

**Original****Pirólise rápida da mistura do Capim elefante com a palha de cana-de-açúcar (Original)**  
**Fast pyrolysis of the mixture of elephant Capín with straw of cane of sugar (Original)**

Lic. Roberto Alfonso Viltres Rodríguez. M.Sc. Química. Profesor Auxiliar. Departamento de Química. Faculdade de Ciências Agropecuarias. Universidade de Granma. Bayamo. Granma. Cuba. [[rviltres@udg.co.cu](mailto:rviltres@udg.co.cu)] 

Ing. Juan Miguel Mesa. PhD. Profesor Titular. Bioware-Tecnologias de Termo conversão de Biomassa S/C LTDA. Rua Rosini Duarte da Conceição N<sup>o</sup>-76, Cidade Universitária Zeferino Vaz. Barão Geraldo. Brazil. [[jmiguelm@gmail.com](mailto:jmiguelm@gmail.com)]

Lic. Alejandro Alarcón Zayas. M.Sc. Ciencias Agrícolas. PhD. Profesor Titular. Departamento de Química. Faculdade de Ciências Agropecuarias. Universidade de Granma. Bayamo. Granma. Cuba. [[aalarconz@udg.co.cu](mailto:aalarconz@udg.co.cu)] 

**Recibido:** 19/07/2020 | **Aceptado:** 4/12/2020

**Resumo**

Foram realizados testes em diferentes condições de operação do reator de pirólise rápida (PPR-200 BOWARE) para a obtenção de amostras de bio-óleo, água ácida (ácido pirolenhoso) e fina de carvão da pirólise rápida da mistura do Capim elefante da variedade *Pennisetum purpureum* com a palha de cana-de-açúcar. Empregaram-se várias normas ASTM na caracterização físico-químico destes produtos. Obtiveram-se amostras representativas de bio-óleo (1.5 Toneladas) e carvão (1 Tonelada) mediante a operação estável da planta. Os finos de carvão caracterizam-se pela presença de conteúdos altos de voláteis, carbono fixo e cinzas. De acordo a suas propriedades físicas o bio-óleo BOWARE é um líquido de coloração preta, com cheiro forte e penetrante, com uma viscosidade cinemática muito alta, provocada fundamentalmente pela presença de quantidades altas de finos de carvão (7.2 %) e lignina pirolítica (86 %). Os conteúdos altos de carbono fixo, voláteis e o poder calórico do bio-óleo e o carvão obtido do processo de pirólise rápida BOWARE, transforma isto em produtos que podem ser usados como combustíveis.

**Palavras chave:** pirólise rápida; capim elefante; palha de cana-de-açúcar; bio-óleo; carvão.

**Abstract**

Tests were carried out under different operation conditions of the fast pyrolysis reactor (PPR-200 BOWARE) for the obtaining of bio-oil, acid water (pyroligneous acid) and fine coal samples by the fast pyrolysis of the capín elephant mixture of the variety *Pennisetum purpureum* with the

sugar cane straw. Several norms ASTM were used for the physical-chemical characterization of these products. There were obtained representative samples of bio-oil (1,5 t) and coal (1 t) by the stable operation of the pyrolysis plant. The coal fine is characterized by the presence of high volatile contents, fixed carbon and ash. According to their physical properties the bio-oil BLOWARE is a brown dark coloration liquid, with strong and penetrating scent and a very high provoked cinematic viscosity fundamentally for the presence of high quantities of fine coal (7,2%) and pyrolytic lignin (86%). Os conteúdos altos de carbono fixo, voláteis e o poder calórico do bio-óleo e o carvão obtido do processo de pirólise rápida BLOWARE, transforma isto em produtos que podem ser usados como combustíveis. The high fixed carbon, volatile contents and the bio-oil caloric and coal power obtained by the fast pyrolysis process BLOWARE, transforms these products and they can be used as fuels.

**Keywords:** fast pyrolysis; capim of elephant grass, sugar cane straw; bio-oil; char.

### **Introdução**

O progresso material e cultural da humanidade tem sido determinado em boa medida pela disponibilidade e acesso a distintas fontes de energia. A demanda crescente da mesma pode provocar graves problemas de subministro, quando as matérias primas das quais se originam escasseiam. O esgotamento dos recursos fósseis, o incremento das emissões de contaminantes (que se situam acima da capacidade de regeneração dos ecossistemas) e o fato de que dois terços das reservas petrolíferas estão na instável região do golfo pérsico, fazem cada vez mais imperativa a necessidade de encontrar alternativas energéticas Hazlewood, (1998); Y Kaltschmitt (1997).

Comparando às outras fontes de energia renovável a biomassa possui a vantagem de ter menor custo e atualmente representa cerca de 15 % do subministro de energia mundial (M.A. Paisley, Farris, Black, y Iring, (1999).

Uma possível maneira de transformar a biomassa numa fonte de energia mais valiosa é através da pirólise. Este processo inicialmente era usado para produzir gases e carvão, considerando os produtos líquidos como derivados indesejados. Desde a crise do petróleo nos anos setenta, o interesse nos produtos líquidos da pirólise da biomassa tem aumentado grandemente Chornet y Overend (1985).

Este método pode ser descrito como a decomposição térmica que sofre a matriz orgânica da biomassa na ausência de oxigênio para obter uma série de produtos que se classificam como: sólidos, líquidos e gases. A pirólise rápida da biomassa está sendo usada na produção comercial de uma ampla gama de combustíveis, solventes e insumos químicos Klass (1998).

Dependendo do tipo de biomassa tratada e o processo de pirólise empregado, assim como as variáveis implicadas, podem ser obtidos uma grande variedade de produtos com usos específicos Bridgwater, Czernik, Meier y Piskorz (1999). As composições dos óleos de pirólise têm uma influência determinante em sua utilização, por exemplo, nos bio-óleos, dependendo da viscosidade e da estabilidade podem ser aplicados como combustíveis ou como insumo químico na elaboração de produtos de alto valor agregado Meier y Scholze (1997); Oasma y Meier (2005). Sipild, Kuoppala, Fagernas y Oasmaa (1998).

O trabalho que se apresenta tem como objetivo: caracterizar o processo da pirólise rápida (PPR-200 BLOWARE) da mistura do Capim elefante da variedade *Pennisetum purpureum* com a palha de cana-de-açúcar.

### Materiais e métodos

Os testes foram realizados na planta PPR-200, instalada no Centro de Tecnologia Copersucar Estado de São Paulo, Brasil. A instalação experimental em escala piloto está baseada na tecnologia de leito fluidizado e utiliza ar como agente de fluidização. As principais partes que formam a planta são: sistema de alimentação de biomassa composto por esteira transportadora (1), silo (2), dosador de biomassa (3), rosca alimentadora (4), reator de leito fluidizado (5) com placa distribuidora de ar (6), 2 ciclones em série para separar os finos de carvão (7), válvula amostradora de carvão (8) com tambores para armazenar o carvão (9), sistema de recuperação de finos de carvão via úmida (10), sistema de recuperação de bio-óleo (11) e chaminé (12) (Figura 1).

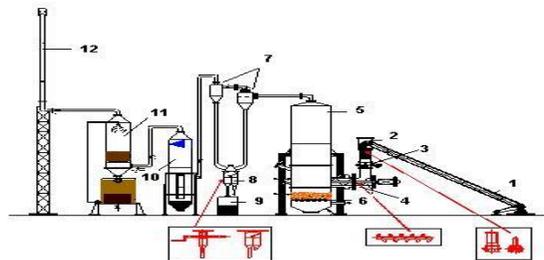


Figura 1. Esquema da planta PPR-200.

A biomassa usada foi capim-elefante, da variedade *Pennisetum purpureum* e palha de cana-de-açúcar. Na tabela 1, apresentam-se algumas características físico-químicas que foram determinadas de maneira experimental.

Tabela 1. Características físico-químicas da biomassa empregada.

Propriedades	Palha de cana-de-açúcar	Capim elefante
Composição química elementar.		
Livre de cinza (wt.%)		
C	44.51±0.51	43.16±0.51
H	5.47±0.09	5.55±0.08
N	0.73±0.06	1.78±0.15
S	< 0.15	< 0.15
O (por diferença)	49.29±0.30	49.51±0.50
Análise imediata		
Umidade	11.98±0.10	14±0.12
Voláteis	73.60±0.45	74.00±0.5
Cinzas	7.10±0.15	11.00±0.13
Carbono fixo	19.30±0.18	15.00±0.14
Poder calórico superior, MJ kg <sup>-1</sup>	17.35±0.42	16.8±0.5
Composição química. (livre de cinzas e água (wt.%))		
Hemicelulosa e extrativos	32.40	32.10
Celulose	45.10	40.30
Lignina	22.50	27.60
Outras propriedades		
Densidade real das partículas, kg.m <sup>-3</sup>	1440±20	1468±7
Densidade aparente das partículas, kg.m <sup>-3</sup>	535±15	763 ± 14
Porosidade das partículas	0.63±0.37	0.48 ± 0.01
Distribuição do tamanho de partícula, mm	0.55<Dp<1.25	1.68<Dp<2.38

**Tabela 2. Principais características físico-químicas da areia sílica 407/40 usada nos testes de pirólise rápida (de acordo com o fabricante).**

Análise química		Análise física	
Elementos	% em massa	Características	Limite de variação
SiO <sub>2</sub>	99,66	pH (sol. aquosa 5%)	4,5 a 7,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,15	Densidade aparente a granel (kg.m <sup>-3</sup> )	1400 a 1600
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04	Densidade real (kg.m <sup>-3</sup> )	2700 a 2920
TiO <sub>2</sub>	0,01	Absorção DOP	Não apresenta
		Absorção óleo linhaça	Não apresenta
		Perda ao fogo (850 °C)	Máximo 0,25%

### Procedimento experimental

O reator é inicialmente aquecido utilizando-se finos de carvão vegetal oriundos do processo de carbonização da lenha de eucalipto, processo que continua até que o leito de areia sílica atinja uma temperatura média entre 550 °C e 600 °C. Nessas condições, e encontrando-se a vazão mássica de ar no valor estabelecido, alimenta-se a biomassa. Para realizar a coleta das amostras de carvão vegetal e bio-óleo, espera-se que a distribuição de temperaturas ao longo da altura do reator seja aquela correspondente às condições de regime estacionário Mesa (2004).

Os de finos de carvão foram obtidos pelo processo de pirólise rápida usando como matéria-prima a mistura de capim de elefante com palha de cana-de-açúcar. Na tabela 3 apresentam-se as propriedades determinadas aos finos de carvão, assim como as normas ASTM usadas.

**Tabela 3. Caracterização das propriedades físico-química dos finos de carvão BIOWARE.**

Parâmetro	Normas e procedimentos
Diâmetro médio (mm); carbono (% m/m); Nitrogênio (% m/m)	ASTM D5291-92
Enxofre (% m/m); hidrogênio (% m/m)	ASTM D4208
carbono fixo (% m/m); Voláteis (% m/m); Cinzas (% m/m)	ASTM D1762-84
Umidade (% m/m)	
Poder Calórico Superior (MJ.Kg <sup>-1</sup> )	DIN 51900

As propriedades físico-químicas determinadas ao bio-óleo BLOWARE, assim como as normas ASTM usadas mostraram-se na tabela 4.

Tabela 4. Caracterização das propriedades físico-química do bio-óleo BLOWARE.

Parâmetro	Normas e procedimentos
Sólidos, % (m/m)	Insolúvel em etanol
pH	Calibração freqüente pH meter
Água, % (m/m)	ASTM D1744, ASTM E203, ASTM D95
Viscosidade a 20 °C (c Poise)	ASTM D86-82, ASTM D445
Viscosidade a 40 °C,(c Poise)	ASTM D86-82, ASTM D445
Carbono (% m/m), Hidrogênio (% m/m), nitrogênio (% m/m)	ASTM D5291-92
Enxofre (% m/m)	ASTM D4208
Densidade aparente a 22 °C (g.cm <sup>-3</sup> )	ASTM D4052, ASTM D941, ASTM D1298-85
Poder Calórico Superior (MJ.Kg <sup>-1</sup> )	DIN 51900
Lignina pirolítica	Insolúvel em água
carbono fixo (fração não-volátil a 100 °C)	ASTM D1762-84
Voláteis (fração não-volátil a 100 °C)	ASTM D1762-84
Cinzas (fração não-volátil a 100 °C)	ASTM D1762-84

### Resultados e discussão

Análises das propriedades físico-químicas da biomassa empregada no processo de Pirolise rápida.

O análise da composição química elementar da tabela 1, mostra que as biomassas são abundantes em carbono y oxigênio, que tais materiais têm alto conteúdo de celulosa, se volatilizam mais rapidamente e produz menor quantidade de carvão. Por outra parte a celulosa apresenta a menor porcentagem de carvão e maior de voláteis, entretanto a lignina exhibe um

comportamento contrario. O conteúdo de umidade dos materiais lignocelulósicos apresenta um importante papel no desenvolvimento da pirólise. Nesse caso os produtos da pirólise apresentam componentes levemente descompostos, especialmente compostos oxigenados.

O tamanho de partículas influi diretamente no desenvolvimento dos fenômenos que acontecem durante a pirólise de materiais lignocelulósicos; o regime de aquecimento do sólido depende do método de aquecimento no reator e do tamanho das partículas a serem pirolisadas. Geralmente o incremento do tamanho de partículas provoca uma diminuição da condução térmica no sólido sendo que o regime de aquecimento dentro da partícula seja menos intenso, trazendo consigo a variação dos rendimentos dos produtos de pirólise.

Durante a pirólise de materiais lignocelulósicos este se transforma em carvão, modificando-se suas propriedades físicas tais como: porosidade, permeabilidade, etc além de sua composição química. No sólido acontece a conversão dos constituintes e o acúmulo de massa e energia pelas espécies voláteis (produzidas durante a reação) dentro dos poros; fenômenos de transferência de calor por convecção, condução e radiação, além de reações químicas primárias e transporte mássico convectivo e difusivo das espécies voláteis.

No desenvolvimento desses fenômenos as propriedades das substâncias envolvidas apresentam importância significativa tanto na biomassa sólida como nos produtos da reação (carvão, gases e vapores), sendo as mais importantes: a densidade, a permeabilidade do sólido ao fluxo de gás, a condutividade térmica, a capacidade calorífica, a difusividade mássica, entre outras.

Se a densidade da biomassa a ser pirolisada aumenta, o rendimento de alcatrão primário diminui, entretanto o rendimento de carvão e gás aumenta. O anterior é consequência das baixas temperaturas e altos tempos de residência, o qual favorece o regime de degradação primária e as reações de carbonização.

Quando a atividade das reações secundárias é significativa os rendimentos de alcatrão permanecem aproximadamente constantes para baixas densidades de biomassa (<200 Kg.m<sup>-3</sup>).

Testes experimentais visando trabalho estável da planta PPR-200. Análises das propriedades físico-químicas dos produtos da pirolise rápida.

Nos testes foram usadas como biomassa capim-elefante da variedade *Pennisetum purpureu* e palha de cana-de-açúcar. Durante os experimentos, as condições de operação da planta PPR-200 foram mudadas. Amostras significativas de carvão foram retiradas usando válvulas amostradoras na saída dos ciclones e de bio-óleo, no sistema centrífugo de separação.

A Tabela 5 apresenta algumas condições testadas durante o trabalho da planta PPR-200. Nesse caso, dois fatores independentes foram mudados, um de cada vez, tomando como base a experiência adquirida durante os testes exploratórios apresentados, da seguinte forma:

- ✓ Fluxo volumétrico de ar ou velocidade superficial do gás entre a condição de operação 1 e a condição 2;
- ✓ Fluxo de biomassa fornecida ao reator entre as condições de operação 2 e 3;
- ✓ Os fatores anteriores variaram de forma conjunta entre as condições 1 e 3.

Tabela 5. Condições de operação testadas.

Condições de operação	Fluxo de biomassa (kg.h <sup>-1</sup> ) (bu)	Fluxo volumétrico de ar (m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ) (T=52 °C)	Altura do leito fixo de inerte (H <sub>L</sub> , ( m)	Velocidade superficial do ar (T=52 °C)
1	75	19,17±2,46	0,225	0,036±0,0047
2	75	27,3±0,82	0,225	0,051±0,0014
3	132	27,3±0,82	0,225	0,051±0,0014

Na Tabela 6, mostram-se os valores dos parâmetros adimensionais que descrevem as características geométricas e dinâmicas do sistema sob estudo para condição experimental testada.

Tabela 6. Valores dos grupos adimensionais para as condições testadas.

Condições de operação	$u_0$ (m/s)	$H_L$ , m	$D/dp$	$\phi$	$h/D$	$ReD$	$Redp$	$dp$
1	0,036	0,225	4633	0,6	0,54	707	0,154	0,09
2	0,051	0,225	4633	0,6	0,54	1012	0,218	0,09
3	0,051	0,225	4633	0,6	0,54	1012	0,218	0,09

Tabela 6. Valores dos grupos adimensionais para as condições testadas (Cont).

$Fr$	$u_0/u_{mf}$	$Ar$	$Ly. 10^3$	$ut$	$Ly$ $Pavlov$ $10^5$	$\epsilon$	$\frac{Q_{ar}}{Q_{BA}}$
1,47	5,54	41,3	3,94	0,43	8,84	0,56	0,256
2,94	7,8	41,3	3,94	0,43	25,1	0,61	0,364

2,94	7,8	41,3	3,94	0,43	25,1	0,61	0,207
------	-----	------	------	------	------	------	-------

Pode-se observar, na Tabela 6 que os fatores geométricos foram mantidos constantes para todas as condições, porém a quantidade de material inerte arrastado não foi calculada. A situação anterior pode provocar a diminuição da relação  $h/D$  desde a condição de operação 1 até a condição 3.

Por outro lado, os fatores dinâmicos variaram em todas as condições experimentais testadas. Quando a condição de operação 1 é mudada para a condição 2, a velocidade superficial do gás aumenta, situação que provoca um incremento do valor de  $ReD$ ,  $Redp$ ,  $Fr$ ,  $u_0/u_{mf}$ ,  $\varepsilon$ ,  $\frac{Q_{ar}}{Q_{BA}}$  e  $Ly$

*Pavlov*. O aumento dos números de Reynolds e Froude demonstra o predomínio das forças inerciais do sistema sobre as viscosas e gravitacionais. O baixo valor do número de Arquimedes e da velocidade de araste está relacionado com o pequeno diâmetro das partículas inertes. Por outro lado, o aumento do número de Lyaachenko segundo Pavlov para valores de Archimedes constantes evidencia maior expansão do leito de inerte (maior porosidade) (Tabela 6).

O incremento da relação mássica  $\frac{Q_{ar}}{Q_{BA}}$  teoricamente deve favorecer o aumento da temperatura

no leito, porém os resultados indicaram comportamentos diferentes. Na Figura 3, pode-se observar que, no período compreendido entre 14h50min e 15h20min, o perfil de temperatura no leito diminui. Às 15h05min, foi aumentada a vazão de ar a fim de aumentar a temperatura do leito, sem sucesso. Nessas condições, foram detectadas partículas de biomassa torrada na saída dos ciclones.

Os picos de pressão mostrados na Figura 4, entre 13h20min e 15h25 foram tentativas para aumentar a temperatura do leito com o incremento da vazão de ar. Nessas condições, a temperatura na base do leito (T2) experimentou um aumento significativo; no entanto, T3 e T4 mantiveram seus valores aproximadamente constantes. Os resultados anteriores evidenciam a formação de mistura ineficiente da areia com a biomassa e arraste de parte do inerte.

Pode-se constatar que a relação entre os diâmetros das partículas de biomassa e inerte é  $d_1/d_2=22$ , e a relação entre as densidades de biomassa e inerte  $\rho_1/\rho_2=0,5$ . Nessas condições, o fenômeno da segregação é evidente.

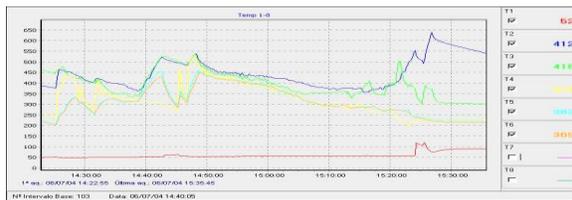


Figura 3. Perfil de temperatura no reator. Condição 1.

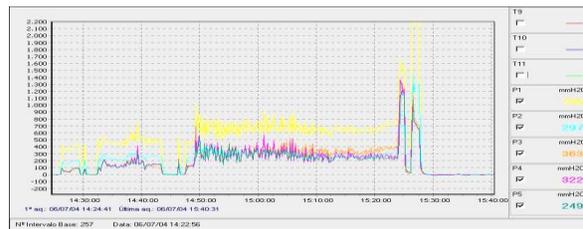


Figura 4. Perfil de pressão no reator. Condição 1.

Na segunda condição de operação, o comportamento do perfil de temperatura mostrou-se similar ao encontrado na primeira condição (Figura 3). Entretanto, as flutuações de pressão nesse caso são mais intensas (Figura 4 e 5), situação que poderia ter favorecido a maior estabilidade do perfil de temperatura no leito nessas condições.

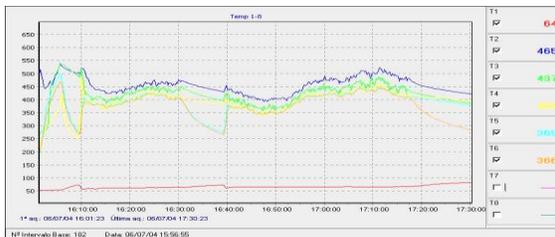


Figura 4. Perfil de temperatura no reator.  
Condição 2.

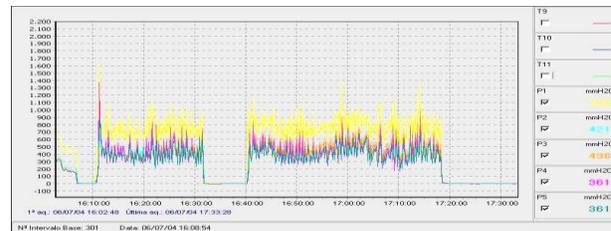


Figura 5. Perfil de pressão no reator.  
Condição 2.

Na terceira condição testada, a operação estável do reator foi praticamente impossível. A instabilidade dos perfis de temperatura e pressão no reator justifica tal fato (Figuras 6 e 7). Nessa circunstância, verificou-se acúmulo de biomassa *in natura* na parte acima do ponto de alimentação da biomassa.

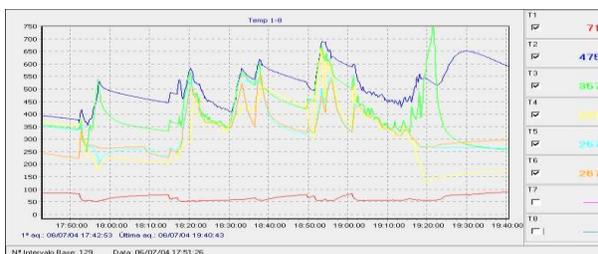


Figura 6. Perfil de temperatura no reator.  
Condição 3.

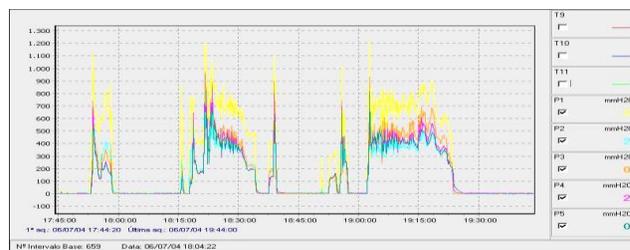


Figura 7. Perfil de pressão no reator.  
Condição 3.

Amostras de bio-óleo e de carvão fino foram coletadas durante a operação do reator nas condições 1 e 2. As características físico-químicas são apresentadas nas Tabelas 7 e 8.

Tabela 7. Propriedades físico-químicas do bio-óleo de pirólise rápida BIOWARE.

Parâmetro	Bio-óleo. fase diluída		Bio-óleo. fase densa	
	Condição	Condição	Condição	Condição 2
	1	2	1	
Sólidos ( % m/m)	3,4 ± 0,3	1,32 ± 0,01	11,9 ± 0,6	9,4 ± 0,2
pH	3,21 ± 0,03	3,19 ± 0,03	-	-
Água ( % m/m)	47,1 ± 0,9	57,5 ± 1,2	12,4 ± 0,6	14,0 ± 3,0
Viscosidade a 20°C ( c Poise)	7,50 ± 0,4			132.000 ± 1.400
Viscosidade a 40°C ( c Poise)	4,8 ± 0,8			8.420 ± 40
carbono,( % m/m)	27,4 ± 0,6	21,7 ± 0,6	59,6 ± 0,5	62,6 ± 1,3
hidrogênio ( % m/m)	8,1 ± 0,1	8,6 ± 0,2	7,64 ± 0,02	7,62 ± 0,09
nitrogênio, (% m/m)	0,58 ± 0,05	0,42 ± 0,05	1,22 ± 0,01	1,18 ± 0,06
enxofre (% m/m)	<LD	<LD	<LD	<LD
Densidade aparente a 22 °C (g.cm <sup>-3</sup> )	1,167	1,129	1,159	1,129
Poder Calórico Superior (MJ.Kg <sup>-1</sup> )	-	-	23,67	25,68
carbono fixo (fração não-volátil a 100 °C)	20,7	20,9	19,7	19,1
Voláteis (fração não-volátil a 100 °C)	75,2	76,5	79,1	80,0
Cinzas (fração não-volátil a 100 °C)	4,1	2,6	1,2	0,9

\* Resultados expressos como média e estimativa do desvio padrão. LD\*=Limite de detecção

As amostras de bio-óleo separadas no ventilador centrífugo, em repouso e temperatura ambiente, separam-se em duas fases bem definidas. A primeira fase, menos viscosa, foi identificada como fase diluída; a segunda, de maior densidade, como fase densa. Pode-se observar, na Tabela 7, que a porcentagem de sólidos no bio-óleo é alta. Esse fato pode ser uma das causas da alta viscosidade das amostras de bio-óleo. Outra das possíveis causas está associada ao tempo de residência dos vapores da pirólise desde sua formação até sua

separação. Uma estimativa aproximada desse parâmetro pode ser feita considerando-se que toda a biomassa fornecida ao reator transforma-se em vapores e gases. Conhecendo-se o volume interno do reator, é possível verificar que o tempo de residência nas condições testadas está na faixa de 8 a 12 segundos. Nessas condições, é impossível obter-se bio-óleo com baixa viscosidade e altos rendimentos.

As amostras de carvão fino foram retiradas através de válvulas amostradoras instaladas na descarga de cada ciclone. A Tabela 8 indica os resultados das diferentes análises nas condições de operação 1 e 2.

**Tabela 8. Propriedades físico-químicas do fino de carvão da pirólise rápida BIOWARE.**

Parâmetro	Finos de carvão		Finos de carvão	
	Condição 1		Condição 2	
	Ciclone 1	Ciclone 2	Ciclone 1	Ciclone 2
Diâmetro médio ( mm)	0,1	0,05	0,13	0,06
carbono ( % m/m)	48,99	52,58	36,19	55,26
nitrogênio ( % m/m)	0,97	1,22	0,48	0,95
enxofre ( % m/m)	0,24	0,40	<LD	0,37
hidrogênio ( % m/m)	3,10	3,07	1,62	2,60
Poder Calórico Superior (MJ.Kg <sup>-1</sup> )	18,74	17,98	20,20	17,25
carbono fixo (% m/m)	39,2	45,9	48,7	54,1
Voláteis (% m/m)	38,0	40,0	21,0	27,0
Cinzas (% m/m)	22,8	14,10	30,30	18,90
Umidade (% m/m)	0,94	8,56	0,17	3,86

Podem-se constatar, na Tabela 8, que o diâmetro médio dos finos de carvão separados no primeiro ciclone é maiores quando comparado com o dos finos separados no segundo ciclone. As altas porcentagens de voláteis no carvão indicam que o processo de desvolatilização não estava acontecendo de forma intensa, situação que pode estar relacionada com as baixas temperaturas do leito e com a mistura ineficiente entre a areia de inertes e a biomassa. Isso demonstra que as condições testadas não são adequadas para o desenvolvimento do processo de pirólise rápida de biomassa e que é necessário diminuir o tempo de residência dos vapores e aumentar a desvolatilização das partículas sólidas por meio de uma mistura intensa entre o material inerte e as partículas carbônicas.

O teor de umidade é maior para as amostras coletadas no ciclone 2, já que parte de bio-óleo e da água contida nos vapores orgânicos condensam pelo efeito da diminuição de temperatura.

A partir da análise dos resultados acima apresentados, foram redefinidas as condições de operação do reator enquanto a: diâmetro de partícula de inerte, altura do leito fixo de material inerte, ponto de alimentação da biomassa, vazão de ar, etc. A implementação dessas mudanças permitiram o trabalho estável do reator e a produção de amostras significativas de bio-óleo, finos de carvão e água ácida.

Os trechos onde os perfis não são contínuos correspondem a paradas realizadas para a retirada dos tambores onde os finos de carvão são coletados. Isso será solucionado, usando um sistema contínuo para a retirada e briquetagem dos finos de carvão.

Nesta etapa foram produzidas aproximadamente 1 toneladas de finos de carvão e 1,5 toneladas de bio-óleo.

O balance de massa e o rendimento dos produtos obtidos da pirólise rápida de misturas de capim de elefante com palha de cana de açúcar, eles são apresentados na tabela 9.

**Tabla 9. Rendimentos dos produtos da pirólise rápida com leito fluidizado BIOWARE.**

Produtos	Quantidade (T)	Rendimento (wt.%)
Bio-óleo	0,822	49.20
Água pirolítica	0,181	10.80
Carvão	0.417	25.00
Gases	0.250	15.00
Total	1.670	100

As reações de decomposição da biomassa usada geram produtos das pirólises, como: condensado líquido (bio-óleo, água pirolítica), carvão e gases não condensáveis.

O líquido condensável é formado através de duas fases, uma aquosa e o outro um orgânico isso pode ser separado através de decantação. A fase aquosa está formada através de água e compostos orgânicos de baixa massa molar e polaridade alta. Na fase orgânica prevalecem os compostos orgânicos de mais massa molar e baixa polaridade.

Melhorado as condições de operação do processo de pirólise rápida BIOWARE, são aumentados os rendimentos dos produtos das pirólises. É obtido um bio-óleo que mostra suas propriedades na tabela 10.

**Tabela 10. Propriedades físico-químicas do bio-óleo BIOWARE.**

Propriedades	Bioware Oil	Fast Pyrolysis Oil (Anja Oasma, Dietrich Meier., 2005)
Colour	Black	Brown
Viscosity, 20 °C, (cSt)	~ 2000, very viscous	~ 100

Water content, Wt (%)	10.8	20.0-25.0
Solids, Wt (%)	7.2	0.1-0.5
Pyrolytic lignin, Wt (%)	86	~25
Water Soluble, Wt (%)	3.2	~50

Os resultados de algumas propriedades físico-químicas do bio-óleo BLOWARE comparam-se com os obtidos em outras tecnologias de pirólise rápida.

O bio-óleo BLOWARE é um líquido de coloração preta, com cheiro forte e penetrante, viscosidade cinemática muito alta, provocada fundamentalmente pela presença de quantidades elevadas de finos de carvão e lignina pirolítica. Sua significativa acidez se deve a presença de grandes quantidades de ácidos carboxílicos, fenóis e outros compostos.

### **Conclusões.**

- 1) A biomassa empregada no processo de pirólise rápida com tecnologia BLOWARE gera produtos líquidos (ácido pirolenhoso, bio-oil), carvão e gases não condensáveis.
- 2) Consegue-se aperfeiçoar o trabalho estável da planta de pirólise rápida PPR-200, obtiveram-se amostras representativas de bio-óleo (1.5 Toneladas) e carvão (1 Tonelada).
- 3) De acordo a suas propriedades físicas o bio-óleo BLOWARE é um líquido de coloração preta, com cheiro forte e penetrante, uma viscosidade cinemática muito alta, provocada fundamentalmente pela presença de quantidades significativas de finos de carvão (7.2 %) e lignina pirolítica (86 %).
- 4) Os conteúdos altos de carbono fixo, voláteis e o poder calórico do bio-óleo e o carvão obtido do processo de pirólise rápida BLOWARE, transforma isto em produtos que podem ser usados como combustíveis.

### **Referências bibliográficas**

- Bridgwater, A.V., Czernik, S., Meier, D., Piskorz, I. (1999). *Biomass. A Growth Opportunity in Green Energy and Value-Added Products*, In: Overend, R.P., Chornet, E. Eds, vol. 2, Elsevier, Amsterdam. p. 1217.
- Chornet, E., & Overend, R.P. (1998). *Fundamentals of Thermochemical Biomasa Conversion*, R.P. Overend, T.A. Milne, and L.K. Mudge, (Eds.), Elsevier ASP, London. p. 967.
- Hazlewood, (1998). *Power Production from Biomass III, Gasification and Pyrolysis for Industry*, VTT Symposium, 192, 14-15. p. 64.

- Kaltschmitt, M., & Dinkelbach, L. (1997). *Biomass Gasification and Pyrolysis, State of the Art and Future Prospects*, M. Kaltschmitt and A.V. Bridgwater (Eds.), CPL Scientific, Newbury, p.7.
- Klass, D.L (1998). *Biomass for renewable energy, fuels, and chemicals*. San Diego, CA: Academic Press.
- Meier, D., & Scholze, B. (1997). *Biomass Gasification and Pyrolysis*, in: M. Kaltschmitt, A.V. Bridgwater (Eds.), CPL Press, Newbury, UK. p. 431.
- Mesa. J.M. (2004). *Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: Critérios para sua otimização*. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, p 46-58.
- Oasma, A., & Meier, D. (2005). *Norms and standards for fast pyrolysis liquids*. 1. Round Robin Test.. J. Anal. Appl. Pyrolysis, 73. p.323-334.
- Paisley, M.A., Farris, M.C., Black, J. & Iring, R.P. (1999). Overend, In: *Biomass A Growth Opportunity in Green Energy and Value Added Product*, R.P. Overend and E. Chronet (Eds.), Vol.2, p. 1061.
- Sipild, K., Kuoppala, E., Fagernas, L., & Oasmaa, A. (1998). *Biomass Bioenergy* 14 (2), p. 103–113.