

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS

MARCUS VINICIUS DE PAIVA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COMISSIONAMENTO E
ESCALONAMENTO E PROPOSTA PARA ELABORAÇÃO DE
PROTOCOLO PARA USO DE REATOR DE PIRÓLISE.**

CAMPINAS/SP
2019

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS

MARCUS VINICIUS DE PAIVA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ESCALONAMENTO E
ELABORAÇÃO DE PROTOCOLO PARA USO DE
REATOR DE PIRÓLISE.**

Trabalho de Graduação apresentado por
Marcus Vinicius De Paiva como pré-requisito
para a conclusão do Curso Superior de
Tecnologia em Processos Químicos da
Faculdade de Tecnologia de Campinas,
elaborado sob orientação da Prof^ª. Dr^ª. Fabiana
C. Andrade Corbi
Coorientador: Dr. Mathias Strauss

CAMPINAS/SP

2019

FICHA CATALOGRÁFICA
Biblioteca Fatec Campinas – CEETEPS

P149a

PAIVA, Marcus Vinicius de

Avaliação do processo de comissionamento e escalonamento e proposta para elaboração de protocolo para uso de reator de pirólise. Marcus Vinicius de Paiva. Campinas, 2019.

25 p.; 30 cm.

Trabalho de Graduação do Curso de Tecnologia em Processos Químicos – Faculdade de Tecnologia de Campinas.

Orientador: Prof^a Dr.^a Fabiana Cristina Andrade Corbi

1. Pirólise. 2. Comissionamento. 3. Controle. 4. Processo. Assunto. I. Autor. II. Faculdade de Tecnologia de Campinas. III. Título.

CDD 660

TG PQ19.2

Catálogo-na-fonte: Bibliotecária: Aparecida Stradiotto Mendes – CRB8/6553

Marcus Vinicius de Paiva

**Avaliação do Processo de Comissionamento e Escalonamento
e Proposta para Elaboração de Protocolo para Uso de Reator
de Pirólise.**

Trabalho de Graduação apresentado
como exigência parcial para obtenção
do título de Tecnólogo em Processos
Químicos pelo CEETEPS/Faculdade
de Tecnologia – Fatec Campinas.

Campinas, 2 de Dezembro de 2019

BANCA EXAMINADORA

Fabiana Corbi

Fabiana Cristina Andrade Corbi
Fatec Campinas

Fábio Aurélio Bonk

Fábio Aurélio Bonk
Fatec Campinas

Mathias Strauss

Mathias Strauss
LNNano - CNPEM

“Há pessoas que desejam saber só por saber, e isso é curiosidade; outras, para alcançarem fama, e isso é vaidade; outras, para enriquecerem com a sua ciência, e isso é um negócio torpe; outras, para serem edificadas, e isso é prudência; outras, para edificarem os outros, e isso é caridade.” (Hipona, Agostinho)

AGRADECIMENTOS

Dedico meus agradecimentos a todos que contribuíram pela minha formação profissional, acadêmica e social. Aos meus pais pela educação, meus irmãos, o incentivo, e todos meus familiares que compartilham minhas conquistas. Muito obrigado a todos meus formadores, de modo especial professora Fabiana Corbi, Mathias Strauss, Fábio Santiciolli e Juliana Canto. Ao Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) por tornar este trabalho possível. A todos amigos, colegas e companheiros de jornada que tive a oportunidade de conhecer e vivenciar, gratidão.

RESUMO

O presente trabalho avalia o processo de escalonamento e elaboração de um protocolo operacional de um reator de pirólise de biomassa, a partir de estudos baseados em literaturas e métodos experimentais. Entender a operação do reator, permite a maximização do seu funcionamento no processamento de biomassa para obtenção de carvão ativado. O presente trabalho explora roteiros experimentais baseados nos conceitos de escalonamento industrial aplicado ao acompanhamento do funcionamento do reator. O reator estudado neste trabalho está alocado no Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano) no Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) e pertence ao grupo de síntese. Todos os experimentos foram realizados em paralelo ao desenvolvimento de um projeto de estágio que teve início em fevereiro de 2019.

O trabalho foi realizado através da execução de ensaios com o reator vazio, permitindo o entendimento do comportamento de operação do equipamento, sendo possível propor melhorias com relação a parte operacional. Avaliando o comportamento da temperatura do equipamento e seu sistema de operação, foi possível chegando a um protocolo de operação para ele.

Palavras-chave: Pirólise, Comissionamento, Startup, Controle, Processo

ABSTRACT

Present work evaluates the scheduling process and elaboration of an operational protocol of a biomass pyrolysis reactor, the studies based on literature and experimental methods. Understanding the operation of the reactor allows the maximization of its operation in biomass processing to obtain activated carbon. The work explores experimental scripts based on the concepts of industrial scaling applied to the reactor operation monitoring. The reactor studied in this paper is located at the National Nanotechnology Laboratory (LNNano) at the National Center for Energy and Materials Research (CNPEM) from synthesis group. All experiments were performed in parallel with the development of an internship project that began in February 2019.

The work was performed by performing tests with the reactor empty, allowing the understanding of the operating behavior of the equipment, being possible to propose improvements regarding the operational part. By assessing the temperature behavior of the equipment and its operating system, it was possible to arrive at an operating protocol for it.

Keyword: Pyrolysis, Commissioning, Startup, Control, Process

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1	Biomassa	14
2.2	Conversão de biomassa por pirólise	14
2.3	Produtos da conversão térmica da biomassa.....	16
2.3.1	Carvão.....	16
2.3.2	Bio-óleo	16
2.3.3	Biogás	16
2.4	Equipamento de processo	16
2.5	Comissionamento de processo.....	17
2.6	Parâmetros de Operação para Pirólise	18
2.7	Protocolo operacional padrão	19
3	materiais e métodos.....	20
3.1	Avaliação de operação do reator.....	20
3.2	Avaliação do reator com perfis de biomassa	20
3.3	Caracterização dos produtos obtidos	21
3.3.1	Densidade Aparente	21
3.4	Protocolo de operação.....	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
4.1	Ensaio operacionais.....	22
4.2	Melhoramento Operacional	23
4.3	Protocolo operacional	25
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	26
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
	ANEXO I.....	28
	Procedimento Operacional Padrão	28

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama processual de pirólise	15
Figura 2: Reator de volatilização de materiais orgânicos.....	17
Figura 3: Teste com termopar (T1) de avaliação de posicionamento	22
Figura 4: projeto suporte (a), posições dos termopares antes da utilização do suporte (b) e posição dos termopares após a utilização do suporte (c).....	23
Figura 5: Simulação de adaptação processual e reflexo sobre produtos, com ensaio de pirolise a 600°C	24
Figura 6: Ensaios realizados com reator sem carga em atmosferas de nitrogênio (C_N), sem nitrogênio (S_N), com suporte (C_S) e sem Suporte (S_S)	25

1 INTRODUÇÃO.

A energia sofre constantes transformações, da mesma forma nossos corpos consomem energia para manutenção da vida, sendo assim, podemos prever que a energia é parte fundamental da sobrevivência.

Dados do Ministério de Minas e Energia sobre a matriz energética brasileira demonstram que houve um recuo a respeito da oferta interna de energia no país, que no ano de 2018 foi equivalente a 288,4 milhões (toneladas equivalentes de petróleo), o que representa um recuo de 1,7% se comparado ao ano de 2017. Apesar da queda, vale ressaltar que as fontes renováveis em 2018 tiveram um crescimento de 13,6%, quando comparadas com o ano anterior. Esse fato foi sustentado pelo aumento na geração de energia eólica e produção de biodiesel. Segundo os dados do Ministério de Minas e Energia (MME-MINISTERIO DE MINAS ENERGIA, 2019), o Brasil possuiu uma queda em estrutura de fontes não renováveis de 2,3%, crescendo assim em suas fontes renováveis, destacando os derivados da cana de açúcar, carvão vegetal e hidrelétricas para geração de eletricidade.

Olhando ainda para o cenário energético, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL (2005), considera-se como biomassa todo recurso renovável que provém de fontes de matéria orgânica e que pode ser utilizada na produção de energia. O aproveitamento da biomassa pode ser realizado através de processos de queima, como fornos de combustão, ou até mesmo pode ser desenvolvido e aperfeiçoado em tecnologias de conversão mais eficientes, como processos de gaseificação e pirólise. Tendo em vista o avanço dos setores de desenvolvimento, prevê-se a necessidade de se buscar novas tecnologias e desenvolver metodologias cada vez mais eficientes para os processos de conversão de energia. Sendo assim, a busca constante por processos mais eficientes, visa melhor aproveitamento tanto em termos de matérias prima quanto de produto. O processo é um ponto de extrema importância, refletindo diretamente em fatores econômicos, sejam eles de uma instituição privada, pública ou do desenvolvimento de uma sociedade.

Buscando entender e desenvolver fontes mais eficientes de conversão para biomassa, o presente trabalho apresenta e incorpora perspectivas de desenvolvimento de uma metodologia operacional para o reator de conversão térmica de biomassa por pirólise. Tendo em vista a importância de buscarmos fontes de energia mais sustentáveis, este trabalho busca acompanhar e entender o processo de implementação operacional de um reator de conversão de biomassa desenvolvido pela Bioware Ltda e adquirido pelo grupo de síntese pertencente ao Laboratório

Nacional de Nanotecnologia (LNNano). O presente estudo prevê a importância dos processos na conversão de biomassa, e busca entender o funcionamento do equipamento utilizando-o em sua excelência, conforme o escalonamento do processo, a conversão eficiente de biomassa e a compreensão operacional do equipamento, permitindo a elaboração de um protocolo de operação.

O trabalho tem como objetivo colocar em funcionamento o reator de pirólise de biomassa Bioware, modelo SIVOMO250D/BIOWARE, e compreender suas limitantes de processo, propondo as melhores condições de operação.

Neste estudo, abordou-se aspectos fundamentais de comissionamento. Sendo assim, o trabalho permite chegarmos à:

- Análise dimensional da capacidade do equipamento;
- Avaliação do comportamento da temperatura ao longo do equipamento;
- Avaliação geral do funcionamento do equipamento;
- Elaboração de protocolo para padronização de operação.

Permitindo avaliarmos o reator quanto as condições de operação, avaliando questões como:

- Quais são as faixas de temperatura que podem ser operadas?
- Os controles de temperatura são suscetíveis a erro?
- Quais podem ser as condições ideais de operação do equipamento?

A fim de realizar a utilização adequada o sistema foi comissionado conforme as necessidades de operação.

É possível compreender a importância da realização deste comissionamento, sendo plausível para uma obtenção de êxito no que diz respeito ao processo, a qualidade dos produtos obtidos e conhecimento do sistema estudado.

Partindo do ponto de vista de escalonamento de processo, e que para cada processo encontramos diferentes variáveis, o trabalho explora o processamento de biomassa em maiores quantidades, visto que no laboratório trabalhado costuma-se processar da ordem de 2 a 10 gramas de material, e com a utilização do equipamento passamos a processar da ordem de 20 a 100g de material. Sendo assim considerou-se um sistema escalonado da ordem de 2 a 10 vezes maior que o de costume.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

2.1 Biomassa

Hoje o bagaço da cana-de-açúcar é um dos principais resíduos das indústrias sucroalcooleira, onde boa parte é queimado em caldeiras para geração de vapor e reciclo de energia, mas sobra ainda muito desse material. A ideia de processar esse tipo de material parte do fundamento de se utilizar um material de pouco valor agregado, que comumente é tratado como um resíduo, e transformar em materiais, que possuem um valor agregado muito maior, e ainda causar um impacto positivo em questões ambientais pela utilização de carvão ativado na descontaminação da água, por exemplo (Machado, 2013). De acordo com a literatura, de longas datas é possível observar o crescimento da demanda dos combustíveis fósseis para geração de insumos para a indústria em geral. Como apresentado por Morgan et al. (2019) a necessidade pela busca de biocombustíveis e fontes renováveis de energia é eminente.

A necessidade pela busca de novas fontes energéticas já é conhecida e muito bem aplicada em outros trabalhos, todavia o estudo do processo atinge esse nicho energético relacionando-se com o diferencial do bagaço da cana-de-açúcar.

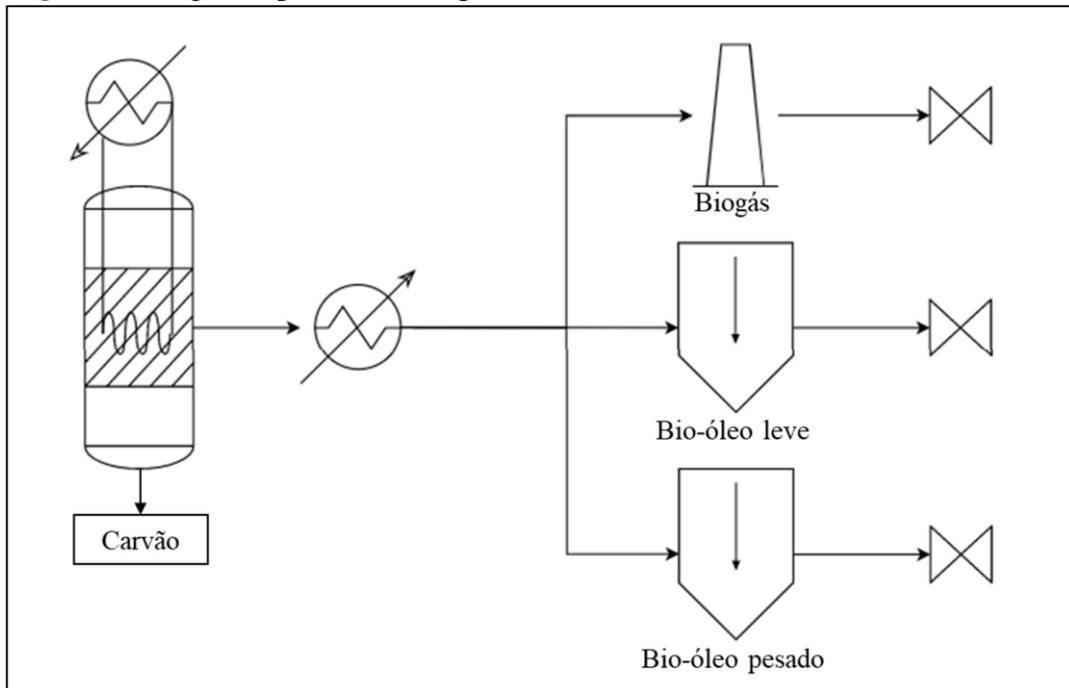
O bagaço da cana-de-açúcar é uma biomassa atualmente muito bem conhecida, tanto pelo tempo que já vem sendo usada, quanto pela sua origem. A constituição química do bagaço de cana como citada por Morgan (2019), é tipicamente de celulose (39,2%), hemicelulose (20,2%), lignina (25,5%), e outros compostos (4,2-7,6%). Essa constituição é característica de vegetais, e devido sua maior parte ser matéria orgânica é suscetível a geração de vapores orgânicos quando exposto a temperaturas mais elevadas, que, dependendo das condições, pode ser totalmente queimada – processo de combustão (atmosfera rica em oxigênio), pode ainda ser gaseificada – processo de gaseificação (atmosfera pobre em oxigênio), ou então pirolisada – processo de pirólise (atmosfera sem oxigênio).

2.2 Conversão de biomassa por pirólise

A pirólise se caracteriza pela degradação térmica do combustível sólido, a qual pode ser realizada na ausência completa de um agente oxidante, ou em proporções de agente oxidante que não permita a gaseificação extensiva do material. A pirólise é realizada através da queima incompleta do material vegetal, gerando seus produtos primários, como apresentado na Figura 1. Pirólise é o processo de decomposição de matéria orgânica que ocorre pela ação de altas temperaturas (tipicamente acima de 400 °C) em atmosfera inerte como citado por Machado (2013). Neste processo ocorre ruptura da estrutura molecular original e formação de novas

ligações químicas dos compostos presentes no material orgânico pela ação do calor em um ambiente com pouco ou nenhum oxigênio como citado por Williams (1995).

Figura 1: Diagrama processual de pirólise.



Fonte: Próprio autor.

Com o controle do fluxo de ar, ou tornando-o inerte, é possível obter diferentes produtos, por exemplo: Ao se trabalhar com uma biomassa, e ao queimá-la sob um fluxo de alto teor de oxigênio acarreta-se o processo de combustão, gerando calor. Sendo assim, a biomassa utilizada acaba sendo totalmente consumida, deixando apenas cinzas. Por outra perspectiva, ao se utilizar uma fração controla de oxigênio, por volta de 15-40%, desencadeia-se o processamento de gaseificação, gerando como principal produto primário o gás de síntese, que possui aplicações em produção de combustíveis e para geração de calor. Ao se trabalhar com o processamento de pirólise, o teor de oxigênio é anulado, gerando um sistema que permite que os principais produtos obtidos sejam o carvão, o bio-óleo e o biogás, adaptado de Bioware (2002).

Como observado na Figura 1, um dos produtos da pirólise podem ser materiais compostos por carbono com características diferentes, como o carvão que permite o arranjo hierárquico das fibras de celulose da cana-de-açúcar, e o bio-óleo em sua forma líquida e o biogás na fase gasosa. Posteriormente ao processamento pirolítico espera-se a obtenção de um material carbonáceo, com características diferentes conforme a temperatura e condição de tratamento (atmosfera inerte, oxidante ou parcialmente oxidante).

2.3 Produtos da conversão térmica da biomassa

2.3.1 Carvão

O carvão consiste na fase sólida da pirólise da biomassa, composto principalmente de carbono predominantemente amorfo, não grafítico, que através do processamento térmico permite o desenvolvimento de porosidades internas que permite o aumento da área superficial e volume dos poros consequentemente, como demonstrado por (ALTERTHUM, 1998) devido as propriedades de adsorção de fases fluidas permite ao carvão ser utilizado para purificação, filtração, desclorificação e desintoxicação de ambientes. Sendo assim o carvão obtido por intermédio de pirólise possui uma vasta gama de aplicação. Como apresentado também por (ALTERTHUM, 1998) a porosidade do carvão é um ponto importante a ser avaliado porque possui influência nas propriedades de adsorção do carvão, sendo que as variações de adsorção permite direcionarmos a aplicabilidade do material.

2.3.2 Bio-óleo

O bio-óleo consiste em uma fase líquida de coloração marrom escuro de odor acentuado e de composição variada. É formado a partir da degradação de compostos instáveis da biomassa, sua composição varia sendo que em segundo (MACHADO, 2013) consiste em uma ampla variedade de compostos orgânicos derivados da despolimerização e fragmentar dos principais componentes da biomassa: celulose, lignina e hemicelulose.

2.3.3 Biogás

A fração de biogás gerada através do processamento de pirólise consiste em frações muito leves da biomassa que através do aquecimento desprendem-se em gases como CO, CO₂, CH₄ dentre outras frações leves citado em (DHYANI; BHASKAR, 2018). Essa fração possui uma gama aplicacional mais restrita, devido sua composição e consistir em uma fração gasosa não condensável.

2.4 Equipamento de processo

O reator utilizado para essa proposta é produzido e comercializado pela Bioware Desenvolvimento de Tecnologia de Energia e Meio Ambiente Ltda. Segundo a descrição do fabricante o equipamento foi projetado para testes de conceitos, levantamento das propriedades físico-químicas e estudos dos fenômenos de transferência de calor e massa para amostras de até 250 g, (BIOWARE, 2002).

Através da utilização do equipamento, mostrado na Figura 2, foi possível explorar o as condições de operação do reator, e possivelmente propor melhorias ao sistema. O estudo

constitui-se em avaliar o sistema como um todo, com um rico detalhamento no que diz respeito às condições de operação e aos pontos críticos.

Figura 2: Reator de volatilização de materiais orgânicos.



Fonte: Adaptado de Bioware (2019).

O reator apresenta diferentes variáveis a serem exploradas. Em sua caldeira principal, possui termopares responsáveis pela medida de temperatura ao longo de sua extensão, permitindo a determinação da temperatura dentro do sistema de queima em diferentes pontos. Em sua parte superior, é possível medir a pressão em que o sistema está sendo operado, sendo possível determinar as alterações de pressão ao longo do processo. E em sua extremidade superior direita, onde se conecta ao condensador, destaca-se a presença de mais um termopar na saída do resfriamento que permite a avaliação da temperatura dos produtos da pirólise, permitindo também a avaliação da temperatura dos materiais gerados. O sistema apresenta diferentes tipos de medidas que podem ser obtidas ao longo do processo, sendo assim torna-se possível o estudo do sistema como um todo possibilitando assim o estudo da capacidade operacional do equipamento.

2.5 Comissionamento de processo

Partindo da ideia de que um processo ou serviço pode partir de uma iniciativa nunca aplicada, ou pouco conhecida, utilizando-se de um primeiro passo de comissionamento, Segundo Industrial (2018, p.3):

“O comissionamento é um processo que tem como objetivo assegurar que sistemas e componentes de uma edificação ou planta industrial estejam de acordo com os requisitos necessidades operacionais do cliente, no que diz respeito a projeto, instalação e testes operacionais”.

O comissionamento consiste nos primeiros passos de operação de um equipamento, onde nunca antes operado. Para isso faz-se necessário o acompanhamento do mesmo para verificar possíveis falhas de operação e compreender as necessidades de operação do equipamento. Para isso utiliza-se de ferramentas de controle de processo, como: monitoramento de variáveis, como: temperatura, pressão, qualidade produto final, como forma de monitorar o funcionamento do equipamento.

2.6 Parâmetros de Operação para Pirólise

Como visto anteriormente o processamento de pirólise consiste na degradação da biomassa por meio da temperatura, e podendo ser através de atmosfera inerte, oxidante ou parcialmente oxidante, sendo assim associamos diferentes parâmetros de processamento, que interferem diretamente nas características dos produtos formados. Os principais parâmetros de operação, como: temperatura tamanho de partícula, tempo de residência do vapor, taxa de aquecimento da biomassa, vazão do gás de arraste, natureza da biomassa e teor de umidade e cinzas da biomassa, são largamente explicados em (GONÇALVES et al., 2006). Neste trabalho destacamos a atenção para o parâmetro da temperatura, como expressado pelos objetivos, busca-se compreender o comportamento do reator em sua operação, e o comportamento através do processamento de biomassa. Visto que a temperatura é fundamental para o fornecimento de calor para a degradação da biomassa, sendo que segundo Gonçalves et. al. (2006), a temperaturas mais baixas a degradação ocorre em regiões constituintes de heteroátomos, resultando na formação de frações de bio-óleo mais pesadas. E conforme o aumento da temperatura ocorre a quebra acentuada de materiais lignocelulósicos, resultando em variáveis compostos.

Para se avaliar um dos parâmetros de operação, e a influência dele no processamento é necessário isolar o parâmetro, deixando todos os outros constantes ao longo do processo.

Para a operação do reator de pirólise, precisa-se montar o reator adequadamente. O reator é composto de diversas peças, sendo elas divididas em alguns segmentos, que são:

Caldeira de queima: composta por uma caldeira de metal envolta de quatro resistência elétricas presas em uma camisa metálica na parte eterna da caldeira, possui também uma base metálica cambiável, que de acordo com o processamento a ser realizado varia (com injeção de

gás ou não), e um conjunto de termopares acoplados a uma vareta cilíndrica localizada dentro da caldeira e presa ao topo do sistema. Ao topo do sistema de queima temos também uma saída que consiste em um medidor de pressão do vaso de queima;

Seção de condensação: composta por um condensador metálico com entrada e saída de água para resfriamento;

Seção de coleta dos produtos: Composta por dois coletores para óleo, sendo eles integrados entre si, ligados a uma válvula para expulsão dos gases. E ao final do condensador, contém um termopar para coleta de temperatura dos produtos condensados.

Os segmentos do reator são interligados através de borrachas para vedação combinadas com presilhas de pressão. Para a operação desse reator, seja ele carregado com alguma carga ou não, consiste em montá-lo, garantindo que todas as conexões estejam fixas, e traçando uma curva de operação no display de set para temperatura.

2.7 Protocolo operacional padrão

Para elaboração de um protocolo operacional é importante obedecer ao padrão estabelecido dentro do sistema do laboratório, inspirado na norma NIT-DICLA-072/2019 estabelecida pelo INMETRO. Portanto o procedimento deve conter:

- Título contendo o nome do equipamento;
- Características indicando modelo, e especificações, foto, e condições de operação (voltagem, temperatura etc.)
- Aplicação;
- Descrição do procedimento explicando paço a paço para utilização;
- Referências
- Lista de treinamentos para o equipamento.

O protocolo deve ser escrito em linguagem simples, promovendo condições de operação independentes do nível de instrução do operador. Portanto, através da elaboração do protocolo, torna-se possível a operação do mesmo por qualquer indivíduo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Avaliação de operação do reator

Para avaliação do sistema de operação do reator utilizou-se de ensaios com o reator vazio, avaliando os componentes do conjunto. Em um primeiro momento foram realizados testes para avaliação dos termopares presentes no sistema do reator, que por sua vez são responsáveis pelo monitoramento da temperatura ao longo do processamento térmico, ao longo da caldeira de queima, e presente também na saída dos produtos condensados, ao final do condensador. Para a avaliação da localização dos termopares, propomos o monitoramento da temperatura do conjunto de termopares principais localizados ao longo da caldeira principal acoplados dentro de um tubo cilíndrico composto por de quatro termopares de monitoramento, denominados Conjuntos de Termopares da Caldeira Principal (CTCP).

O monitoramento da temperatura nos termopares é realizado através de um software fornecido pela empresa fabricante do equipamento, denominado “FieldChartNovus”, que consiste no monitoramento do sinal dos termopares convertidos em temperatura, ao longo do variável tempo. O teste para a localizar exata do posicionamento dos termopares ao longo da caldeira, consiste com o auxílio de uma ponteira quente (ferro de solda), varrer o CTCP monitorando variações de temperatura graficamente, sendo assim é possível definir graficamente por meio de processamento gráfico em software de medição imageJ. Após a localização dos termopares foram realizados ensaios em diferentes temperaturas, com variações de 100 °C, varrendo de temperaturas de 300 a 800 °C.

Para os ensaios de avaliação de monitoramento de temperatura do reator, foram realizados ensaios ajustando a temperatura de Hold (topo de temperatura de processamento, e realizando um ciclo de aquecimento com permanência de duas horas, gerando graficamente um monitoramento da temperatura medida pelos termopares distribuídos ao longo do reator. Ao final do ensaio foram obtidos dados de temperatura que em conjunto com a curva teórica de operação do reator é possível avaliar a operação do reator com relação a curva teórica e real obtida. O ensaio foi realizado para diferentes temperaturas, sendo elas uma varredura de 300 a 800 °C, com variações de 100 °C.

3.2. Avaliação do reator com perfis de biomassa

O processo de avaliação do reator com base nos perfis de biomassa, consiste na comparação entre os produtos obtidos nos diferentes processamentos partindo de uma única

matriz, o bagaço da cana-de-açúcar. Com base nos resultados de caracterização dos produtos obtidos nos diferentes processamentos, é possível compará-los entre si, e compreender a influência do posicionamento da biomassa dentro do reator, o controle de temperatura e a influência pelo controle de atmosfera dentro do equipamento.

3.3 Caracterização dos produtos obtidos

O produto caracterizado para efeito de avaliação do funcionamento do equipamento será o carvão obtido por intermédio de pirólise. Sendo retratado o funcionamento do equipamento.

3.3.1 Densidade Aparente

De acordo com a literatura, a densidade aparente de um material sólido consiste na densidade do sólido desconsiderando a influência do ar na amostra, seja pela suspensão dele ou por sua flutuação (Sampaio; Silva 2007).

Seguindo princípios citados na norma ABNT NBR 16661:2017, a densidade aparente é medida através da relação massa e volume aparente ocupado pelo material.

Para isso utilizou-se de uma balança semi-analítica BL3200S/SHIMADZU e uma proveta. Sendo assim a vidraria foi pesada, obtendo a massa da vidraria (m_1), realizou-se a adição do material sólido composto de carvão e posteriormente compactado realizando leves batidas com o fundo da proveta na bancada. Após compacto o material foi pesado (m_2), e realizado a leitura do volume ocupado pelo material (V).

Para efeitos de cálculo considera-se que a condições normais de temperatura e pressão, o volume 1mL corresponde a 1cm³. Utilizando a fórmula apresentada a seguir, torna-se possível obter dados referentes a densidade relativa do material.

$$d \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{[m_2(\text{g}) - m_1(\text{g})]}{V(\text{mL})}$$

O mesmo procedimento é aplicável ao bio-óleo coletado no processo.

3.4 Protocolo de operação

Para a elaboração do protocolo de operação, foram levados em consideração os resultados obtidos pelos processamentos de biomassa, e optou-se pelo processamento que gerasse produtos uniformes e que garantissem uma uniformização do processamento.

Como protocolo de operação foi proposto a elaboração de um procedimento operacional padrão (POP). Para a elaboração do procedimento foram levados em consideração a eficiência do processo, abordando um produto.

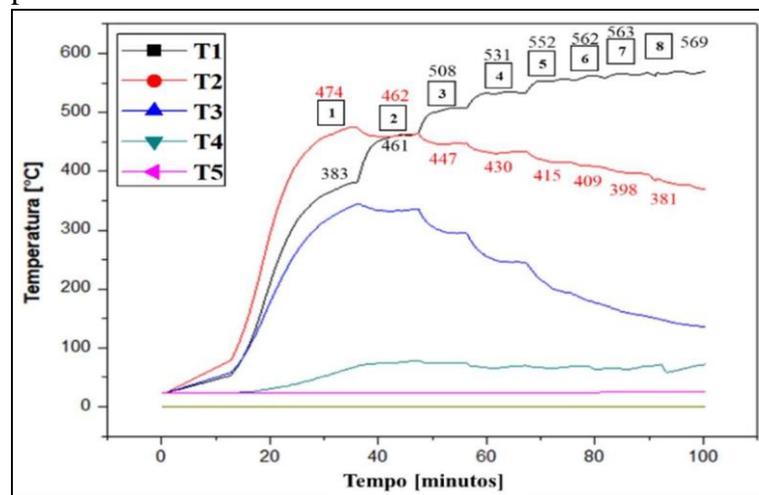
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Ensaios operacionais

Os ensaios operacionais do reator foram realizados a primeiro momento para a avaliação do posicionamento dos termopares dentro da caldeira de queima. Para esse ensaio o conjunto de termopares presentes no centro da caldeira foi desacoplado do reator e realizou-se um ensaio com ele. O teste baseou-se na utilização de uma ponta quente (ferro de solda), e com o termopar em monitoramento, percorreu-se sua extremidade revelando os reais lugares de medição de cada termopar conforme o aumento de sinal. Assim foi possível determinar através de processamento gráfico as posições de cada um, como apresentado na Figura 4.

Tendo em vista que as posições dos termopares era desfavorável para o monitoramento real dos fenômenos da caldeira de queima, realizou-se o teste de avaliação do posicionamento dos termopares dentro do reator, para isso foi utilizado como referência o termopar T1, onde através de um set a 600°C foi aguardado o período de 30 minutos para estabilização e realizou o teste elevando a coluna de termopares até que se obtivesse a melhor resposta comparada a temperatura teórica. Como apresentado pela Figura 3, o valor de temperatura que mais se aproximou do teórico foi de 569°C, sendo que não foi possível elevar mais a coluna por disponibilidade instrumental, sendo o limite onde o fio de comunicação dos termopares. Os dados obtidos revelam também um gap de aproximadamente 30°C entre a temperatura real do centro do reator e a temperatura teoricamente ajustada, o que se justifica pela perda de calor tanto em questão de transferência de calor, que possivelmente seja influenciada pela área do equipamento.

Figura 3: Teste com termopar (T1) de avaliação de posicionamento.

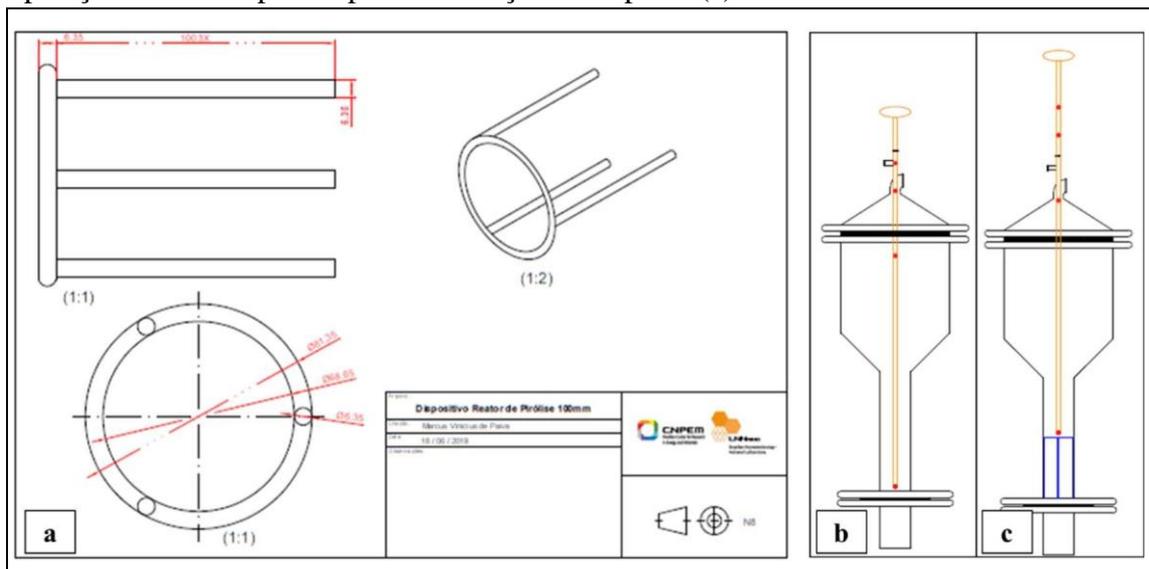


Com o intuito de obter-se uma avaliação mais completa do equipamento foram traçadas curvas de 300 a 800°C avaliando-se a eficácia do dispositivo desenvolvido e a influência da atmosfera dentro do reator apresentado na Figura 5, a fim e explicar a melhora na queima de biomassa e da resposta de monitoramento do processo. Como podemos ver a resposta de temperatura sem a utilização do suporte, é bem mais baixa do que o ajustado, da ordem de aproximadamente 100°C de diferença (apresentados em a e b), quando o suporte dos termopares foi elevado (gráficos c e d) obteve-se respostas mais próximas da temperatura de set para o termopar T1, sendo possível medir o centro do reator com mais precisão.

4.2 Melhoria Operacional

Com base nos resultados obtidos nos procedimentos anterior, foram realizadas melhorias operacionais, a fim de manter o processamento de biomassa na região de maior concentração calorífica. Para isso foi confeccionado um dispositivo ilustrado na figura 3, com o objetivo de suspender o material a ser processado dentro da caldeira de queima para acessar. Para isso foi realizado um projeto técnico, desenvolvendo um suporte em tripé, confeccionando-o em aço inox, para elevação do material dentro do reator e do monitoramento da temperatura, visto que dos termopares de dentro da caldeira de queima, nenhum realizava a coleta da temperatura da região central da caldeira.

Figura 4: projeto suporte (a), posições dos termopares antes da utilização do suporte (b) e posição dos termopares após a utilização do suporte (c).

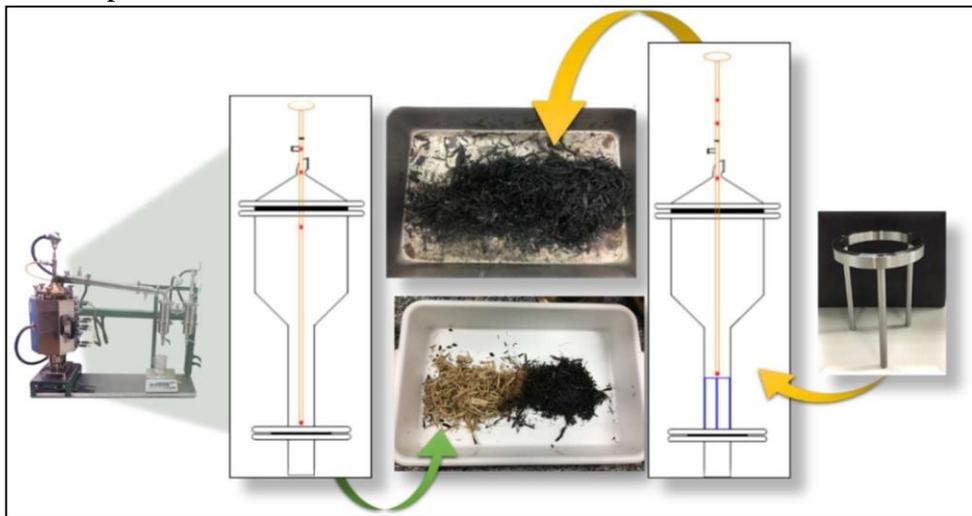


Fonte: Autoria própria.

O suporte foi confeccionado, e como realizado no item 3.1 deste capítulo, foram realizados ensaios com o reator sem carga para avaliação dele. Os resultados obtidos através destes novos testes são apresentados e discutidos no capítulo 4 deste trabalho.

Com base nos dados obtidos, é possível visualizar que o perfil de monitoramento de temperatura do reator obteve melhora após a incorporação do dispositivo. A hipótese é possível ser validada através do processamento de biomassa, no caso a cana de açúcar, que a esquerda da Figura 6 apresentava queima incompleta devido a baixa distribuição de calor na parte mais baixa da caldeira de queima, e quando foi utilizado do dispositivo, houve a queima completa da biomassa, como demonstrado a direita da figura 6.

Figura 5: Simulação de adaptação processual e reflexo sobre produtos, com ensaio de pirolise a 600°C.

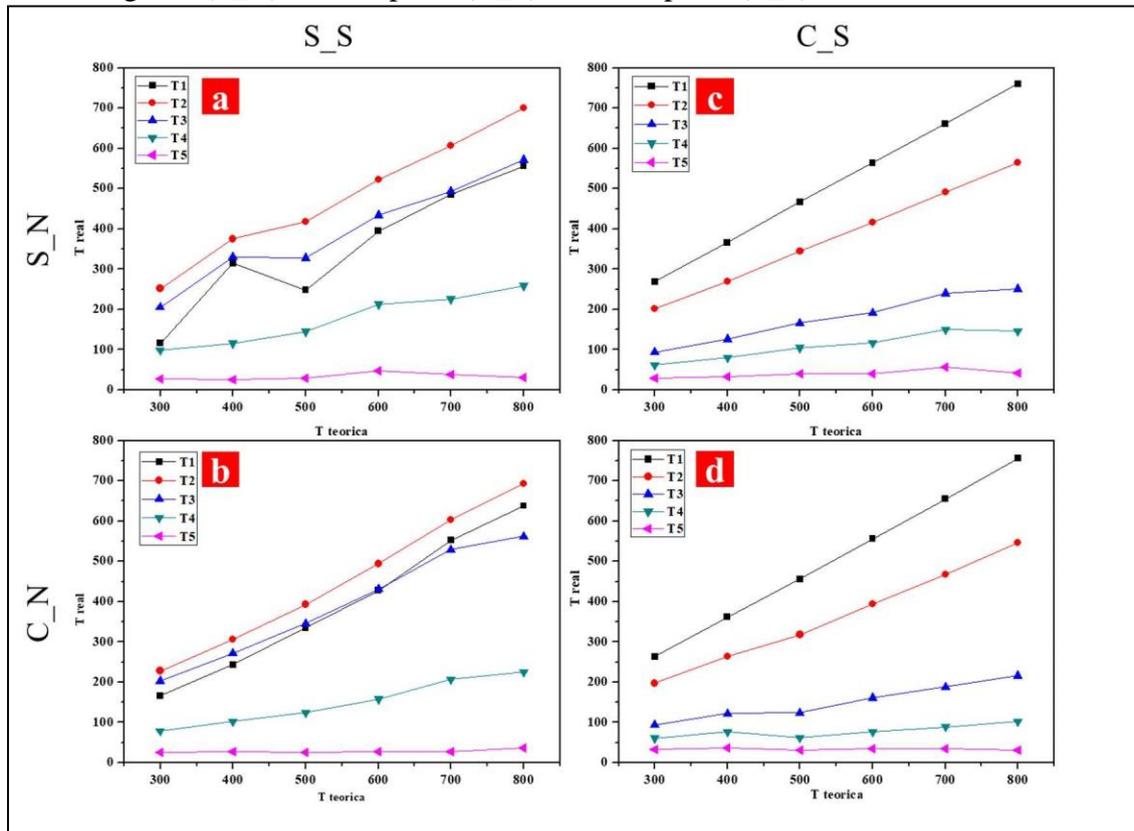


Através das medidas de densidade aparente foram constatadas variações em torno de 30%, passando a ordem de 5% de variação com a utilização do suporte de elevação, constatando um processamento de carvão mais homogêneo.

A influência da utilização de atmosfera de nitrogênio é também ilustrada na Figura 5, e é possível ver que para os ensaios realizados com auxílio do suporte de elevação as temperaturas se mantem constantes tanto com fluxo de gás ou não. No caso das amostras sem suporte (gráficos a e b da Figura 6), a presença do fluxo de gás gerou influência na temperatura como é possível ver pelo termopar 1 (T1) que na presença do fluxo gasoso aumentou seu sinal. Acredita-se que o fluxo de gás influenciou de maneira que houvesse uma distribuição mais uniforme do calor, como podemos observar as curvas mais distantes dos termopares T1, T2 e

T3 no gráfico, que quando comparadas com o gráfico b encontram-se mais uniformes e próximas.

Figura 6: Ensaios realizados com reator sem carga em atmosferas de nitrogênio (C_N), sem nitrogênio (S_N), com suporte (C_S) e sem Suporte (S_S).



Fonte: Autoria própria

4.3 Protocolo operacional

Ao final da avaliação do reator e de todos seus componentes, foi elaborado um protocolo de operação conforme o regimento do laboratório, que segue em anexo (Anexo I) a este trabalho, permitindo a outros usuários realizarem a utilização do equipamento de forma mais eficiente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através deste trabalho foi possível otimizar as medidas de temperatura a serem realizadas dentro do reator de pirólise, tendo em vista um melhor monitoramento do processo e o conhecimento integral do equipamento. Os ensaios com biomassa permitiram validar a eficiência do dispositivo, tendo em vista que no modo anterior de operação não havia eficiência, devido a obtenção de um material heterogêneo, e após o uso do dispositivo de elevação do material, passou a processar de maneira mais uniforme.

Como perspectivas sugere-se a execução de ensaios com biomassa em condições de atmosfera inerte e parcialmente oxidante, avaliando o material conforme resposta do comportamento do equipamento. Por parte do dispositivo desenvolvido propõe-se a avaliação do equipamento com a utilização do suporte, avaliando a influência nos produtos de pirólise de biomassa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTERTHUM, F. **Propriedades do bagaço da cana-de-açúcar**. Disponível em: <<https://revistapesquisa.fapesp.br/1998/04/01/propriedades-do-bagaco-da-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 30 set. 2019.
- ANEEL. Biomassa. **Atlas de energia elétrica no Brasil**, v. 2020, p. 77–92, 2005.
- BIOWARE. **Tecnologias para conversão de biomassa**. Disponível em: <<https://www.bioware.com.br/pirolise-e-gaseificacao>>. Acesso em: 25 mar. 2019.
- DHYANI, V.; BHASKAR, T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. **Renewable Energy**, v. 129, p. 695–716, 2018.
- FONT, R.; WILLIAMS, P. T. Pyrolysis of biomass with constant heating rate: Influence of the operating conditions. **Thermochimica Acta**, v. 250, n. 1, p. 109–123, 1995.
- GONÇALVES, G. DA C. et al. Produção de carvão ativado a Partir De bagaço e melação de cana-de-açúcar. **Acta Sci. Technolofgy**, v. 28, n. 1, p. 21–27, 2006.
- MACHADO, M. A. Produção e Tratamento Catalítico de Bio-óleo produzido a partir da pirólise do bagaço de cana-de-açucar. p. 142, 2013.
- MME-MINISTERIO DE MINAS ENERGIA. Exercício de 2018. p. 32, 2019.
- MORGAN, T. J. et al. Review of Biomass Resources and Conversion Technologies for Alternative Jet Fuel Production in Hawai’i and Tropical Regions. **Energy and Fuels**, 2019.

ANEXO I

PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO

PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO

EQUIPAMENTO: Sistema de Volatilização de Materiais Orgânicos (Reator de Pirólise)

1. Objetivo:

Estabelecer procedimento padrão para processamentos utilizando reator de pirólise.

2. Característica do equipamento:

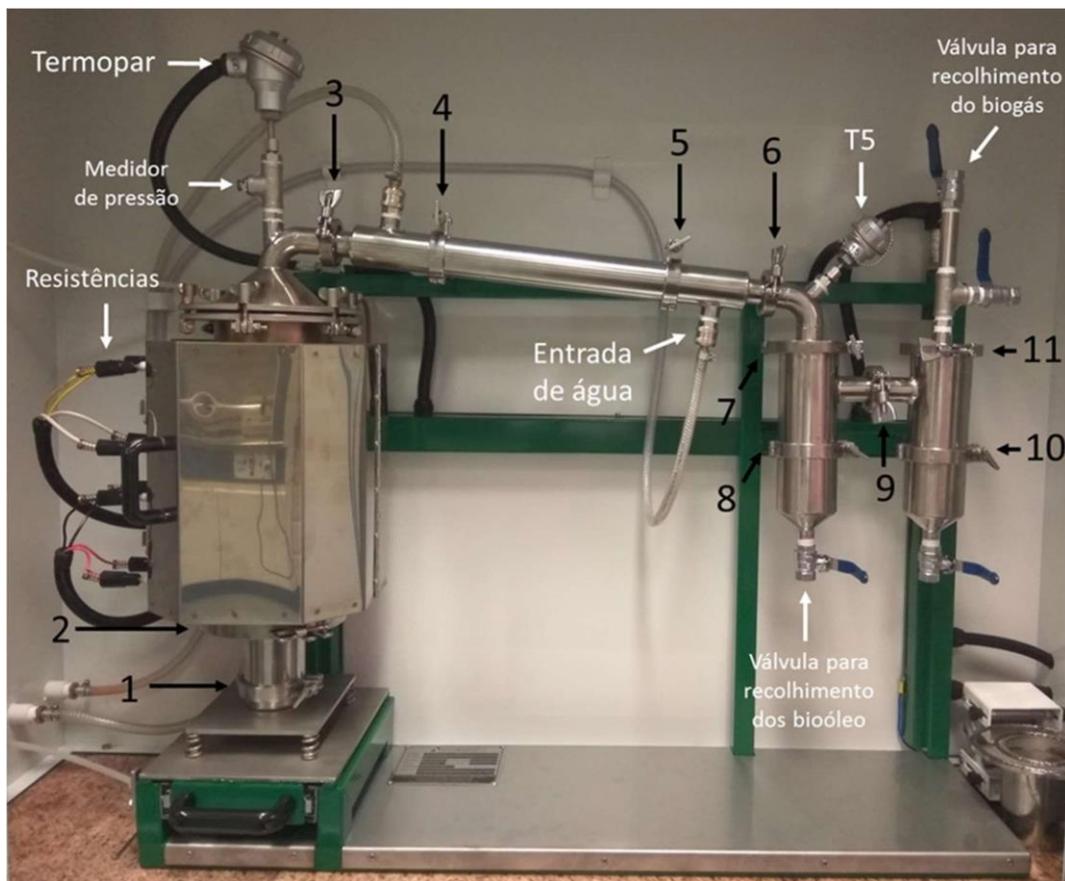
- EQUIPAMENTO: Sistema de Volatilização de Materiais Orgânicos
- MODELO: SIVOMO250D
- ESPECIFICAÇÕES GERAIS: Capacidade máxima 250 g/batelada; voltagem 220V.



3. Aplicações:

O equipamento destina-se ao processamento térmico de biomassa, podendo ser este em atmosfera oxidante, parcialmente oxidante ou inerte. A biomassa é submetida a queima na caldeira principal do equipamento pelo aquecimento do conjunto de resistências elétricas, obtendo os produtos de queima, em geral (dependente da atmosfera utilizada), é obtido frações gasosas recolhidas (ou dispensadas) ao final do condensador, se obtém também frações condensáveis (liquidadas), ao final do condensador e o carvão (ou cinzas) na caldeira principal.

4. Descrição do procedimento:



Para descarga e desmontagem do reator:

1. Desligar a chave geral e tirar o equipamento da tomada
2. Soltar as quatro resistências da frente da camisa
→ Uma de cada cor
3. Soltar um pouco as chaves borboleta do forno
4. Desacoplar termopar
5. Soltar o engate rápido da mangueira do medidor de pressão
→ Mangueira branca
6. Soltar um pouco abraçadeiras 4 e 5, que mantém o condensador no lugar, apenas para permitir uma leve movimentação
7. Soltar travas da camisa do forno e abri-la
→ Com cuidado para não se arranhar com as pontas da camisa
8. Soltar abraçadeira 3 que liga o forno ao condensador
9. Abrir completamente a capela
10. Puxar mesa do forno para fora com cuidado, segurando o forno com a outra mão
11. Soltar completamente as chaves borboleta do forno
12. Remover a tampa com cuidado pois o termopar é longo
13. Soltar abraçadeira 1, na base do forno
14. Remover o forno e despejar a amostra no recipiente adequado
15. Soltar abraçadeira 2, que prende o corpo do forno ao seu fundo, e soltar as duas peças
→ Após o aquecimento a borracha tende a manter bem presas essas duas peças, pode ser necessário utilizar algo como alavanca entre elas
16. Soltar mangueiras de água do condensador
→ Garantir que o fluxo de água esteja desligado e tomar cuidado com a água que pode estar acumulada nas mangueiras
17. Soltar a abraçadeira 6 que liga o condensador ao cilindro para recolhimento do bio-óleo
18. Soltar as abraçadeiras 4 e 5, que sustentam o condensador, com cuidado para não o derrubar e removê-lo
19. Soltar o termopar da saída do condensador (T5)
20. Soltar as abraçadeiras 8, 9 e 10, dos dois cilindros para recolhimento do bio-óleo e removê-los

Para limpeza do reator:

1. Desacoplar o termopar da tampa do forno e limpá-lo com um papel e álcool
2. Passar ar comprimido na parte principal do forno e limpá-lo com papel e álcool
3. Lavar a tampa do forno, o condensador e os cilindros para recolhimento do bio-óleo com detergente e depois passar álcool
4. Não é necessário lavar a saída do biogás (topo do segundo cilindro) pois tem contato apenas com os gases

Para carregar o reator:

1. Remontar os cilindros para recolhimento do bio-óleo, o termopar T5 e o condensador
2. Com a mesa do forno puxada para fora, montar o forno e colocar a amostra na câmara
 - Capacidade máxima da câmara do forno: 1L
 - É recomendável deixar um espaço no meio da câmara para o termopar
3. Colocar a tampa do forno e prendê-la de leve com as chaves borboleta
 - Fechar apenas o suficiente para mantê-la no lugar
4. Com a capela completamente aberta, empurrar a mesa do forno para dentro tomando cuidado para que o termopar não bata na capela
 - Pode ser necessário remover a tampa do forno e ajeitar melhor a amostra até que o termopar possa ser empurrado até o fundo do forno (sem realmente tocar o fundo)
5. Fechar completamente as chaves borboletas da tampa do forno
6. Soltar a abraçadeira 1, que prende o fundo do forno, e ajustar a posição do forno de forma que a sua saída possa ser ligada ao condensador
7. Fechar as braçadeiras 1 e 3, a que prende o fundo do forno e a que o liga ao condensador
8. Ligar a mangueira do medidor de pressão
9. Ajustar a posição do termopar para que seja mais fácil ligá-lo no cabo que fica na parede da capela
10. Conferir todas as abraçadeiras, mangueiras e válvulas para garantir que tudo esteja bem fechado
 - As braçadeiras 2, 3, 6, 7, 9 e 11 vedam o sistema, por isso devem estar bem presas
11. Abrir a válvula de saída do biogás em 45°
12. Ligar a chave geral do equipamento
13. Ligar a luz da capela e a exaustão

→ Ligar também o exaustor móvel do laboratório, porém mantê-lo fechado para que nada volte por ele

14. Ligar o cabo USB no computador e abrir o software na área de trabalho

15. Conferir se foi criado um arquivo com a data do teste no nome

16. Conferir se a leitura das temperaturas e pressão fazem sentido

17. Ajustar a temperatura desejada no painel

→ Lembrar que a temperatura no interior do forno é sempre menor que a ajustada no painel

18. Ligar a resistência

19. Acompanhar a subida da temperatura

Utilização do suporte para elevação da amostra:

1. O suporte é utilizado para elevação da amostra para a zona de calor

2. Na montagem do reator o suporte deve ser colocado dentro da caldeira

3. Para a utilização do suporte com o adaptador de fluxo de gás deve-se utilizar um arco metálico na base da caldeira dando suporte para o tripé

4. Após a colocação do suporte dentro da caldeira, e o fechamento da base coloca-se a biomassa pela abertura superior permitindo sua elevação

5. O conjunto de termopares deve ser solto com o auxílio de uma chave

6. Após solto o conjunto de termopares deve ser alocado para uma altura um pouco acima do suporte, de maneira a ficar mais perto da região de calor

7. Após fechado o reator pode ser ligado e efetuar processamento.

5. Referência:

BIOWARE. Tecnologias para conversão de biomassa. Disponível em: <<https://www.bioware.com.br/pirolise-e-gaseificacao>>. Acesso em: 25 mar. 2019.