

# Reator de leito fluidizado multiuso para estudos de combustão, gaseificação e pirólise de biomassa

CAMARGO, Fernando de Lima  
CARVALHO, Renan de Souza  
BAPTISTA, Antonio Sampaio

## RESUMO

Universidades que possuem laboratórios de energias alternativas são carentes de equipamentos que simulam os processos de geração termelétrica de energia através da queima de matéria-prima. Um reator de leito fluidizado foi desenvolvido pelo Laboratório de Agroindústria, Alimentos e Nutrição (LAN) da Esalq (USP) e visa suprir esta necessidade além de realizar pesquisas na área. Este equipamento foi projetado para realizar estudos de pirólise, gaseificação ou combustão de resíduos agroindustriais e pela versatilidade, fica a cargo do operador controlar as variáveis do processo de acordo com o teste que queira realizar. As variáveis controláveis do processo são as entradas de ar atmosférico e gás liquefeito de petróleo (GLP) através de rotâmetros, e a variação da taxa de alimentação da matéria-prima a ser estudada pela variação da rotação da rosca alimentadora.

Palavras-chave: Bioeletricidade; Reator de Leito Fluidizado; Cinética Química.

## ABSTRACT

Colleges that have alternative energy laboratory are poor in equipment that simulate thermoelectric generation through burn feedstock. A fluidized bed reactor was designed by Agri-food Industry, Food and Nutrition Laboratory (LAN) from Esalq (USP) and wants supply this necessity beyond to realize research in this area. This equipment was developed to realize studies in pyrolysis, gasification or combustion of agro-food industry waste and due the flexibility, the operator can control the process variables according to the assay that would like to realize. The controlled variables are atmospheric air and liquid petroleum gas (LPG) through rotameter, and the feedstock feeding ratio through the spin of screw-feeder.

Key-words: Bioelectricity; Fluidized bed reactor; Chemistry kinetic

## RESÚMEN

Universidades que tienen laboratorios de energía alternativas carecen de equipos que simulan los procesos de generación de energía térmica por la quema de las materias primas. Un reactor de lecho fluidizado fue desarrollado por el Laboratorio de Agroindustria, Alimentos y Nutrición (LAN) Esalq (USP) y tiene como objetivo cubrir esta necesidad, además de la realización de investigaciones en el área. Este equipo está diseñado para llevar a cabo estudios de pirólisis, la gasificación o combustión de residuos agroindustriales y la versatilidad, está a cargo del operador controlar las variables del proceso de acuerdo con la prueba que desea realizar. Las variables controlables del proceso son las tomas de aire atmosférico y gas licuado de

petróleo (LPG) a pelo del medidor de caudal, y la variación de la velocidad de alimentación de la materia prima a ser estudiadas mediante la variación de la rotación del alimentador de tornillo.

Palabras-clave: Bioelectricidad; Reactor de lecho fluidizado; Cinética Química.

## **1.0 INTRODUÇÃO**

Atualmente os laboratórios que possuem equipamentos que reproduzem a combustão, a gaseificação e a pirólise de resíduos em escala piloto e de bancada são dedicados a pesquisa. Raros são aqueles que possuem equipamentos de bancada para o ensino destes processos termoquímicos.

As tecnologias de conversão que emprega a biomassa para a geração de energia podem ser classificadas em duas categorias: processos termoquímicos, consistindo de combustão, gaseificação e pirólise, e processos biológicos de fermentação e digestão (SALES, 2007).

A combustão é uma reação química que ocorre entre uma substância e um gás e tem como resultado a liberação de luz e calor. O objetivo da reação de combustão é o de consumir toda a substância empregada como reagente e para isso uma quantidade de ar atmosférico acima da relação estequiométrica é empregada, para garantir que a reação ocorra de forma completa. Quando a combustão ocorre de forma incompleta, ou seja, com menos ar atmosférico que o requerido no balanço estequiométrico, a reação passa a ser denominada de gaseificação e o objetivo principal passa ser o de gerar gases combustíveis.

A pirólise por sua vez ocorre na ausência total ou parcial de oxigênio e pode ser denominada geralmente de rápida ou lenta, com objetivos específicos. A pirólise rápida de biomassa visa a maximização de frações líquidas e gasosas, dependendo da temperatura empregada, enquanto que a pirólise lenta vislumbra a maximização de frações sólidas. Porém, a pirólise é a reação que antecede a combustão ou gaseificação, e ocorre por meio da degradação térmica da estrutura molecular da substância empregada nestes processos.

Tais processos podem ser identificados em caldeiras de usinas de açúcar e álcool, motores de combustão interna, gaseificadores de leito fixo, fornos de carvoarias, dentre outros.

A tecnologia da fluidização foi escolhida pela versatilidade que se tem de processar materiais sólidos das mais variadas características físico-químicas empregando-se um leito de areia como meio de transferência homogênea de calor.

Testes preliminares com o reator foram realizados no Laboratório de Agroindústria e Nutrição (LAN) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (Esalq) – campus USP para avaliar as condições operacionais do equipamento.

## **2.0 LEITO FLUIDIZADO**

Leitos fluidizados têm a grande vantagem de oferecer uma excelente transferência de calor entre o inventário e a matéria-prima a ser processada. O processo de leito fluidizado oferece três vantagens sobre outras tecnologias: transferência de calor superior, habilidade de movimentar sólidos como um fluido e processar materiais com uma ampla distribuição granulométrica.

### **2.1 TEORIA DA FLUIDIZAÇÃO**

Segundo Kunii e Levenspiel (1969) e Geldart (1986) o início da fluidização ocorre quando a massa efetiva das partículas do material presente no leito for equilibrada pela força de arraste do gás em movimento. Matematicamente, esta formulação teórica pode ser definida por

Na equação (1)  $H_{leito}$  é a altura do leito quando fluidizado,  $g$  e a aceleração da gravidade,  $\rho_p$  e a densidade da partícula,  $\rho_g$  e a densidade do gás,  $\epsilon$  e a fração de vazio no leito.

Na maioria dos materiais processados, além da não esfericidade, eles têm ampla distribuição granulométrica, sendo necessário caracterizá-los através do chamado diâmetro médio equivalente de partícula ( $d_p$ ). Neste caso, a determinação da queda de pressão no leito fixo de partículas sólidas não-esféricas e com determinada distribuição granulométrica é definida a partir da equação de Ergun, substituindo o  $d_{pe}$  pelo  $d_p$  da amostra, sendo que, para sólidos isotrópicos

A mínima fluidização pode ser estimada para partículas esféricas, calculando o número de Arquimedes, ou seja:

$$\text{-----} \quad (2)$$

Na equação (2)  $d_p$  é o diâmetro médio da partícula,  $\mu$  a viscosidade do fluido e  $Re$  e o número de Reynolds das partículas na velocidade de mínima fluidização,  $u_{mf}$ .

$$\text{-----} \quad (3)$$

Quando a velocidade dos gases aumenta além da velocidade de mínima fluidização, bolhas são formadas. Esta relação pode ser computada pela teoria bifásica, dada por

$$(4)$$

ou

$$(5)$$

Na equação (4)  $Q_{leito}$  e a vazão total de gases que atravessam o leito,  $Q_{emulsao}$  e a vazão através da fase densa,  $Q_{bolhas}$  e a vazão através de bolhas. Na equação (5)  $A_{leito}$  e a área transversal do leito e  $u_0$  e a velocidade superficial do gás. Sendo assim, acima da condição de mínima fluidização, todo gás que atravessa o leito o faz através de bolhas.

Geldart (1986) forneceu um conveniente critério de classificação de partículas geralmente empregadas em reatores de leito fluidizado, dividindo-as em quatro tipos, conforme apresentadas na Figura (1).

Partículas do grupo B, segundo a classificação de Geldart (1986), fluidizam facilmente e são amplamente usadas em processos que envolvem fluidização borbulhante.

Para haver uma distribuição homogênea de bolhas dentro do leito, promovendo a movimentação do inventário, tanto quanto da material-prima a ser processada, e evitando-se zonas mortas ou regiões que não interagem no processo, um distribuidor deve ser instalado no reator. Este equipamento contribui em termos de eficiência na movimentação e transferência de calor entre os meios.

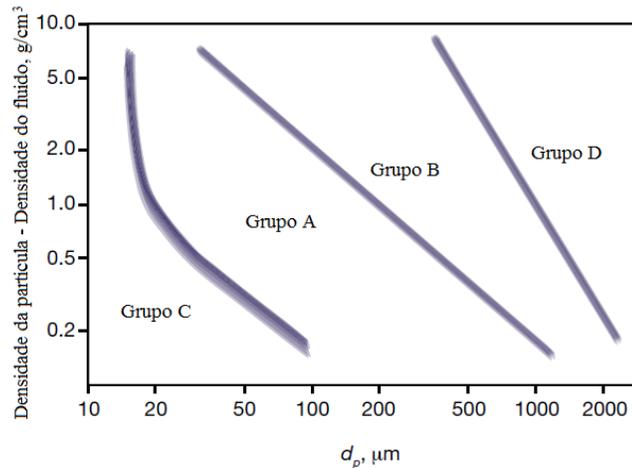


Figura 1. Critério de classificação das partículas segundo Geldart (1986)

Para a partícula elutriar, ou seja, ser carregada para fora do leito, a velocidade dos gases que fluidizam o leito precisa exceder a sua velocidade terminal. A velocidade terminal é a condição na qual a partícula em queda livre não sofre mais aceleração. Geralmente as partículas menores são elutriadas devido a ampla distribuição granulométrica que compõe o leito e a matéria-prima nele inserida durante o processo.

Ha um parâmetro na qual as partículas se separam das linhas de corrente da vazão de gases, onde são elutriadas, e retornam para o leito (Figura 2). A denominação em inglês para esta condição e *Transport Disengagement Height* (TDH). Este parâmetro e considerado para a instalação do ciclone, evitando diminuir a eficiência deste equipamento na separação de sólidos dos gases.

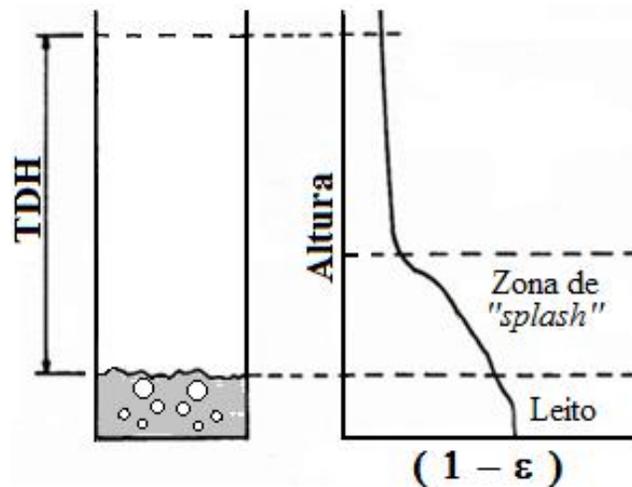


Figura 2. Transport Disengagement Height (TDH)

Na figura (2) a zona de "splash" consiste na região onde as bolhas estouram, promovendo o lançamento das partículas por ela carregadas durante sua passagem pelo leito e as que se encontram na superfície do leito. Estas partículas são lançadas acima da altura de mínima fluidização do leito.

As partículas elutriadas são capturadas no ciclone e a eficiência deste equipamento pode ser prejudicada caso o projeto não leve em consideração o valor do TDH.

### 3.0 – MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 REATOR DE LEITO FLUIDIZADO

Na Figura (3) é apresentada a montagem do conjunto.

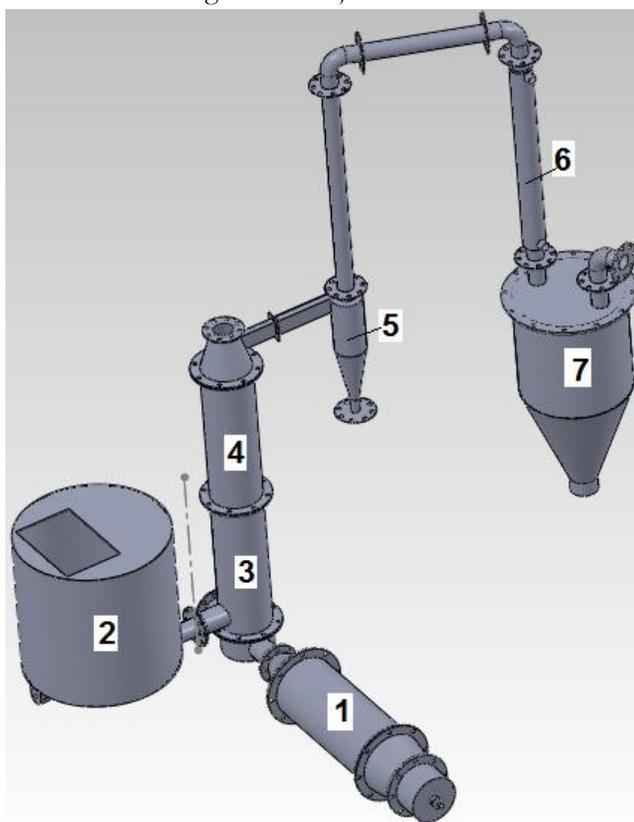


Figura 3. (1) Câmara de combustão; (2) Silo de alimentação de matéria-prima; (3,4) Reator de Leito Fluidizado; (5) Ciclone; (6) Trocador de calor; (7) Coletor de fração líquida.

A câmara de combustão tem um diâmetro interno de 300 mm e foi construída em aço inox AISI 316 L.

Na câmara de combustão ocorre a reação entre ar atmosférico e gás liquefeito de petróleo (GLP). Este componente fornece a energia calorífica necessária para que os processos ocorram. Este equipamento foi projetado para trabalhar nas condições de combustão, gaseificação e pirólise. De acordo com o teste a ser realizado e as variáveis de entrada, pode-se fornecer apenas ar atmosférico em excesso na reação de combustão, ar atmosférico parcial, como agente da gaseificação, ou a energia calorífica dos gases da combustão para processos de pirólise.

Na Figura 4 é apresentada a câmara de combustão em funcionamento.



Figura 4. Câmara de combustão do sistema de gaseificação.

O silo de alimentação foi construído em aço carbono SAE 1020, constituído de um misturador para a quebra de arcos mecânicos forma geralmente quando se emprega matéria-prima fibrosa (CAMARGO, 2006). Este equipamento tem a capacidade de armazenar 10 kg de biomassa, podendo ser reabastecido durante o funcionamento do equipamento. Dois motores de 0,25 cv de potência e redução de 1:10 são empregados no projeto, sendo um para acionar o misturador e outro para movimentar a rosca transportadora. Um inversor de frequência é empregado para controlar a velocidade de rotação da rosca transportadora.

A rosca transportadora possui um sistema de refrigeração para evitar a ocorrência de degradação térmica da matéria-prima a ser processada no leito antes mesmo de ser introduzida no reator. O sistema consiste de tubos coaxiais onde o tubo interno injeta água na temperatura ambiente até a extremidade da rosca, introduzida no leito, e o tubo externo refrigera o dispositivo quando a água retorna ao ponto de injeção.

Na Figura 5 é apresentado o interior do silo de alimentação, destacando-se o misturador, constituído de duas barras transversais e um raspador de fundo.

O reator de leito fluidizado é constituído de uma câmara plena, uma placa distribuidora que suporta o leito e distribui uniformemente os gases da fluidização que percolará pelo leito de particulados e o freeboard. Tem um diâmetro interno de 160 mm e uma altura total de 1 m. O reator foi construído em aço inoxidável AISI 316 L com 5 mm de espessura, dispensando o uso de material refratário resultando em maior resistência

mecânica e versatilidade nas mudanças de temperatura. O reator foi isolado externamente com fibra cerâmica com 25 mm de espessura.

A placa distribuidora foi construída em aço inox AISI 316 L e elaborada segundo a metodologia desenvolvida no laboratório do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos (DETF) da Escola de

Engenharia de São Carlos (EESC) – campus USP, utilizando injetores com orifícios radiais (LOMBARDI *et al.*, 1997). A perda de carga dos injetores é concentrada no orifício radial o que uniformiza a vazão por orifício e não por injetor. O número de orifícios por injetor varia segundo sua localização de maneira a produzir uma distribuição de ar o mais uniforme possível e ao mesmo tempo proteger a integridade da parede do reator (CAMARGO, 2001). Foram utilizados 13 injetores com 4 cada um, resultando um total de 52 furos com 2 mm de diâmetro, a 5 mm da base da placa. Os injetores foram construídos em aço inox 316 L e usinados em forma de cone no topo para evitar o acúmulo de material neste ponto.



Figura 5. Misturador do silo de alimentação.

O ciclone foi construído conforme a configuração Stairmand e possui na descarga de sólidos um recipiente fechado que coleta o material elutriado para análise posterior. O recipiente tem uma seção cônica e um coletor acoplado na sua parte inferior.

O trocador de calor coaxial foi construído em aço inox 316 L e tem um comprimento de 1 m. Este componente é empregado para recuperar frações líquidas geradas nos processos para fins de estudo e para a recuperação da água gerada nas reações.

O coletor de frações líquidas foi construído em aço inox AISI 316 L.

Os termopares utilizados no sistema experimental foram do tipo K (Cromel/Alumel). Os cinco termopares utilizados no reator são encapsulados em alumina e aço inoxidável para proteção elétrica e mecânica dos mesmos. Um dos termopares está localizado na câmara plena para o monitoramento da temperatura de entrada. Um segundo termopar está localizado dentro do reator, para o monitoramento do leito e, conseqüentemente, da temperatura de reação. Um terceiro termopar está localizado na região de *freeboard*, para simples monitoramento, tanto quanto termopares localizados na saída do ciclone e na entrada do coletor de frações líquidas do sistema. A leitura dos termopares é realizada no painel de controle.

O sistema (Figura 6) foi instalado numa estrutura metálica sobre rodas, para facilitar seu deslocamento, e o sistema de refrigeração foi construído nesta estrutura. A refrigeração do sistema é realizada com água.



Figura 6. Sistema de gaseificação em instalação

#### 4.0 – RESULTADOS PRELIMINARES

##### 4.1 – Ensaios de aquecimento e arrefecimento da planta

Uma bateria de ensaios foi realizada para a verificação da eficiência de queima da câmara de combustão (ensaios qualitativos) e do aquecimento do leito (ensaios quantitativos), observando se a temperatura dos processos a serem estudados serão atingidas ou se necessita de melhorias e correções de projeto. O objetivo dos testes foi também o de elaborar um procedimento de operação, aqui denominado de “Metodologia de ensaios”.

Na Figura 7 são apresentadas as temperaturas coletadas na câmara plena, em três ensaios realizados com o reator. As temperaturas denominadas de T1, T1a e T1b ocorreram com o reator frio, no período da

manhã e correspondendo ao primeiro testes, e com o reator quente, os dois últimos testes. A temperatura máxima obtida na região da câmara plena foi de 470 °C.

Na Figura 8 são apresentadas as temperaturas coletadas dentro do leito, no ponto de alimentação de biomassa. Da mesma forma que a temperatura da câmara plena da Figura 9, as temperaturas T2, T2a e T2b, correspondem ao teste com o reator frio pela manhã e dois testes a tarde, com o reator quente. . A temperatura máxima obtida na região da câmara plena foi de 414 °C.

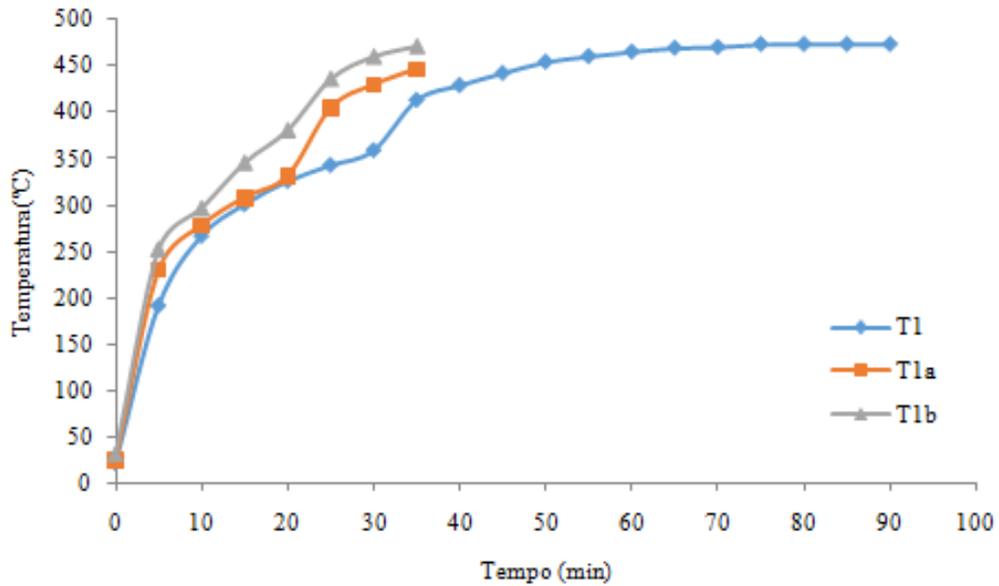


Figura 7: Temperaturas na câmara plena em três testes consecutivos.

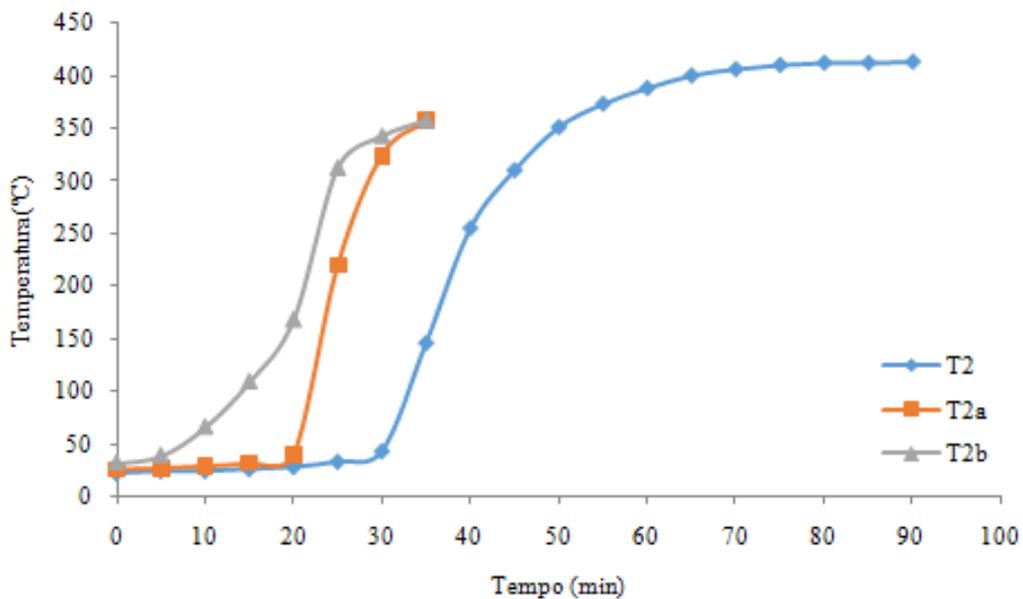


Figura 8: Temperaturas do leito, no ponto de alimentação de biomassa, obtidas em três testes consecutivos.

Kim *et al* (2013) realizaram procedimentos semelhantes, onde iniciaram a alimentação de biomassa quando a temperatura do leito acusava 400 °C. A combustão da biomassa, tal como o procedimento dos autores citados, aumentará a temperatura do leito e, retirando-se totalmente a presença de GLP e parcialmente a de ar atmosférico, atingiram temperaturas em torno de 800 °C na gaseificação.

No caso específico de estudos com pirólise, onde a temperatura no leito e especificamente no ponto de alimentação de biomassa deve ser de 500 °C. Neste caso há a necessidade de melhorias no isolamento do reator e, em último caso, a substituição do fornecimento de ar atmosférico recorrendo-se a um compressor mais potente, em substituição ao utilizado atualmente.

Na figura 9 é apresentada a temperatura na saída do ciclone. Pelo resultado verifica-se que há a necessidade de melhorias no isolamento térmico de determinadas regiões do reator, tais como a seção de conexão entre o reator e o ciclone. Os produtos da pirólise podem condensar em temperaturas ao redor de 300 °C. Corre-se o risco de ocorrer a condensação indesejada destes compostos entre a saída do ciclone e a entrada do trocador de calor. A máxima temperatura registrada neste local foi de 290 °C.

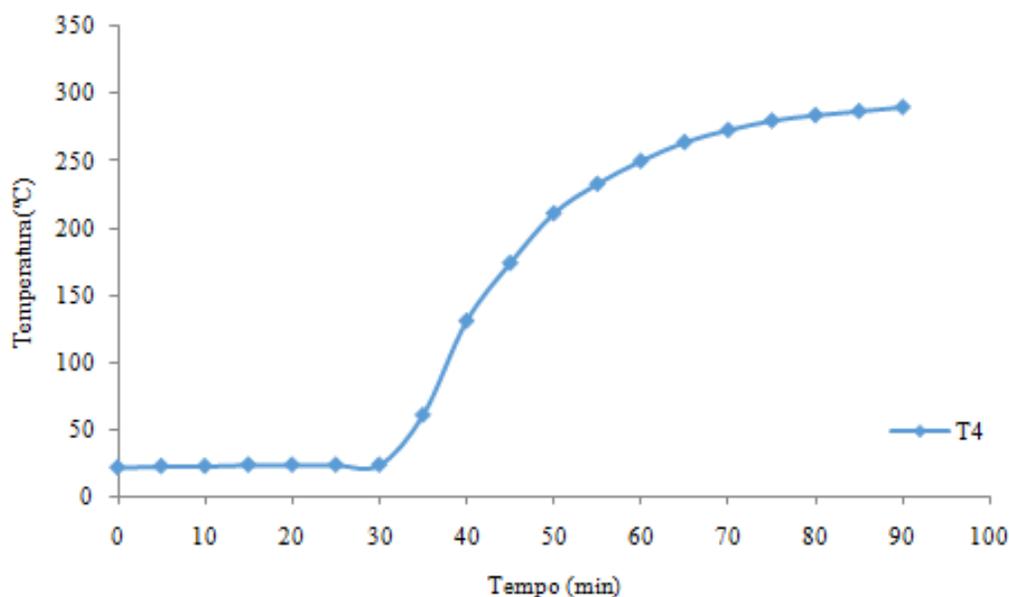


Figura 9: Temperatura na saída do ciclone

#### 4.2 – Balanços de massa e energia

Para a quantificação dos balanços de massa e energia, os alunos deverão coletar e analisar os compostos resultantes da reação estudada.

No que se refere ao balanço de massa, ao finalizar os experimentos e aguardar o resfriamento do reator e superfícies aquecidas, os produtos serão coletados nos seguintes locais da planta:

- Leito inerte (quantificar a massa do leito para averiguar se houve material alimentado não elutriado ou cinzas que permaneceram neste local);
- Coletor de particulados (quantificar a massa do particulado elutriado retido no recipiente localizado na parte inferior do ciclone);
- Coletor de líquidos (quantificar a quantidade de líquidos gerados no processo e que ficou retido no recipiente localizado após o trocador de calor).

Pela diferença entre a massa do material alimentado e as massas medidas nos locais acima citados, tem-se a massa de gases gerada.

No que se refere ao balanço de energia, os materiais coletados para quantificar o balanço de massa serão mensurados seus valores energéticos por meio de:

- a. Bomba calorimétrica (quantificar o poder calorífico superior das frações sólida e líquida recuperadas ao final de cada processo e do material alimentado);
- b. Cromatografia gasosa (qualificar os gases gerados no processo).

Pela diferença entre a energia fornecida pelo material alimentado e as energias mensuradas nas massas das frações sólida e líquida coletadas, tem-se a quantidade de energia contida nos gases gerados. O intuito de qualificar os gases produzidos é de acompanhar o processo em execução e também de quantificar o potencial energético dos gases combustíveis gerados na gaseificação ou na pirólise, quando estes testes forem realizados.

## **4.2 – Aulas experimentais**

As aulas experimentais poderão ser divididas de acordo com as etapas sugeridas abaixo, mas cabe ao instrutor/professor escolher a metodologia mais adequada. É de extrema importância a presença do instrutor/professor nas aulas descritas e a presença do técnico responsável para o acompanhamento dos trabalhos em horários extraclasse, denominados de aulas posteriores na descrição proposta.

Aula experimental 1: Apresentação do equipamento e explanação das funções de cada componente do conjunto;

Aula experimental 2: Precauções e segurança na operação do equipamento; Iniciar o processo com o treinamento da ignição da câmara de combustão.

Aula experimental 3: O técnico responsável pelo laboratório controlará as variáveis do processo até o equipamento atingir a temperatura de operação. A alimentação de material poderá ser realizada no momento da aula, concomitantemente com a análise dos gases gerados no cromatógrafo a gás.

Aula experimental 4: Coleta e quantificação do material processado.

Aula experimental 5: Computar os resultados.

Aulas posteriores: Os alunos, divididos em grupo, realizarão testes de gaseificação, combustão e pirólise com a matéria-prima disponível no laboratório.

Teste final: Apresentação dos resultados obtidos pelos grupos, totalizando réplicas de cada processo, resultando na publicação de artigo em congressos de iniciação científica.

## 5.0 – CONCLUSÕES

Um treinamento de 24 horas foi realizado com os alunos da Esalq, consistindo de 4 horas de teoria e 20 horas na operação do equipamento. Os três testes realizados e apresentados neste artigo foram realizados pelos estudantes, sem a presença do instrutor. Uma metodologia foi escrita e será difundida em treinamentos futuros. Testes de pirólise rápida foram realizados neste equipamento, mas verificou-se a necessidade de melhorias no isolamento térmico da câmara plena e na seção de alimentação de areia do reator.

## 6.0 – REFERÊNCIAS

Camargo, F. L. *Qualificação de calcários brasileiros quanto à absorção de SO<sub>2</sub> em leito fluidizado para condições típicas de combustão de carvão*. (Dissertação de mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos (Universidade de São Paulo), 2001.

Camargo, F. L. *Estudo da pirólise rápida de bagaço de cana em reator de leito fluidizado borbulhante*. (Tese de doutorado). Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), 2006.

Geldart, D. *Gas Fluidization Technology*. Wiley, New York, 1986.

Kim, Y.D., Yang, C. W., Kim, B. J., Kim, K. S., Lee, J. W., Moon, J. H., Yang, W., Yu, T.U, Lee, U. D. Air-blown gasification of woody biomass in fluidized bed gasifier. *Applied Energy*, 112, p. 414 – 420, 2013.

Kunii, D.; Levenspiel, O. *Fluidization Engineering*. Wiley, New York, 1969.

Lombardi, G.; Pagliuso, J. D.; Goldstein Jr, L. Performance of a tuyere gas distributor. *Powder Technology*, p. 5 – 14, n. 94, 1997.

Sales, C. A. V. B. *Análise Técnico Econômica da Conversão da Biomassa em Eletricidade Utilizando Tecnologias de Gaseificação*. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), 2007.

1 Fernando de Lima CAMARGO, possui graduação em Engenharia Mecânica pela Escola de Engenharia de Piracicaba (1996), Mestrado em Engenharia Mecânica pela Universidade de São Paulo (2001), Doutorado em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP (2006), ambas na área de Engenharia Térmica e de Fluidos, e Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho (2010). Participou de pesquisas de adsorção de SO<sub>2</sub> na combustão de carvão mineral em leito fluidizado, gaseificação e pirólise de bagaço de cana de açúcar e hidrogenação de bio-óleo de sorgo. fl\_camargo@hotmail.com

2 Renan de Souza CARVALHO, aluno da graduação da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-ESALQ-USP ingressante em 2010, em Piracicaba, São Paulo. Conhecimento na parte de grãos e agronegócio, e produção e etanol e geração de energia a partir bagaço de cana-de-açúcar, caracterização de índices de palhada, e caracterização de compostos da fibra da cana-de-açúcar. Dedicado a novas tecnologias e sustentabilidade do setor sucroenergético brasileiro, aumento e otimizando o seu desenvolvimento. renan.desc@hotmail.com

3 Antonio Sampaio BAPTISTA, possui graduação em Engenharia Agrônoma pela Universidade do Estado de Santa Catarina (1996), Mestrado em Agronomia (Microbiologia Agrícola) pela Universidade de São Paulo (2001), Doutorado em Ciências pela Universidade de São Paulo (2005) e Pós-Doutorado em Ciências pela Universidade de São Paulo (2008) . Atualmente é professor doutor da Universidade de São Paulo, na Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" , ESALQ/USP. Tem experiência na área de Ciência e Tecnologia Sucroenergética, com ênfase em fermentações industriais. Tem atuado principalmente nos seguintes temas: tecnologia de produção de etanol, tecnologia do açúcar, fermentações