

ESTUDO DA DECOMPOSIÇÃO TÉRMICA DO BAGAÇO DE CANA DE AÇÚCAR EM UM FORNO ELÉTRICO ROTATIVO

Emerson Freitas Jaguaribe.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil
ejaguaribe@uol.com.br

Roberto Montargil Rocha.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil
robmontargil@yahoo.com.br

Glauco Demóclito Tavares de Barros.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil
barrosgla@yahoo.com.br

Marcos A. R. Andrade.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil
marcosandradedr@ibest.com.br

Fábio B. Ferraz.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil
fabioferrazms@bol.com.br

Evaldo Torres do Nascimento.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil
evaldo.torres@bol.com.br

Resumo. *A diminuição das reservas dos combustíveis fósseis, e os resultados negativos do seu uso, como o efeito estufa e a chuva ácida, terminam por eleger a biomassa como uma alternativa energética. A biomassa apresenta vantagens em relação aos combustíveis fósseis como emissões de poluentes em baixos níveis, sendo em muitas ocasiões, dado o seu alto valor energético, usada na conversão em biogás e carvão. A tecnologia mais empregada com esse objetivo é a pirólise. Sabe-se, ainda, que nessa transformação de produtos sólidos e gasosos, existe uma série de parâmetros que podem afetar o rendimento do processo tais como: razão de aquecimento e cinéticas de reação de decomposição. Este trabalho visa investigar o efeito e o controle desses parâmetros a partir do estudo do processo de pirólise do bagaço de cana de açúcar em um forno rotativo cilíndrico. Constatou-se que quando o forno é programado com uma razão de aquecimento igual a 10 °C/min, a temperatura, no seio da biomassa, varia ao longo do tempo, chegando a espelhar outra razão de aquecimento, da ordem de 62,5 °C/min. Examinando-se as curvas experimentais obtidas, verifica-se que esse efeito pode levar a uma redução do tempo de pirólise e a uma economia de energia.*

Palavra-chave: *Pirólise, Decomposição Térmica, Bagaço de cana, Transferência de Calor.*

1. INTRODUÇÃO.

A biomassa, através de seu uso racional e sustentável, é um atraente recurso energético pelo fato de ser uma fonte renovável, de baixo custo e de grande produção doméstica (Rocha, 2003). Ela tem sido considerada como uma reserva potencial de combustível para opções de queima em geração de energia, pois contém em sua estrutura, materiais lignocelulósicos, tais como a holocelulose, composta de celulose e hemicelulose, a lignina e componentes extrativos (orgânicos e inorgânicos). Por isso, alguns combustíveis de biomassa, oriundos de podas de árvore, raspas de madeira, palha de trigo, turfa, etc., estão sendo, atualmente, considerados como uma alternativa na redução de emissão de CO₂ e de outros poluentes como NO_x (Mansaray et al., 1999; Nassar, 1999). A generalização de uma tal política de substituição permitirá que haja uma redução de até 97% na emissão de CO₂, Rocha (2003).

A conversão termoquímica da biomassa por pirólise e gaseificação está se tornando um dos processos mais requisitados de produção eficiente de combustíveis em aplicações comerciais e industriais para geração de energia em indústrias (Vuthaluru, 2004).

A pirólise, definida como a degradação térmica do material na ausência de oxigênio, gera como produto: o gás combustível, os produtos líquidos (alcatrão e ácido piro-lenhoso) e uma substância carbonosa que pode ser convertida em carvão ativado (Jaguaribe et al., 2003). Em particular, o combustível líquido da pirólise de biomassa, chamado bio-óleo, vem se destacando como um dos principais produtos no suprimento de energia, oferecendo, do ponto de vista energético, muitas vantagens quando comparado à biomassa in natura. Wang et al (2003).

As proporções relativas dos produtos gerados na pirólise (gás, líquidos e carvão) dependem dos parâmetros da reação, da razão de aquecimento, do tipo de biomassa a ser tratado, do método de pirólise empregado e da quantidade de material entre outros Willard et al.). Além do mais, o controle de todo o processo, não é tarefa de fácil consecução, com se mostra neste estudo sobre a pirólise do bagaço de cana de açúcar realizada em um forno rotativo cilíndrico.

2. MATERIAIS E MÉTODOS.

2.1 Matéria-prima.

A matéria-prima utilizada foi o bagaço de cana de açúcar proveniente da Agroindústria Japungu S. A., sito em Santa Rita-PB. Essa biomassa é um sub-produto sólido oriundo da extração do caldo de cana de açúcar em usinas, ou destilarias na produção de álcool etílico, ou de açúcar.

2.2 Equipamentos.

2.2.1 O Forno Elétrico Rotativo.

O forno elétrico rotativo da CHINO, usado nos experimentos relacionados com a pirólise, possui marca e modelo TAKABAYASHI RICA e RS-S, respectivamente. Ele dispõe de um reator tubular de leito fixo, de dimensões 93 mm, de diâmetro interno, e comprimento 900 mm, ver Figura 1, sendo o aquecimento promovido por três conjuntos de resistências, em série, dispostos em uma estrutura cilíndrica de comprimento longitudinal igual a 700 mm. Este forno permite o estabelecimento de programas, onde razão de aquecimento e temperaturas limites podem ser fixadas.



Figura 1. Forno Elétrico Rotativo.

2.2.2 Termopares.

A cada conjunto de resistência do forno elétrico está associado um termopar tipo K. As temperaturas desses termopares são lidas através de visores com agulha e escala, ou de gráficos gerados por um plotter, todos dispostos no painel de controle do forno. Um outro termopar, do tipo K e com terminal (sensor encapsulado), está disponível para ser usado no centro do reator.

2.2.3 As Cápsulas Porta-amostra.

As cápsulas porta-amostras foram preparadas com tubos de ferro, os quais foram fechados por interferência, em uma de suas extremidades, por tampas de mesmo material. O diâmetro interno e o comprimento final das cápsulas foram 48 mm e 140 mm, respectivamente. Seu peso variou de 250 a 270 g, conforme mostrado na Figura 2.



Figura 2. Cápsulas porta-amostra.

2.2.4 Amostras para o Forno Rotativo.

Dois tipos de amostra foram considerados no estudo da pirólise no forno. Tipo 1: formado por 30 g de bagaço, in natura, sem secagem; Tipo 2: amostra contendo 30 g de biomassa com 8 e 10% de redução da massa inicial, tendo em vista a redução da umidade, por secagem, semelhantemente ao que se observou nas curvas advindas da Análise Termogravimétrica (TGA), na temperatura de 140 °C.

2.2.5 Temperatura da Amostra.

Na obtenção das curvas de decomposição térmica, seja ela em fornos industriais ou em laboratoriais, é fundamental se manter o controle da temperatura e das razões de aquecimento, bem como de outros parâmetros relacionados com a amostra, tais como quantidade de massa e cinética de reação (Córdex et al, 1997; Wendlandt et al, 1986; Keattch, et al 1975), para que se obtenha os resultados pretendidos. Com o intuito de se aumentar esse controle, instalou-se um termopar tipo K no centro da cápsula porta-amostra, ver Figura 3, para avaliar a temperatura instantânea da biomassa, durante o processo de aquecimento. O monitoramento da temperatura foi iniciado a partir da temperatura ambiente. O término ocorria quando a temperatura desse termopar atingia os 500 °C. O forno, então, era desligado, aberto, e resfriado, com o auxílio de um ventilador. O registro das temperaturas no centro da cápsula era feito com o uso do Micrologger 21X.

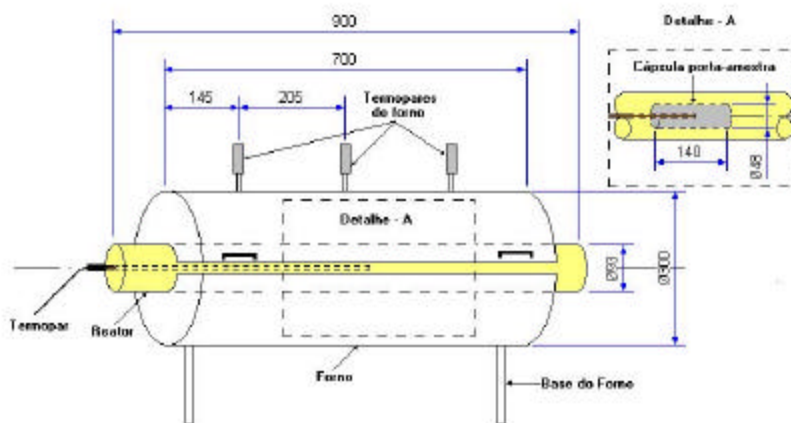


Figura 3. Detalhe do Termopar K no centro do porta-amostra (dimensão mm).

2.2.6 Curva de Decomposição Térmica do Forno.

Dispondo-se de oito cápsulas devidamente carregadas, e utilizando-se uma por vez no reator do forno rotativo, dava-se partida ao processo de aquecimento, tendo-se como referência à temperatura medida na região central da biomassa. Para conseguir o primeiro ponto da curva, o forno era desligado quando a temperatura da biomassa atingia 140 °C. Quando o forno atingia, no resfriamento os 100 °C (no centro da biomassa), a amostra era retirada e levada para pesagem, quando se registrava apenas o peso, da biomassa decomposta termicamente. Resfriado o forno à temperatura ambiente, uma segunda cápsula era recolocada no reator, que era aquecido, e posteriormente desligado quando a temperatura da biomassa registrava 190 °C. O procedimento de resfriamento, retirada e pesagem, nesse caso, foi o mesmo adotado para a temperatura de 140 °C. Deste modo, e considerando as temperaturas de 240, 290, 340, 390, 440 e 500 °C, levantou-se a

curva de degradação térmica do bagaço submetido a um processo de pirólise. Para tanto, levou-se, ainda, em conta uma programação que foi utilizada em todos os levantamentos dessas curvas de decomposição, compostas das seguintes ações sequenciais:

- Aquecimento do forno na razão de $10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, por um período de 30 minutos;
- Manutenção da temperatura constante durante 10 minutos;
- Aquecimento, durante 8 minutos numa razão de $7,1\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, até a temperatura de $357\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- Aquecimento na razão de $8,4\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ até a temperatura de $416\text{ }^{\circ}\text{C}$, em um tempo de 7 minutos;
- Aquecimento no tempo de 10 minutos com razão de $10,4\text{ }^{\circ}\text{C/min}$.

Essas ações garantiram razões de aquecimento no centro da amostra, próximas a $7,5\text{ }^{\circ}\text{C/min}$, já que quando se mantinha uma taxa constante programada no forno rotativo, durante todo o processo, a amostra registrava razões de aquecimento muito elevadas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.

3.1 Evolução Transiente da Temperatura.

A Figura 4 apresenta três distribuições de temperatura. A primeira delas, ou seja, a linha reta, representa a distribuição de temperatura da resistência elétrica do forno, enquanto as outras duas curvas provieram dos dados obtidos considerando o procedimento descrito na seção 2.2.5.

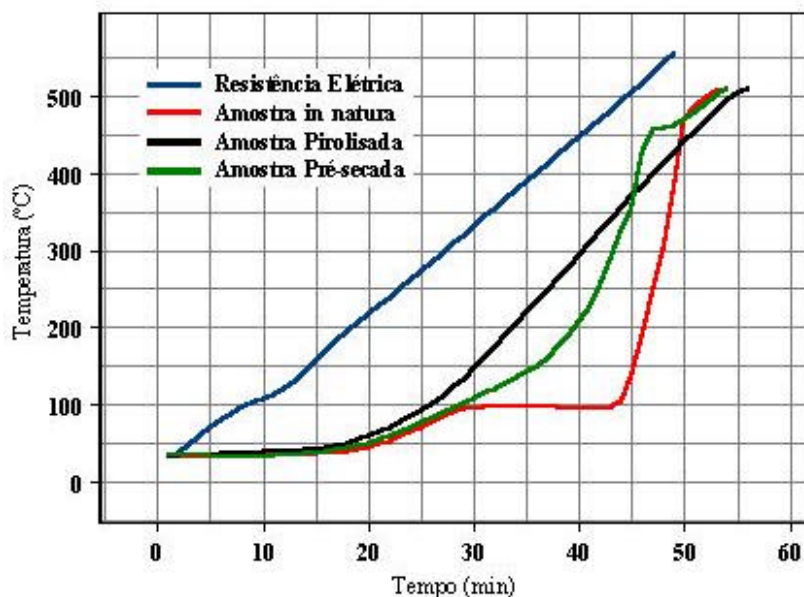


Figura 4. Perfil de temperatura para uma amostra de bagaço in natura, pré-secada e pirolisada.

Analisando-se o comportamento da curva para o bagaço in natura, percebe-se que durante os 15 minutos iniciais praticamente não houve alteração na temperatura. Isso é causado pela inércia térmica e pelas baixas condutividades oferecidas pelo ar existente entre a cápsula e as paredes do reator e do próprio bagaço. A partir daí, e durante 10 minutos, registra-se a chegada de uma frente

de calor que mantém uma razão de aquecimento constante (aproximadamente 6 °C/min) fazendo a temperatura da amostra atingir 100 °C. Nos 14 minutos seguintes, verifica-se na Fig. 4, que a temperatura central da biomassa permanece constante, indicando ser a região de evaporação da água. Na sequência constata-se um aumento rápido da temperatura do bagaço, elevando-a, rapidamente, de 100 a 475 °C, com uma razão de aquecimento constante e próxima de 62,5 °C/min. Nesse lapso de tempo ocorreram às cinéticas de reação da holocelulose e da lignina. (Vale ressaltar que durante essa mudança brusca manteve-se a razão de aquecimento do forno constante, e igual a 10 °C/min.). Em seguida, observa-se que a curva apresenta uma declividade muito semelhante àquela da temperatura das resistências elétricas do forno rotativo, curva azul na Fig. 4, com a razão de aquecimento próxima de 10 °C/min. De fato, isso já era esperado, uma vez que as cinéticas de reação de degradação da biomassa cessaram, servindo a massa pirolisada apenas para conduzir o calor, que continua sendo irradiado pelas resistências elétricas.

Com o objetivo de averiguar se de fato o primeiro patamar da curva correspondia ao fenômeno da evaporação, utilizou-se a estufa para aquecer um porta-amostra com biomassa in natura por 30 minutos, na temperatura de 140 °C, eliminando, assim, toda a sua umidade. Levando-se esse porta-amostra ao forno, repetiu-se o procedimento anterior, que gerou a curva verde encontrada na Fig. 4. Ao analisar esta curva na cor verde, percebe-se, claramente, uma superposição entre ela e a da biomassa in natura nos 30 primeiros minutos. Todavia, verifica-se que o patamar na curva de biomassa in natura, percorrido no intervalo de tempo entre 30 e 45 minutos não mais existe para a amostra pré-secada, em função da ausência de água a ser evaporada. Identifica-se, ainda, através das duas inclinações na curva da Fig. 4, as duas cinéticas de reação de decomposição da holocelulose e depois da lignina, para em seguida, após os 450 °C, se identificar outra superposição com a curva do bagaço in natura, com declividade próxima a 10 °C/min.

A Figura 4 mostra, ainda, a curva de cor negra, que representa o perfil de temperatura para uma amostra pirolisada. Um rápido exame dessa curva ressalta a superposição dela com as outras duas até os primeiros 20 minutos. Entre os 20 e 30 minutos, há um ligeiro afastamento no seu trajeto com relação àquele advindo da curva de biomassa pré-secada na estufa. Isto se dá em consequência do carvão apresentar um coeficiente de condutividade térmica, 0,056 W/(m.K), um pouco maior do que o do bagaço pré-secado, 0,05 W/(m.K). A ausência das cinéticas de reação na biomassa fez reproduzir a declividade da curva correspondente às resistências elétricas.

3.2. Decomposição Térmica do Bagaço no Forno Rotativo.

As Figuras 5 e 6 mostram as curvas de decomposição térmica para a biomassa pré-secada com 8% de perda de massa inicial e a outra com 10%, em função do tempo e da temperatura, respectivamente. Ao se examinar a Figura 5, nota-se que o programa proposto no item 2.2.6 produziu curvas de termo-degradação próximas de 7,5 °C/min; e analisando-se mais detalhadamente essa figura, verifica-se que as perdas de massa para as amostras de 8 e 10% têm seu início no tempo de 2300 e 2180 segundos, respectivamente.

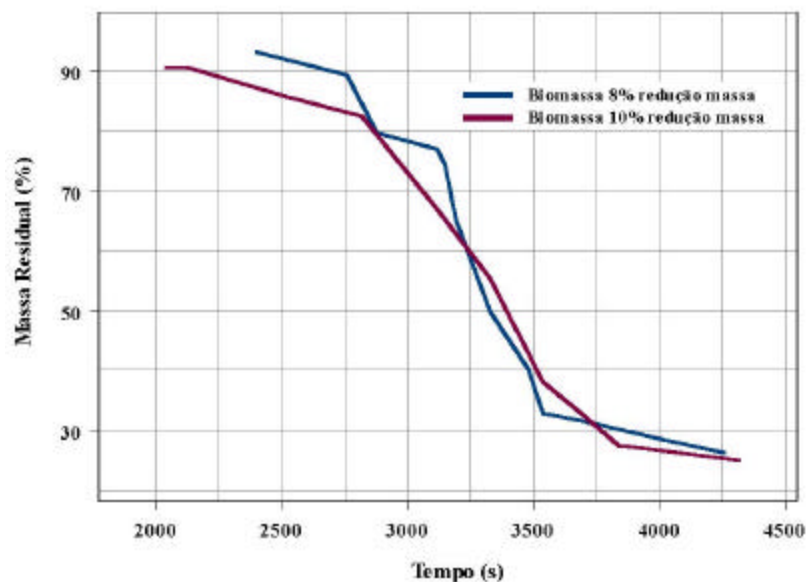


Figura 5. Curvas de degradação térmica, no tempo, do bagaço de cana para as amostras de 8 e 10%.

Ao se analisar a Figura 6, constata-se que, na temperatura de 140 °C, há uma flagrante perda de massa para as biomassas com 8% e 10% de redução mássica. Os valores correspondem, respectivamente, a 10,8 e 17,5 % de perda de massa em relação à massa inicial. Após esta linha bem definida de perda de massa, inicia-se uma outra com perda mais acelerada, que nos dois casos (8 e 10%), parecem corresponder à decomposição da holocelulose nas curvas termogravimétricas.

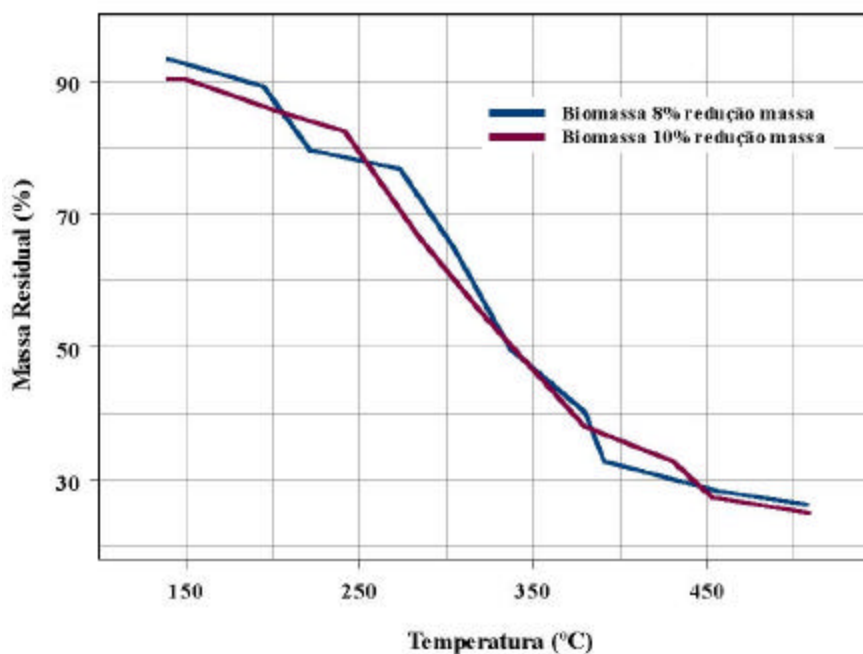


Figura 6. Curvas de degradação térmica, em função da temperatura, do bagaço de cana para as amostra de 8 e 10%.

Na continuação, observa-se o surgimento de mais duas inclinações, as quais representam as regiões de degradação da holocelulose e da lignina, respectivamente. Os percentuais finais de perda de massa para as curvas de 8 e 10% na temperatura de 500 °C, situaram-se em torno de 25 % em relação à massa original, correspondendo, de fato, ao processo de pirólise.

4. CONCLUSÃO.

Várias variáveis estão envolvidas na análise de decomposição térmica de um material, que podem ser, entre outras, o tamanho e a uniformidade das partículas, a densidade da amostra, frente de transmissão de calor no forno, ou no reator, a quantidade da amostra, as cinéticas de reação, a condutividade térmica do material de amostra, etc., que, em geral, não são fáceis de controlar. Dentre essas variáveis, a quantidade da amostra e as cinéticas de reação da holocelulose e da lignina, provocaram um aumento significativo na razão de aquecimento, elevando-a até 62,5 °C/min quando o forno era aquecido a uma razão de 10 °C/min.

Também se constatou que para se reproduzir à curva de decomposição térmica do bagaço de cana de açúcar em forno laboratorial, ou industrial, programas especiais, como esse detalhado no item 2.2.6, têm que ser empregados.

Além disso, notou-se que a decomposição total da biomassa, obtida no forno rotativo, foi pirolisada em 460 °C, diferenciando um pouco do valor estabelecido em literatura, que é 500 °C. Essa diferença de 40 °C pode significar um ganho energético expressivo, já que seria necessária menos energia para pirolisar a biomassa. Portanto, a pirólise de decomposição da biomassa, em fornos laboratoriais e industriais, deve ser processada com rigor analítico, para que não haja desperdício de energia com conseqüentemente prejuízo financeiro.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

Rocha, R. M., 2003 “Evidências da comparação entre resultados de uma balança termogravimétrica e de um forno rotativo”, dissertação defendida pela Universidade Federal da Paraíba - UFPB.

Mansaray, K.G., Ghaly, A.E., 1999, “Kinetics of the thermal degradation of rice husks in nitrogen atmosphere”. *Energy Sources* 21, pp. 773 – 784.

Nassar, M.N., 1999. “Thermal analysis of kinetics of Bagasse and Rice Straw”. *Energy Sources* 21, pp. 131 – 137.

Vuthaluru, H.B., 2004 “Investigations into the pyrolytic behaviour of coal/biomass blends using thermogravimetric analysis”, *Bioresource Technology* 92 pp. 187 – 195.

Jaguaribe, E. F.; Rocha, R. M.; Barros, G. D. T.; Andrade, M. A. R.; Souza, W. L., 2003 “Comparing Thermogravimetric Results With A Rotary Kiln Experimental Data Of Sugarcane Bagasse Pyrolysis”, 17^o International Congress of Mechanical Engineering – COBEM, ID - 1538.

Wang, S.; Liao, Y.; Zhou, J.; Gu, Y.; Cen, K.; Luo, Z., 2003, “Research on biomass fast pyrolysis for liquid fuel” *Journal Biomass and Bioenergy*.

Willard, H., Merritt, L. Jr., Dean, J., 1975, “Análise Instrumental”, 2^a ed. Fundação Calouste Gulbenkian. Lisboa, p. 574-586, cap. 17.

Cortex, L. A. B.; Lora, E. S., 1997, “Sistemas Energéticos II – Tecnologias de Conversão Energética da Biomassa”.

Wendlandt, W. W., 1986, “Thermal Analysis” 3^a ed. John Wiley & Sons, v.19.

Keatch, C. J., Dollimore, D., 1975, “In Introduction Thermogravimetry”, 2^a ed., p.60.

STUDY OF THE THERMAL DECOMPOSITION OF THE SUGARCANE BAGASSE IN A ELECTRIC ROTARY KILN

Emerson Freitas Jaguaribe.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil

ejaguaribe@uol.com.br

Roberto Montargil Rocha.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil

robmontargil@yahoo.com.br

Glauco Demóclito Tavares de Barros.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil

barrosgla@yahoo.com.br

Marcos A. R. Andrade.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil

marcosandradedr@ibest.com.br

Fábio B. Ferraz.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil

fabioferrazms@bol.com.br

Evaldo Torres do Nascimento.

DTM/CT Campus I da UFPB – 58059 900 João Pessoa – PB –Brasil

Evaldo.torres@bol.com.br

Abstract. *The instability surrounding world oil supplies and the uncertainty about the existing world fossil fuel reserves, associated with the greenhouse and the acid rain effects, have promoted the biomass as one of the most promising energy alternative. It produces low pollutant emissions and may be converted into biogas, or charcoal. The most common way to undertake this conversion is by pyrolysis, which involves a series of parameters, such as: temperature magnitudes, heating rate, thermal decomposition reactions, and others. The main goal of the present work is to investigate the effect of these variables and parameters on the pyrolysis result, showing how difficult it is to control all the process, examining a sugarcane bagasse pyrolysis, carried over into an electrical rotary kiln. When a fixed 10 °C/min heating rate was settled for the electrical resistance of the rotary kiln, a heating rate of 62.5 °C/min, resulted from the experimental corresponding thermal decomposition curve. The experimental data also showed that the change in the heating rate, led to a decrease in the process time duration, resulting in energy savings.*

Keyword. *Pyrolysis, Thermal Decomposition, Sugarcane Bagasse, Heat Transfer.*