

## O AUMENTO DA PRODUÇÃO DE CARVÃO VEGETAL POR MEIO CARBONIZAÇÃO EM ALTA PRESSÃO

Igor Alberto Silva Gomes<sup>1</sup>, Marcos Enê Chaves Oliveira<sup>2</sup>, Carlos Alberto Gurgel Veras<sup>3</sup>, Hércio de Oliveira  
Lameira<sup>4</sup>, Ananda Lorena Silva Gomes<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Eng. Mecânico igor.gomes@embrapa.br, <sup>2</sup>Eng. Químico marcos-ene.oliveira@embrapa.br, <sup>3</sup>Eng. Mecânico gurgel@unb.br, <sup>4</sup>Advogado  
helcioliveira@hotmail.com, <sup>5</sup>Advogada ananda\_lorenaa@hotmail.com

Embrapa Amazônia Oriental, Travessa Dr. Enéas Pinheiro s/n.º, Belém - PA, 66095-100, www.cpatu.embrapa.br, (91) 3276-1941  
Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília -DF, 70910-900, www.unb.br, Telefone (61) 3107-3300  
Universidade da Amazônia, Av. Alcindo Cacela, 287, Belém - PA, 66060-902, www.unama.br, Telefone: (91) 4009-3000

### RESUMO

Carvão vegetal é largamente utilizado em alguns setores da indústria brasileira, e o estudo de dispositivos para melhorar a conversão de biomassa em carvão é muito importante para o setor. A carbonização em alta pressão testadas neste trabalho é uma possível rota para o aumento da produção de carvão. Os experimentos foram realizados em um reator de leito fixo usando uma resistência de cartucho como elemento de aquecimento, tendo a temperatura monitorada por um termopar associado a um controlador PID. O tempo de aquecimento, a taxa de aquecimento, a pressão e o tempo de residência foram monitorados para estabelecer maiores rendimentos na produção de carvão. A taxa de aquecimento foi mantida em 20°C/min. O tempo de residência variou de um baixo nível de 55 minutos para um nível elevado de 95 minutos e os níveis de pressão partiu da pressão atmosférica e uma pressão de 5 bar positiva. Utilizaram-se no processo endocarpo de dendê (*Elaeis guianensis*) e serragem de eucalipto (*Eucalyptus* spp.), contudo nos testes em pressão positiva somente a serragem pode ser neste momento testada. Com a pressão atmosférica e o tempo de permanência em 55 minutos o rendimento em carvão da serragem de eucalipto foi de 43%, enquanto que a 5 bar e 95 minutos de tempo de residência do rendimento foi de 47%. O endocarpo de dendê teve um rendimento de 41% e foi medida apenas a pressão atmosférica. Estes resultados indicam que uma pressão positiva aumenta o rendimento em carvão vegetal e que possivelmente fará o mesmo com as outras materiais primas a serem utilizadas, incluindo o endocarpo de dendê, o qual será o próximo passo do trabalho.

**Palavras Chave:** Carvão vegetal, carbonização, pressão.

### ABSTRACT

#### *HIGH PRESSURE CARBONIZATION TO INCREASE VEGETABLE COAL YIELD*

Vegetable coal is largely used in some sectors of Brazilian industry, and the design of devices to improve biomass conversion to coal is really important in these industries. High pressure carbonization tested in this work is a possible interesting route to increase yield in this area. The experiments were conducted in a fixed bed reactor using a cartridge resistance as heating device, and the temperature was monitored by a thermocouple associated to a PID controller. Temperature, heating rates, pressure and residence time were monitored to establish higher yields in the coal production. The heating rate was maintained in 20°C/min. The residence time varied from a low level of 55 minutes to a high level of 95 minutes, and the pressure levels were atmospheric pressure and a pressure of 5 bars. Oil palm (*Elaeis guianensis*) endocarp and eucalyptus (*Eucalyptus* spp.) sawdust were the biomasses studied. At atmospheric pressure and residence time in 55 minutes the sawdust coal yield was 43%, while at 5 bars and 95 minutes of residence time the yield was 47%. The oil palm endocarp carbonization yield was 41% and was measured only at atmospheric pressure. These results indicated that a positive pressure increases yield in sawdust and possibly will do the same with oil palm endocarp, what will be the next step in the work.

**Keywords:** *Vegetable coal, carbonization, positive pressure.*

## INTRODUÇÃO

As reservas de combustíveis fósseis são finitas e seu emprego para a geração de diferentes formas de energia tem contribuído para o aumento de emissões gasosas que poluem o meio e participam do aquecimento global. Fatores do tipo econômico, disposição de resíduos gerados e da segurança no funcionamento dos reatores nucleares em alguns países, têm influenciado negativamente no aumento da oferta desta forma de energia. Os recentes acontecimentos no Japão, onde uma usina nuclear sofreu danos como consequência de um Tsunami, tem provocado intensas discussões quanto à segurança de usinas nucleares. Segundo Gómez, et al, 2008, a utilização mais intensa de energias renováveis como eólica, hidráulica, solar e aquela obtida a partir de biomassa se apresenta como alternativa de médio e longo prazo no moroso processo de substituição de combustíveis fósseis.

Além dos problemas ambientais causados pela queima dos combustíveis fósseis, o declínio na produção de petróleo, aliado ao aumento do consumo pelas economias emergentes, principalmente China, Índia, Rússia, Brasil e alguns outros países asiáticos e africanos torna muito mais relevante a busca de soluções alternativas. Nesse contexto, a biomassa vegetal apresenta-se como a única fonte sustentável de carbono orgânico disponível.

O uso de fontes de energia alternativas aos combustíveis fósseis vem ganhando importância no Brasil e no mundo, notadamente após os choques no preço do petróleo da década de 70 e, mais recentemente, em virtude das preocupações com as mudanças climáticas. Segundo Rosillo-Calle et al. (2005), um quinto de toda a energia mundial é gerado a partir de recursos renováveis, sendo de 13% a 14% a partir da biomassa e 6% a partir da água. Nas estimativas dos autores, a biomassa representa cerca de 25 milhões de barris de petróleo por dia (55 EJ/ano) sendo que nos países em desenvolvimento (3/4 da população mundial), a biomassa é a fonte de energia mais importante (33% do total) para seus habitantes.

Por biomassa vegetal entende-se a matéria vegetal produzida com auxílio da energia solar e alguns compostos químicos num processo conhecido como fotossíntese. Segundo Nogueira e Lora (2003), se aproveitássemos aproximadamente 1% do total da radiação solar incidente sobre a Terra ao longo de um ano, seriam produzidas cerca de  $220 \times 10^9$  toneladas de biomassa (base seca), equivalente, em termos energéticos a  $2 \times 10^{15}$  MJ. Esta estimativa equivale a mais que 10 vezes a energia global consumida no planeta, na mesma escala de tempo. O estudo também revelou que o total de energia que pode ser retirada da cobertura vegetal da Terra é da ordem de 100 vezes o consumo atual de energia ao longo de um ano.

De um modo geral, a biomassa pode ser queimada diretamente, gerando energia térmica, ou, através de processos de conversão específicos, pode ser transformada em combustíveis sólidos, líquidos ou gasosos. A maior parte do carvão vegetal produzido é utilizada na indústria siderúrgica e apresenta características como pureza e reatividade, que lhe conferem um alto preço como redutor metalúrgico de alguns metais. O trabalho de Rosillo-Calle et al. (2005) destaca que no Brasil, a indústria de carvão vegetal alcançou maturidade a partir dos anos de 1960, com picos de produtividade em 1989, contabilizando 44,8 milhões de  $m^3$ , declinando para 25,4 milhões de  $m^3$  no ano de 2000. Tais números demonstram a importância desta atividade produtiva na economia brasileira.

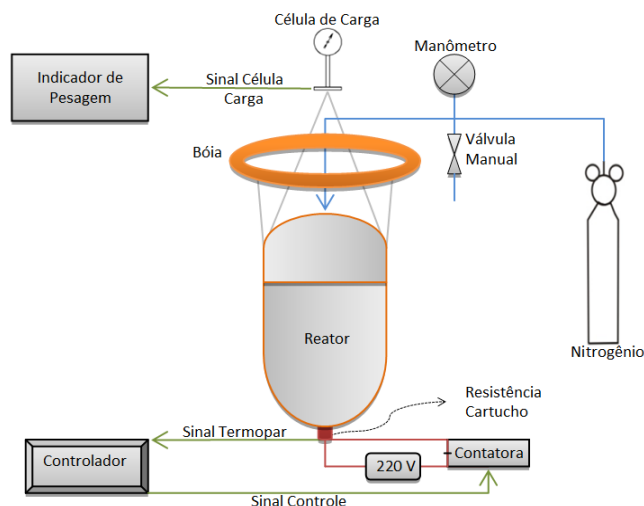
Segundo Benites et al. (2010), o desenvolvimento de processos que permitam transformar o carvão e seus subprodutos em compostos com características mais apropriadas e com melhores rendimentos é altamente desejável e estratégico para o setor florestal brasileiro e a indústria siderúrgica. Ainda segundo Benites et al. (2010), na busca de aprimoramento verifica-se que as diversas formas de emprego do processo de pirólise é uma alternativa econômica, que representa um benefício ambiental por incentivar a recuperação e utilização de todos os produtos gerados no processo, evitando os prejuízos por eles causados.

Neste contexto, o presente trabalho trata da conversão de biomassa, via carbonização em regime de pressão acima da atmosférica. Nesta conversão busca-se elevar o rendimento do carvão vegetal. Tais processos foram estudados num reator desenvolvido especificamente para este trabalho.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### **Bancada de testes e metodologia empregada**

Um desenho esquemático da bancada, na sua concepção final, pode ser vista na figura 1.



**Figura 1.** Desenho esquemático da bancada experimental  
*Figure 1:* Schematic diagram the experimental bench

Na realização dos ensaios em regime de alta pressão se dá com os seguintes passos:

1. A biomassa a ser utilizada foi separada e passou pelo primeiro processo de secagem natural, ao sol, durante 9 horas e logo em seguida passou pelo processo artificial, onde a biomassa foi colocada em estufa a temperatura de 102°C e mantida até que a sua umidade se aproximasse fosse inferior a 5%. Em seguida o material foi pesado e embalado em sacos de coletas.
2. O container do reator é carregado com a quantidade desejada de biomassa;
3. Fecha-se o reator com a tampa estrutural (hemisfério superior);
4. Injeta-se nitrogênio de purga e após alguns segundos regula-se a pressão interna, desejada, do reator por meio da válvula automática acoplada à garrafa de nitrogênio;
5. Início do aquecimento com uma rampa de subida da temperatura que não comprometa a resistência cartucho;
6. Realização do ensaio até o ponto em que não se verifica emissão de voláteis;
7. Desligamento da resistência elétrica;
8. Esfriamento natural do reator;
9. Abertura do reator, verificação visual do carvão vegetal e pesagem deste;
10. Limpeza do sistema

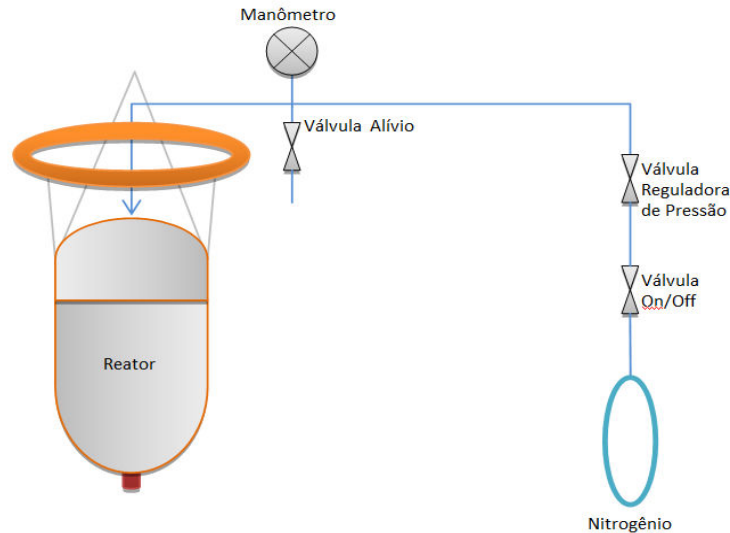
### Controle de temperatura

Para manter o reator operando em altas temperaturas, com pouca perda de energia para o meio, durante o processo de pirólise, isolou-se o contêiner com argamassa refratária, inicialmente. Algumas questões operacionais ocasionaram posterior mudança neste tipo de isolamento, que foi alterado para lã de vidro.

Com o isolamento térmico ajustado, o reator foi abastecido com limalha de ferro para aferição do sistema num teste de aquecimento com incrementos de temperatura de 50°C com temperatura final de 600°C, com tempo total de 1 hora e 30 minutos. Na realização do teste, utilizou-se o termômetro digital infravermelho para aferir a temperatura na parte externa do reator. Neste teste, buscou-se verificar quais regiões não estavam isoladas adequadamente, na transferência de calor.

### Controle de pressão

Para testar o reator sob alta pressão, foi acoplada uma tubulação a um compressor que injetou ar dentro do reator. Primeiramente buscou-se manter uma pressão de 2 bar. Neste teste, ocorreu um fluxo de saída de gases na região de fixação da resistência elétrica ao corpo do reator (parte inferior). Este fluxo auxiliou no controle de pressão dos gases, pela dificuldade em permitir a passagem do ar. A manutenção deste fluxo é essencial para manter o processo de purga por nitrogênio, quando nos ensaios de carbonização. Uma válvula posicionada na entrada do fluxo de ar permite reduzir a pressão caso o fluxo pela parte inferior seja alterado. Num ensaio com nitrogênio a recuperação do nível de pressão se dá automaticamente pela atuação da válvula redutora e controladora. No caso de elevação da pressão, esta deve ser reduzida pela abertura da válvula globo posicionada após a válvula controladora, servindo com válvula de alívio (manual) (figura 2). Nestes testes preliminares, o reator operou com pressurização a ar por aproximadamente 1 hora e 30 minutos, tempo necessário para um ensaio real de carbonização sob alta pressão. Cabe lembrar que sendo o manômetro um indicador de pressão relativa, na carbonização, do ponto de vista termoquímico, a pressão a ser considerada será sempre somada de um bar (pressão absoluta).



**Figura 2.** Desenho esquemático da disposição das válvulas do sistema de pressurização  
**Figure 2.** Schematic diagram of the arrangement of valves in the pressurization system

### Ensaio de carbonização a pressão ambiente

Foram realizados diversos testes de pirólise com a biomassa escolhida, parte com pressão ambiente e sem purga com nitrogênio e alguns ensaios com pressões positivas e purga com nitrogênio. Nos ensaios sem purga, algumas regiões do reator seria possível ocorrer alguma oxidação. Contudo a emissão de voláteis tem início em temperaturas ligeiramente inferiores a temperatura de oxidação destes e do carvão produzido.

No primeiro teste o reator foi abastecido com 350 g de serragem, o aquecedor foi ligado e com rampa de aquecimento aleatória, controlada de forma apenas a evitar danos na resistência, até esta atingir 450°C. A carbonização foi realizada até que não se visualizasse emissão de fumaça (voláteis). Esse primeiro teste durou aproximadamente nove horas. O aspecto do carvão vegetal produzido estava relativamente homogêneo, contudo pelo fato do reator ser adiabático, não se justificava esse longo tempo de carbonização.

No segundo teste o reator novamente foi abastecido com 350 g de serragem a resistência elétrica foi ativada dessa vez com taxas de aquecimento de 15°C/min, até atingir a temperatura de 450°C. Buscou-se, nesta etapa, maior familiarização do processo para se verificar as possíveis causas do longo tempo na conversão. Assim, em intervalos de 30 minutos a tampa do container era levantada para se observar como se acomodava a biomassa com o progresso da carbonização, novamente com a entrada de oxigênio, algumas regiões da biomassa sofriam oxidação. Confirmou-se, que como esperado, a carbonização era gradativa do centro para a periferia (figuras 3a e 3b). Esse teste teve duração de sete horas. Todavia, verificou-se que a biomassa não foi carbonizada por completo, havendo material apenas aquecido na periferia do reator.



**Figura 3.** Biomassa após uma hora de carbonização (a), biomassa após três horas de carbonização (b).  
**Figure 3.** Biomass after one hour of carbonization (a), biomass after three hours of carbonization (b)

O terceiro teste o reator foi abastecido com 400 g de serragem e empregou-se a tampa de argamassa refratária (parte superior do reator). A resistência elétrica foi acionada com rampas de aquecimento de 15°C/min até atingir a temperatura de 450°C, com cinco horas de tempo de residência. Após esse período a tampa foi retirada e com auxílio de uma barra de ferro o material foi revolvido, sendo liberada uma grande quantidade de fumaça que estava retida em lacunas no meio da biomassa.

O quarto e quinto testes foram realizados com o reator totalmente fechado, com um carregamento de 300 g de serragem e aquecimento sendo realizado com taxas de 20°C/min e tempo de residência de três horas. A

cada hora impactava-se o reator com um pequeno martelo de forma a remover a biomassa carbonizada. Neste contexto, os testes foram considerados satisfatórios quanto ao tempo total de carbonização. Houve diminuição no tempo de carbonização e foi possível obter 126g e 120g de carvão, respectivamente para os testes 4 e 5. Em contrapartida, observou-se que o tempo de resfriamento do material estava muito elevado. Tal fato se dava pela dificuldade na liberação de calor da amostra e da argamassa refratária. Assim, para manter um padrão adequado de resfriamento, mas com material que diminuísse a inércia térmica do reator, optou-se por empregar lã de vidro como isolante que reduziu o tempo de residência para 55 minutos. Com esta substituição foi possível, também, se diminuir o peso total do reator. A figura 4 apresenta a proposta final para o reator. Nesta, há um pequeno container cilíndrico para a biomassa, envolvido em lã de vidro, com material isolante térmico.



**Figura 4.** Isolamento térmico com lã de vidro  
*Figure 4. Thermal insulation de glass wool*

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Ensaios de pirólise em pressão atmosférica e isolamento de lã de vidro

Os testes finais realizados com a nova conjuntura do reator obteve rendimentos em carvão vegetal oriundo de serragem de eucalipto com média em torno de 44% e os testes com o endocarpo de dendê tiveram rendimento em torno de 41% de carvão vegetal.

Realizaram-se seis experimentos com a nova conjuntura do reator, três para a serragem de eucalipto e três para o endocarpo de dendê. No primeiro momento foram realizados testes abastecendo-se o reator com 300g de serragem, obtendo-se 129g de carvão, 300g de endocarpo, obtendo-se. O segundo teste teve abastecimento com 350g, gerando 154g de carvão de serragem, 350g de endocarpo, obtendo-se. O terceiro teste foi realizado com 400 g, o que resultou em 172 g de carvão de serragem, 400g de endocarpo, obtendo-se. Ressalta-se que todos os resultados foram em base úmida.

Os ensaios tiveram taxas de aquecimento de 20°C/min atingindo a temperatura máxima de 500°C, com 55 minutos de tempo de residência e 30 minutos para resfriamento do reator. Os rendimentos em carvão das amostras foram, em média, de 43% para a serragem e 41% para o endocarpo (tabela 1).

**Tabela 1.** Rendimento dos testes de pirólise das biomassas em pressão atmosférica

*Table 1. Yield of tests pyrolysis of biomass at atmospheric pressure*

Biomassa	Peso Inicial	Carvão Produzido	Temperatura Final	Tempo Total	Rendimento Aproximado
Serragem de Eucalipto	300g	129g	500°C	55'	43 %
	350g	154g			
	400g	172g			
Endocarpo de Dendê	300g	123g	500°C	55'	41 %
	350g	143g			
	400g	164g			

### Resultados dos ensaios de pirólise em pressões positivas

Com a utilização a pressão de 5 bar (manométrica ou relativa). Observou-se que, diferente da carbonização sob pressão atmosférica, esta foi mais gradativa. Em aproximadamente 30 minutos de ensaio a resistência elétrica atinge 500°C, caracterizando uma taxa de aquecimento próxima de 16°C/min, similar aos testes com pressão atmosférica. O fim do processo de pirólise ocorre com aproximadamente 95 minutos de ensaio. O teste com pressão de 5 bar acarretou em um rendimento superior aos encontrados nos ensaios de carbonização com relação ao teste em pressão atmosférica. Com a influência deste parâmetro obteve-se um

rendimento em carvão vegetal da ordem de 47%, ou seja um aumento de 4% em comparação com o rendimento em pressão atmosférica.

## CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi testar um reator para carbonização de biomassa, capaz de operar em regime de alta pressão e obter resultados preliminares sobre o possível aumento de rendimento na carbonização de serragem de eucalipto.

Como conclusões principais deste trabalho têm-se:

É possível manter o reator pressurizado com pouquíssima, ou mesmo sem, injeção de nitrogênio, apenas com a emissão de voláteis, tornando o processo atraente comercialmente;

Observaram-se rendimentos maiores na produção de carvão utilizando a serragem como matéria-prima, tal resultado se deve à quantidade de elementos constituintes existente, como lignina, celulose e hemicelulose e que de acordo com a literatura a madeira possui percentuais mais elevados de lignina, justificando o maior rendimento.

A carbonização em leito fixo das biomassas residuais em regimes de alta pressão mostrou ser um processo térmico alternativo para o aproveitamento integral e mais nobre de resíduos que, em grande parte, não possuem uma destinação adequada e, portanto, agrega valor ao negócio.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos o CNPq, Embrapa Amazônia Oriental, Universidade de Brasília e Universidade da Amazônia por subsidiar todo o corpo técnico e material necessária para a realização dessa pesquisa.

## REFERÊNCIAS

BENITES, V. M.; TEIXEIRA, W. G. T.; REZENDE, M. E. R.; PIMENTA, A. S. P. **Utilização de Carvão e Subprodutos da Carbonização Vegetal na Agricultura: Aprendendo com as Terras Pretas de Índio**. Acessado em: <[http://www.biochar.org/joomla/images/stories/Cap\\_22\\_Vinicius.pdf](http://www.biochar.org/joomla/images/stories/Cap_22_Vinicius.pdf)>. 15.11.2010.

GÓMEZ, A.; KLOSE, W.; RINCÓN, S. **Pirólisis de Biomassa: Cuesco de Biomasa**. Departamento de Ingeniería Mecánica Y Mecatrónica, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colômbia, Bogotá, Colômbia e Instituto de Ingeniería Térmica, Facultad de Ingeniería Mecânica. Universidad de Kassel. Kassel Alemanha. 2008. 123 p.

NOGUEIRA, LUIZ AUGUSTO HORTA; LORA, ELECTRO EDUARDO SILVA. **Dendroenergia - Fundamentos e Aplicações** - 2ª Edição. Editora: Interciência. 2003. 199 p.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, V. S.; ROTHMAN, H.; **Uso da Biomassa para a Produção de Energia na Indústria Brasileira**. Tradutores: José Dilcio Rocha e Maria Paula G. D. Rocha. Campinas, SP: Editora Unicamp, 2005