

# PREDIÇÃO DA TEMPERATURA INICIAL DO LEITO INERTE NA PIRÓLISE DE BIOMASSA

T. B. NASCIMENTO<sup>1</sup>, C.A.M. PIRES<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia, Departamento de Engenharia Química

<sup>2</sup> Universidade Federal da Bahia, Departamento de Engenharia Química

E-mail para contato: [tais\\_bnascimento@yahoo.com.br](mailto:tais_bnascimento@yahoo.com.br)

**RESUMO** – O estudo de novas fontes energéticas é de suma importância para o desenvolvimento econômico, ambiental e tecnológico da sociedade. A produção de bio-óleo a partir de biomassa encontra-se no grupo de energias alternativas discutidas atualmente. O emprego deste estudo está, muitas vezes, vinculado ao aproveitamento de resíduos orgânicos gerados em processos produtivos de pequeno e grande porte. A planta piloto estudada utiliza o resíduo da palma de sisal como matéria-prima para gerar bio-óleo através de pirólise rápida em reator de leito fluidizado. A percentagem de bio-óleo produzida está vinculada a temperatura de pirólise, que é indiretamente controlada pela temperatura do leito. Este estudo mostra através de ferramentas estatísticas, como regressão múltipla e planejamento experimental, que dentre a altura e granulometria do leito e a temperatura do gás de aquecimento, esta última é quem gera interferência mais significativa na temperatura de pirólise e, portanto merece maior atenção.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui grande domínio da produção mundial de sisal sendo a região nordeste, em especial a Bahia, o maior centro do seu cultivo e produção de seus derivados. É importante esclarecer que a parcela da fibra de sisal utilizada apresenta um rendimento irrisório para pequenos produtores e o retorno econômico associado a sua exploração vem apresentando decaimento. A fim de gerar alternativa para uso do sisal há estudos sobre a produção de bio-óleo a partir desta planta visando unir o potencial natural do país, a inovação tecnológica e mudanças socioeconômicas positivas que podem ser geradas.

A utilização de biomassa na geração de energia e produtos é vantajosa e relevante por tratar-se de um recurso vegetal, renovável e que, de acordo com Gomes (2002), promove diminuição da emissão de produtos ambientalmente nocivos. Seu uso promove a geração de energia limpa e um dos principais produtos é o bio-óleo. Este último é composto por diversos grupos orgânicos e varia de acordo com o tipo de vegetal utilizado como matéria-prima. Além disso, a percentagem mássica gerada a cada processo varia com a condição térmica na qual ocorre o consumo de biomassa, denominada temperatura de pirólise. A utilização da conversão termoquímica da biomassa (pirólise) para produção de combustíveis e produtos que possibilitam agregação de valor ao sisal podem gerar inúmeros benefícios. A pirólise ocorre na ausência de

oxigênio, promovendo a quebra de cadeias orgânicas longas gerando compostos de cadeias menores, conforme Costa (2006), seus produtos encontram-se em estado sólido, líquido e gasoso, sendo estes o carvão vegetal, bio-óleo, e uma mistura de gases de pirólise (CO, CO<sub>2</sub> e hidrocarbonetos leves), respectivamente. A temperatura na qual ocorrerá a reação, temperatura de pirólise, pode variar na faixa de 400 -800 (°C) sendo esta temperatura quem definirá o estado físico da maior parcela obtida ao final do processo, como mostrado em Almeida (2008).

A maior percentagem de líquido é obtida no processo de pirólise rápida que ocorre a temperaturas moderadas e baixo tempo de residência dos gases, segundo Bridgwater (2003). A eficiência do processo pirolítico está relacionada, dentre outras variáveis, à alta taxa de aquecimento e transferência de calor, controle da temperatura de reação e baixo tempo de residência dos vapores. Estudos mostram que, para este tipo de transformação termoquímica, o reator de leito fluidizado é o mais empregado devido ao rendimento mais satisfatório.

Como exposto por Pérez (2004), no reator de leito fluidizado há a passagem de um fluido através de uma coluna de sólidos (geralmente granulada). Este fluido atinge a base da coluna sólida com determinada pressão a qual deve possibilitar a suspensão das partículas dando ao sólido uma aparência fluidizada. A fim de uniformizar o fluxo de gás no reator é necessário o uso de um distribuidor (placa com pequenos orifícios). Para que a fluidização do leito (material sólido) ocorra é necessário uma pressão mínima que permita o equilíbrio entre a fase sólida e o fluido, nesta pressão o fluido possui determinada velocidade denominada como velocidade de mínima fluidização. Ao ultrapassar a mesma o leito se expande já que encontra-se fluidizado apresentando maior contato entre as duas fases.

Para o reator de leito fluidizado notou-se através de observações experimentais diárias que a granulometria do leito, a sua altura e a temperatura do gás de aquecimento são variáveis que podem influenciar na temperatura em que o leito é estabilizado precedente à pirólise. Analisar estas variáveis permite entender quais destas são mais pertinentes quanto a influencia sobre a variável resposta (temperatura do leito).

O objetivo deste trabalho experimental é estudar as variáveis acima citadas a fim de conhecer qual delas exerce influência mais significativa sobre a temperatura do leito e, em seguida, estabelecer a melhor condição operacional compatível com a estrutura disponível em planta piloto e às condições teóricas que resultem numa melhor produção.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### **2.1 Processo**

Os dados para a análise foram coletados da planta de pirólise rápida para produção de bio-óleo, constituída de um sistema de aquecimento, destacada pela seção vermelha da Figura 1, utilizando um forno, injeção de biomassa com o auxílio de uma rosca automatizada no painel de controle para rotação de 20 rpm, transformação física e química realizada no interior do reator de

leito fluidizado além do sistema de coleta e análise realizado pelos silos, condensadores e cromatógrafos.

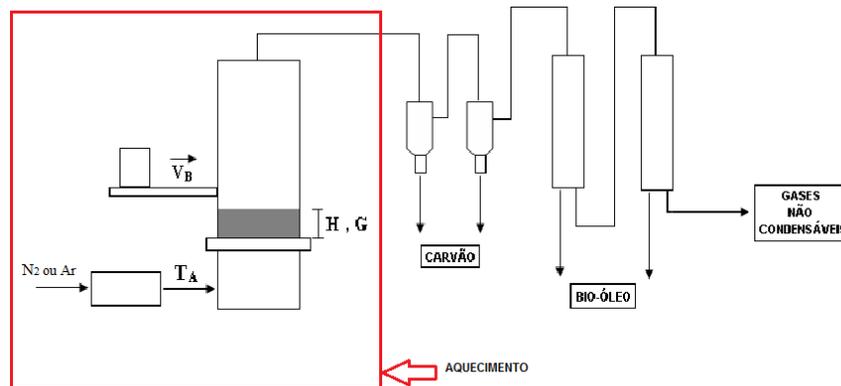


Figura 1 – Fluxograma geral da planta piloto com destaque do sistema de aquecimento

O sistema de aquecimento, de maior relevância para este estudo, é constituído de um forno aquecedor no qual um fluido ( $N_2$  na ocorrência de pirólise ou Ar na ausência de pirólise) com vazão de entrada contínua a  $15 \text{ Nm}^3/\text{h}$  no reator transfere energia para o leito após ter a sua temperatura elevada entre  $823,15 \text{ K}$  e  $923,15 \text{ K}$  ( $T_A$ ). Foi empregado um controlador de temperatura o qual teve seu *set point* ajustado para  $758,15 \text{ K}$  ou  $923,15 \text{ K}$  de acordo com o ensaio realizado. O aquecedor utilizado, com potência de  $3,5 \text{ Kw}$  e amperagem de  $3,5 \text{ A}$ , diâmetro interno de  $7,0 \times 10^{-2} \text{ m}$  e comprimento de  $1,30 \text{ m}$  é disposto horizontalmente com saída localizada próximo ao reator a fim de evitar perdas de energia. Devido a perdas de energia há uma variação negativa entre a temperatura ajustada como *set point* e a temperatura que o gás atinge a base do reator, em média de  $-399,15 \text{ K}$ . A energia é então transferida ao leito cuja altura era de  $2,5 \text{ cm}$  ( $H_1$ ) ou  $5 \text{ cm}$  ( $H_2$ ). A granulometria do leito foi determinada utilizando peneiras de separação, sendo selecionados apenas os grãos com diâmetro de  $4,25 \times 10^{-4} \text{ m}$  e  $6,00 \times 10^{-4} \text{ m}$ . O reator é de aço inox, possui  $8,1 \times 10^{-1} \text{ m}$  de altura e  $10^{-1} \text{ m}$  de diâmetro.

## 2.2 Análise Estatística

Foi utilizada uma ferramenta estatística denominada Planejamento de Experimentos a fim de analisar conjuntamente as variáveis de interesse. Esta ferramenta possibilita o estudo da combinação dos efeitos das variáveis independentes, além de conferir maior confiabilidade ao experimento de acordo com Montgomery, Runger (2012). Foram adotados níveis (máximo e mínimo) de fatores (variáveis) a serem avaliados e o número de testes resultou nas combinações entre níveis e fatores estabelecidos ( $2^3$ ).

Dentre todas as variáveis da planta em questão, apenas três foram selecionadas para análise sendo elas a granulometria e altura do leito e temperatura de *set point*. A regressão

múltipla e o planejamento experimental utilizado permitiram a investigação e geração de um modelo de correlação entre variáveis que se deseja estudar como previsto por Araújo (2008) e Montgomery (2004). Na investigação da correlação foi feita a análise gráfica e estatística dos dados a fim de descrevê-los e prever a temperatura do leito através de uma equação que correlacione as variáveis.

## 2.3 Procedimento experimental

No reator, foi injetada uma quantidade específica de areia (leito) com granulometria conhecida através do peneiramento de forma que atendessem às especificações de altura do leito de cada ensaio. Então, a temperatura da resistência foi programada no sistema de controle e ativada para iniciar o aquecimento através do gás proveniente do forno. Devido à alta temperatura e a taxa de aquecimento suportada pela resistência, foram necessárias cerca de 3 h até que a temperatura do leito atingisse regime estacionário e tivesse sua temperatura estabilizada. Com a estabilização da temperatura, a mesma foi registrada para posterior análise de dados.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 1 são apresentadas as variáveis que causam interferência sobre a temperatura do leito estudada, denominadas como variáveis manipuladas. A variável resposta corresponde à temperatura do leito quando o processo de aquecimento atinge seu primeiro equilíbrio. A altura é codificada como 1H e 2H sendo que sua altura correspondente foi de  $2,5 \cdot 10^{-2}$  m e  $5,0 \cdot 10^{-2}$  m. A granulometria da areia foi de  $4,25 \cdot 10^{-4}$  m e  $6,00 \cdot 10^{-4}$  m, correspondendo às peneiras de 40 e 30 mesh, respectivamente.

Tabela 1 – Resultados Experimentais realizados em planta piloto de pirólise

| Nº do Experimento | Variáveis Manipuladas |                              |                    | Variável Resposta        |
|-------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------|--------------------------|
|                   | Altura (H)            | Granulometria ( $10^{-4}$ m) | Temperatura SP (K) | Temperatura do Leito (K) |
| 1                 | 1                     | 4,25                         | 758,15             | 673,15                   |
| 2                 | 2                     | 4,25                         | 758,15             | 644,15                   |
| 3                 | 1                     | 6,00                         | 758,15             | 663,15                   |
| 4                 | 2                     | 6,00                         | 758,15             | 649,15                   |
| 5                 | 1                     | 4,25                         | 923,15             | 767,15                   |
| 6                 | 2                     | 4,25                         | 923,15             | 773,15                   |
| 7                 | 1                     | 6,00                         | 923,15             | 795,15                   |
| 8                 | 2                     | 6,00                         | 923,15             | 765,15                   |
| 9                 | 1                     | 4,25                         | 758,15             | 658,15                   |
| 10                | 2                     | 4,25                         | 758,15             | 644,15                   |
| 11                | 1                     | 6,00                         | 758,15             | 660,15                   |
| 12                | 2                     | 6,00                         | 758,15             | 657,15                   |
| 13                | 1                     | 4,25                         | 923,15             | 767,15                   |
| 14                | 2                     | 4,25                         | 923,15             | 758,15                   |
| 15                | 1                     | 6,00                         | 923,15             | 788,15                   |
| 16                | 2                     | 6,00                         | 923,15             | 760,15                   |

Utilizando os dados acima, a análise estatística anteriormente citada foi aplicada a fim de quantificarmos a relação entre variáveis. Através da análise do p-valor, pode-se entender o quanto a variável é significativa na predição da variável de saída. Para o intervalo de 95% de confiança, as variáveis significativas foram identificadas quando p-valor < 0,05.

Tabela 2 – Matriz de correlação dos dados

|                               | Efeitos        | Desvio Padrão  | p -valor       | - 95,00%        | 95,00%         | Coefficiente   | Desvio Padrão  | -95,00%         | 95,00%         |
|-------------------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|
| <b>Mean/Interc.</b>           | 440,8125       | 2,21824        | 0,00000        | 435,7945        | 445,8305       | 440,8125       | 2,21824        | 435,7945        | 445,8305       |
| <b>(1)Altura (H)</b>          | <b>-15,125</b> | <b>4,43647</b> | <b>0,00776</b> | <b>-25,1615</b> | <b>-5,0895</b> | <b>-7,5625</b> | <b>2,21824</b> | <b>-12,5805</b> | <b>-2,5445</b> |
| <b>(2)Granulometria (um)</b>  | 6,625          | 4,43647        | 0,16956        | -3,411          | 16,661         | 3,3125         | 2,21824        | -1,7055         | 8,3305         |
| <b>(3)Temperatura SP (°C)</b> | <b>115,625</b> | <b>4,43647</b> | <b>0,00000</b> | <b>105,589</b>  | <b>125,661</b> | <b>57,8125</b> | <b>2,21824</b> | <b>52,7945</b>  | <b>62,8305</b> |
| <b>1 by 2</b>                 | -3,625         | 4,43647        | 0,43497        | -13,661         | 6,411          | -1,8125        | 2,21824        | -6,8305         | 3,2055         |
| <b>1 by 3</b>                 | -0,125         | 4,43647        | 0,97814        | -10,161         | 9,911          | -0,0625        | 2,21824        | -5,0805         | 4,9555         |
| <b>2 by 3</b>                 | 4,125          | 4,43647        | 0,37674        | -5,911          | 14,161         | 2,0625         | 2,21824        | -2,9555         | 7,0805         |

Partindo do critério de p-valor e analisando os dados da Tabela 2, notamos que as variáveis com maiores chances de exercer influência significativa sobre a temperatura da areia são a altura do leito e a temperatura do SP, considerando p-valor < 0,05. Por outro lado, a granulometria e a interação de primeira ordem entre as variáveis manipuladas não aparentam exercer influência sobre a variável de saída. Isso mostra que é possível predizer a temperatura do leito correlacionando individualmente a sua altura ou a temperatura do SP. Como esta última possui p-valor  $\cong 0$  possivelmente, seu efeito sobre a variável de saída é ainda mais pertinente. Os efeitos pontuais e individuais também são observados na matriz de correlação e estes mostram que uma mudança do nível mais baixo para o nível mais alto da temperatura do SP, por exemplo, gera um efeito positivo significativo sobre a temperatura do leito, isto é, o aumento da temperatura do SP tende a aumentar a sua temperatura quando fixamos as demais variáveis, como visto no gráfico da Figura 1. Um efeito contrário ocorre com a altura do leito já que a mesma mudança de nível gera um efeito negativo sobre a temperatura do leito e, por isso, trabalhar com níveis mais baixos de altura favorece o aumento da temperatura da areia como mostrado no gráfico da Figura 2.

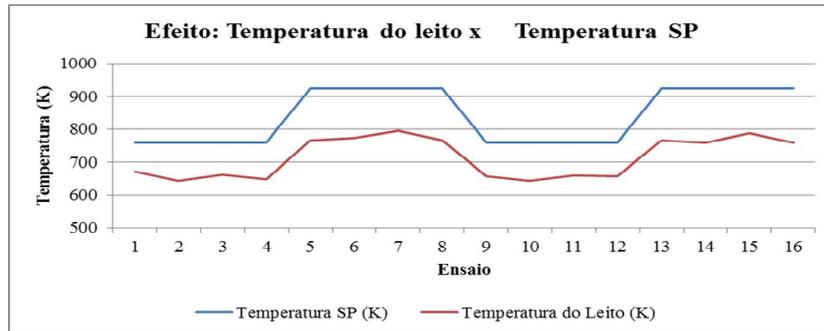


Figura 2 - Efeito da temperatura do SP sobre a temperatura do leito

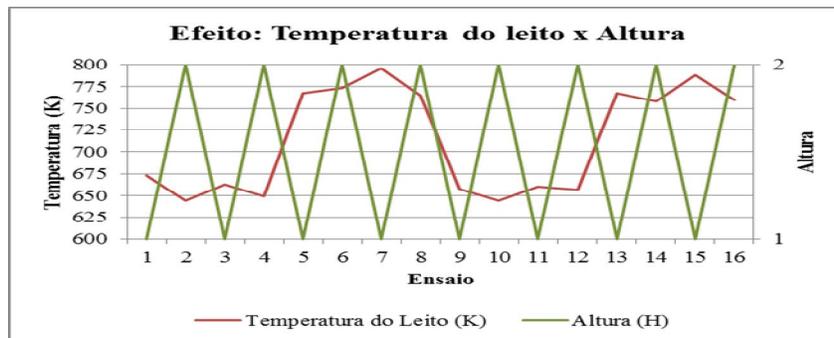


Figura 3 – Efeito da altura do leito sobre a temperatura do leito

Como sugerido por Montgomery, Runger e Hubele (2004), as suposições de normalidade para o planejamento experimental aplicado foram verificadas através das análises destes resíduos a fim de conferir a normalidade das observações, verificação de independência dos erros através da análise de variância etc. O gráfico da Figura 4 mostra essa análise através da distribuição dos resíduos ao longo da coleta de dados.

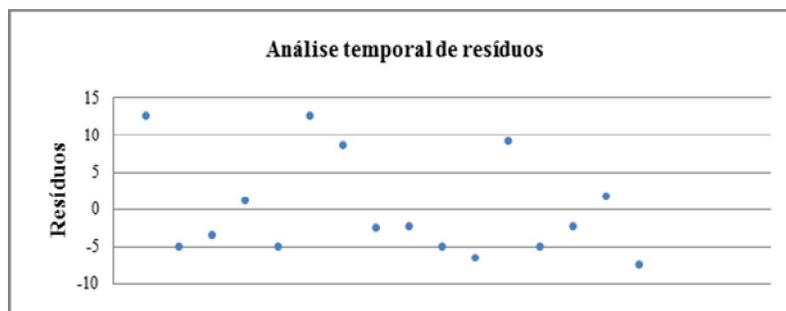


Figura 4 – Distribuição temporal dos resíduos

Nota-se que os resíduos se organizam em torno de uma média zero sem apresentar um comportamento especial ou tendencioso, indicando a validade das suposições de independência e consequentemente a validade das inferências realizadas por meio da análise de variância. A Figura 4 mostra também que os resíduos possuem média nula e variância constante.

Além disso, é possível verificar no gráfico da Figura 5 que os resíduos possuem distribuição normal já que seus valores seguem uma tendência linear (em torno de uma reta). Isso mostra que o uso da regressão pode ser feito para ajuste de modelo.

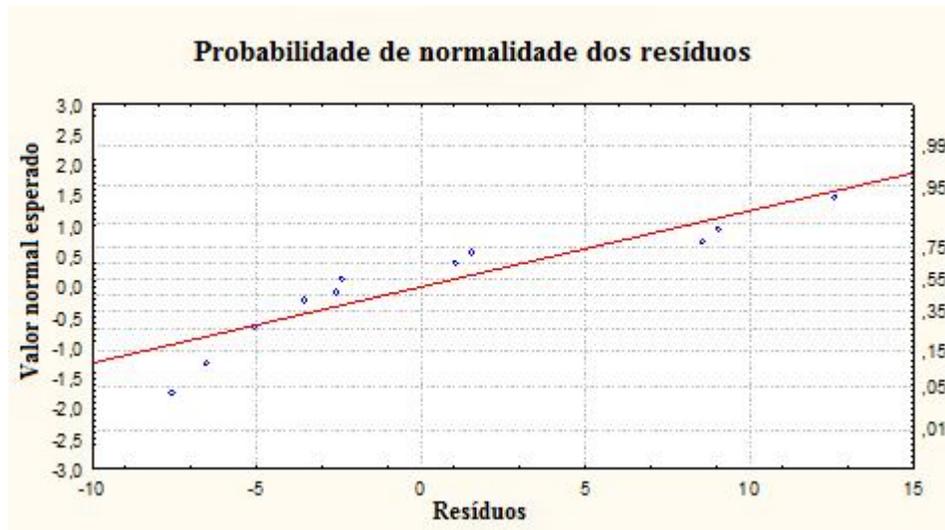


Figura 5 – Gráfico de probabilidade dos resíduos

Considerando a análise de dados e a relevância do modelo a partir da análise de resíduos, foi gerada a equação do modelo para predição da temperatura do leito, considerando as variáveis independentes abordadas.

$$T_L = 96,38 + 6,97 A - 0,06 G + 0,56 T_{SP} - 0,04 A \times G - 0,001 A \times T_{SP}$$

$T_L$  → Temperatura do leito

$A$  → Altura do leito

$G$  → Granulometria da areia

$T_{SP}$  → Temperatura do *Set Point*

#### 4. CONCLUSÃO

Através da análise de dados acima foi possível estimar qual das variáveis que envolvem o aquecimento do leito do reator de pirólise rápida exerce influência mais significativa em seu valor e na sua predição. Utilizando ferramentas estatística e gráficas percebeu-se que a temperatura SP e altura do leito exercem influência sobre a temperatura do leito. Porém, considerando os efeitos, notou-se que a temperatura SP exerce influência ainda mais significativa e relevante estimulando desta forma, que a mesma atraia maiores atenções no controle da temperatura de pirólise influenciada pela temperatura do leito (variável de saída). De acordo com a análise de resíduos, notou-se que o modelo é significativo e relevante, podendo tornar-se ainda melhor com a coleta de um maior número de dados.

Com o objetivo de tornar a operação do processo cada vez melhor, será importante reavaliar a malha de controle do sistema de aquecimento de gás, a fim de tornar mais eficiente a determinação da temperatura do leito. Além disso, investir no isolamento da linha que une o forno à base do reator e determinar a velocidade de fluidização ideal que permita o melhor contato gás-sólido são ações que podem ser tomadas a fim de melhorar ainda mais o processo.

## **5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Almeida M., Bio-óleo a partir da pirólise rápida, térmica ou catalítica, da palha da cana-de-açúcar e seu co-processamento com gasóleo em craqueamento catalítico, p. 09-13, 2008.

Araújo J. , A influência da adição de caulim, quartzo e feldspato potássico na formulação de massas cerâmicas para telhas: Modelo Estatístico, p. 24, 2008.

Costa P., Produção de Hidrocarbonetos Líquidos e Gasosos por Pirólise de Resíduos Plásticos, p. 26 e 27, 2006.

Gómez E, Estudo da Pirólise Rápida de Capim Elefante em Leito Fluidizado Borbulhante Mediante Caracterização dos Finos de Carvão, p. 13-16, 2002.

MONTGOMERY. D; RUNGER G.; HUBELE N., *Estatística Aplicada a Engenharia*, Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004.

MONTGOMERY D. RUNGER G.; *Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros*, Rio de Janeiro , Editora LTC, 2012.

Pérez J., Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização, p. 35-40, 2004.