porque se encontra encoberto pelo motor da rosca alimentadora e sua estrutura de fixação.

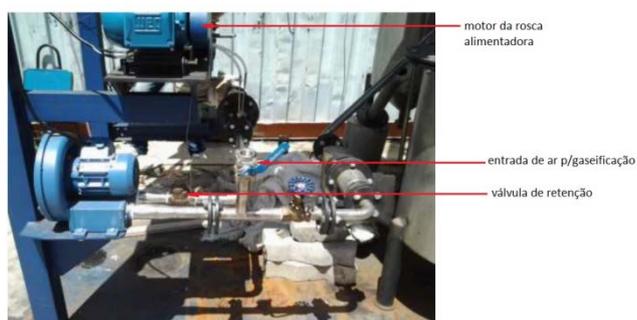


Figura 16. Configuração anterior das tubulações.

Na Figura 17 é exibida a nova configuração das tubulações de sucção e recalque do soprador depois de realizadas as adequações sugeridas. Observa-se que houve um reposicionamento do soprador que permitiu a supressão de dois cotovelos de 90 graus da tubulação de recalque original. Nota-se ainda que dos acessórios presentes na configuração original, apenas o registro globo (visualizado apenas parcialmente na imagem em virtude da presença da tubulação de recirculação dos gases queimados) e o medidor de vazão de placa de orifício permaneceram na nova configuração



Figura 17. Nova configuração das tubulações.

Após a realização das alterações citadas, houve completo êxito na fluidização do leito, conforme se verifica na Figura 18. A imagem mostra o levantamento do material inerte do leito a uma altura bem superior à da junção entre a base e o corpo do reator, totalizando cerca de 600 mm a partir da tela de sustentação de leito fluidizado. Desta forma, fica garantido o contato da biomassa alimentada no reator com as partículas de areia e com as paredes do reator para a necessária troca de calor.



Figura 18. Teste de fluidização.

Por outro lado, a troca do sistema de aquecimento não logrou o sucesso esperado. O poder calorífico do GLP associado à configuração dos queimadores utilizados não foram suficientes para se chegar à faixa de temperaturas suficientes para a ocorrência da pirólise rápida. Foram utilizados três conjuntos de queimadores semelhantes ao utilizados em fogões industriais. Os três conjuntos foram montados ao longo de um perímetro circular, voltados em direção à superfície cônica externa da base do reator, dentro da campânula.

Acredita-se que com a substituição dos queimadores utilizados por outros do tipo tocha, que permitem a dosagem do oxigênio fornecido à chama, a temperatura necessária seja alcançada. Esta alternativa ainda não foi testada, pois os queimadores estão sendo providenciados. Se mesmo após a substituição dos queimadores a faixa de temperaturas ainda não seja alcançada, uma medida mais radical pode ser adotada com a utilização de tochas para combustão de gás oxiacetilênico.

Enquanto ainda não foram adotados os procedimentos sugeridos acima, uma nova alternativa foi testada. Voltou-se à adoção do sistema de aquecimento por resistência elétrica. Desta vez, foi inserido um cilindro de aço de menor diâmetro no interior da base do reator. Em volta deste cilindro foi enrolada a resistência elétrica ao longo de todo o seu comprimento. Em seguida, a resistência foi coberta totalmente por isolante térmico do tipo fita de lã de vidro, que preencheu todo o espaço entre as paredes do cilindro de menor diâmetro e as paredes da base do reator. A montagem deste sistema de aquecimento é mostrada esquematicamente na Figura 19. No lado direito da imagem vê-se o cilindro e resistências inseridos na base do reator ainda sem a presença do isolante térmico envolvendo a resistência.

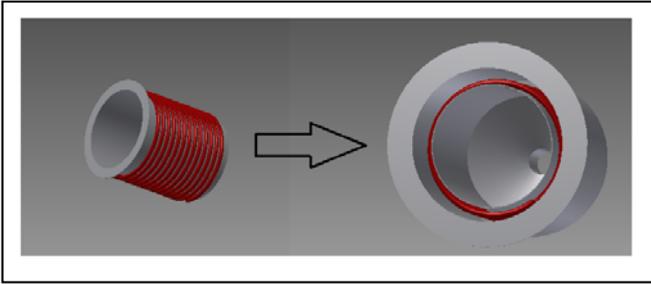


Figura 19. Novo sistema de aquecimento.

A adoção deste novo sistema de aquecimento trouxe novo alento à equipe de pesquisadores. Em teste realizado sem a ocorrência de escoamento dos gases, com o corpo do reator retirado, uma temperatura em torno dos 650 °C na superfície interna do cilindro envolvido pela resistência elétrica foi medida. Na ocasião do teste, uma breve inspeção permitiu a visualização da superfície interna do cilindro começando a ficar rubra.

Muitos são os parâmetros envolvidos no funcionamento do equipamento estudado. A cada novo procedimento de teste, novas variáveis surgem dificultando a análise teórica e solução dos problemas de funcionamento do equipamento. Em experimento posterior, agora com o corpo do reator no lugar, e com outra resistência enrolada em boa parte da tubulação de recalque do soprador (antes da entrada da base do reator) para proporcionar um bom pré-aquecimento dos gases, a temperatura e o aquecimento conseguidos no procedimento anterior não foram novamente alcançados na superfície do cilindro inserido na base do reator.

Posteriormente, foi constatado que houve uma inversão na ligação elétrica das resistências utilizadas e a resistência de aquecimento da base do reator foi conectada a um disjuntor com capacidade de corrente inferior, o que provocou seu desligamento. Neste mesmo experimento, para que o leitor tenha uma ideia das dificuldades e contratempos surgidos aparentemente do nada, foi detectado que não estava havendo a fluidização do leito por deficiência de vazão dos gases que entram na base do reator. Após breve inspeção ao longo da trajetória dos gases foi constatado grande vazamento na saída do soprador. Observe-se que se trata de um soprador novo que substituiu o anterior já desgastado. O vazamento ocorreu em função da péssima fixação dos parafusos que prendem a base que suporta a fixação das tubulações de entrada e saída do soprador, conforme pode ser visto na Figura 24. Foi constatado na hora que os parafusos em tela penetravam todo o seu comprimento sem “pegar rosca” no furo da base. Foi ainda visualizada a presença de resíduos de cola utilizada para maquiar a utilização de parafusos inadequados.

No último experimento realizado antes da confecção deste texto, após a substituição do disjuntor, uma temperatura acima de 700 °C foi alcançada nas paredes da base do reator. O objetivo de se obter gás de pirólise no reator de leito fluidizado foi então alcançado. A Figura 20 mostra a imagem da chama proveniente da queima do gás produzido em uma saída na parte superior do reator.



Figura 20. Queima do gás de pirólise.

Mais experimentos devem ser realizados, ao longo da realização da pesquisa, para verificar o comportamento do pirolisador com outros combustíveis, inclusive a casca de arroz abundante na região de aplicação do projeto.

B. Dificuldades no Desenvolvimento da Pesquisa

As principais dificuldades encontradas e superadas até o presente estágio do trabalho de pesquisa são as descritas a seguir:

- 1) Atraso no fornecimento de equipamentos pelos fornecedores;
- 2) A grande quantidade de não conformidades encontradas no pirolisador piloto de leito fluidizado fornecido (o texto acima não contempla todos os malfeitos encontrados);
- 3) A inexistência nas instalações da Escola Politécnica de galpão com tamanho suficiente para abrigar os equipamentos (gaseificador e pirolisador piloto). A instalação a céu aberto dificulta muito o trabalho dos pesquisadores. As altas temperaturas predominantes na região impossibilitam a realização dos trabalhos ao longo de todo o dia, restringindo-a aos períodos de temperaturas mais amenas. Além disto, a emissão de fumaças e vapores durante a execução dos testes não permitiram a sua realização no horário de aulas na Escola Politécnica. Consequentemente, a execução dos testes onde fosse necessária a queima do combustível foi restringida aos sábados e domingos.

III. RESULTADOS

Os resultados parciais alcançados nas etapas cronológicas do trabalho foram mostrados no item anterior.

O principal resultado conseguido até o presente estágio de desenvolvimento da pesquisa foi a obtenção de um pirolisador de leito fluidizado em escala piloto (capacidade de até

20kg/h) produzindo gás de pirólise a partir do processamento de serragem de madeira.

IV. CONCLUSÕES

Depois de prolongados esforços para vencer as dificuldades surgidas os pesquisadores dispõem de um pirolisador de leito fluidizado que produziu gás de madeira de boa qualidade.

Outros combustíveis devem ser testados no equipamento.

A pesquisa encontra-se em andamento e deve ser complementada com a verificação da estabilidade de funcionamento do equipamento com os diversos combustíveis, das dificuldades de manutenção e operação, da necessidade e elaboração de programas e manuais de treinamento para operadores e mantenedores e com o estudo completo de viabilidade de utilização destes equipamentos em sites rurais isolados.

V. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a AES Uruguaiana pelo financiamento do presente projeto de pesquisa. Agradecimentos também especialmente aos bolsistas, estagiários, voluntários e professores que fazem parte da equipe do POLICOM, pois, eles são a alma do laboratório e sem a presença deles, não seria possível a realização destas pesquisas.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Demirbas, M.F.; Balat, M e Balat, H., "Potential contribution of biomass to the sustainable energy development", *Energy Conversion and Management*, vol 50, 1746-1760, 2009
- [2] Bridgwater, A. V., "Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass". *Chemical Engeneering Journal*, v.91, p87-102, 2003.
- [3] S. Peres, "Catalytic indirectly gasification of bagasse". Ph.D. Thesis. Florida/USA: University of Florida, 1997.
- [4] Bridgwater, A. V., "The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation". *Fuel*, v.74, p.631-653, 1994.
- [5] Wetterlund, E.; Difs, K.; Trygg, L.; Söderström, M., "Biomass gasification opportunities in a district heating system". *Biomass and Bioenergy*, v.34, p.637-651, 2010.
- [6] Cortez, L. A. B.; Lora, E. E. S.; Gómez, E. O., *Biomassa para energia*. Campinas, Editora UNICAMP, 2008.
- [7] B. A. Geraldo, "Gaseificação da casca e da torta da mamona para produção de gás combustível", Dissertação de Mestrado. UFPE. 2013.