



UTILIZAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS VEGETAIS

Waldir Ferreira Quirino

Eng. Florestal, Ph.D.

waldir@lpf.ibama.gov.br



**LABORATÓRIO DE PRODUTOS FLORESTAIS
LPF/IBAMA**

Apresentação

O Brasil Joga Limpo é um programa de governo elaborado pelo Ministério do Meio Ambiente, com a finalidade de desenvolver ações de melhor gestão dos resíduos nas cidades e no campo por meio de um trabalho conjunto e participativo, integrando governo e comunidade com vantagens no aspecto ambiental e social dessas comunidades. O programa Brasil Joga Limpo é um dos 305 programas que integram o Plano Plurianual 2000-2003, o Avança Brasil. São objetivos deste programa: evitar a geração de resíduos, aumentar a reciclagem e o reaproveitamento destes, garantindo destinação adequada a todos os resíduos, em consonância com as normas ambientais.

Esta publicação é parte integrante de um conjunto de oito módulos que formam o curso “Capacitação de Agentes Multiplicadores em Valorização da Madeira e dos Resíduos Vegetais”. Esta ação foi proposta pela Secretaria de Qualidade Ambiental nos Assentamentos Humanos – SQA - ao IBAMA, que o está executando por meio do seu Laboratório de Produtos Florestais – LPF.

O conteúdo do curso está lastreado na experiência desse Laboratório, acumulada em vários anos de pesquisa e aborda o correto processamento da madeira utilizando tecnologias adequadas. Com isso, se pode inibir significativamente a geração de resíduos, além de possibilitar a reciclagem e transformação dos mesmos em novas matérias primas ou insumos agrícolas, gerando energia e também uma infinidade de outros produtos de boa qualidade.

Dentro deste programa de capacitação serão apresentadas as tecnologias de manejo de resíduos, exemplificando, também, os processos disponíveis no Brasil e em outros países. Essas tecnologias podem ser utilizadas para valorização de resíduos da indústria madeireira, bem como para todos os resíduos agrícolas.

A expectativa é que, integrando gestão ambiental com valorização e conservação dos recursos naturais e, ao mesmo tempo, considerando possíveis adequações em função das características regionais, este material favoreça a adoção de tecnologias. E assim, gradativamente, se consiga promover um maior e melhor aproveitamento dos potenciais agro-florestais, de maneira a reduzir a geração de resíduos, agregar valor aos produtos florestais e agrícolas, gerando empregos e promovendo avanços no bem estar social e ambiental das comunidades.

Eduardo Sales Novaes
Secretário de Qualidade Ambiental nos
Assentamentos Humanos do
Ministério do Meio Ambiente

INTRODUÇÃO

Os primeiros homens a conseguir dominar o fogo certamente fizeram isso queimando madeira. A partir daquele instante a lenha passou a levar luz e calor para as mais desconfortáveis das cavernas. Aquela etapa foi decisiva na evolução da nossa espécie e na maneira de viver do homem, permitindo também o desenvolvimento das primeiras ferramentas, fundições primitivas e, infelizmente, armas.

Mesmo hoje, a madeira continua sendo a mais importante fonte de energia no mundo.

Ainda nas cavernas o homem percebeu que queimando o carvão residual das fogueiras ele obtinha mais calor e menos fumaça. O domínio da energia e o desenvolvimento de técnicas apropriadas, permitiram então a dominação do homem pelo homem e promovendo alterações significativas no seu ambiente natural.

Enquanto o consumo diário de energia do homem primitivo era de 2.000 kcal, o homem contemporâneo de países desenvolvidos consome 300.000 kcal por dia. A demanda por energia cresceu de uma forma assustadora nos últimos séculos.

A fundição dos metais, a construção de máquinas, o desenvolvimento da agricultura, a construção de canais e modificação dos cursos d'água, a formação de agrupamentos urbanos e industriais, o acúmulo de resíduos e esgotos e o desflorestamento, mostram que o domínio da energia e da tecnologia distancia o homem da sua condição integrada a natureza para um modificador perspicaz do seu habitat.

Certamente, temos algo a resgatar do nosso “desenvolvimento”.

Fazendo a reengenharia do fogo ou, pelo menos, analisando o emprego energético dos nossos resíduos vegetais, talvez possamos corrigir algumas das trajetórias mal empreendidas pelos nossos antecessores.

RESÍDUOS VEGETAIS – MADEIRA - ENERGIA

Questões básicas sobre resíduos

1 – O que é resíduo?

É tido como resíduo aquilo que sobra de um processo de produção ou exploração, de transformação ou de utilização. É também toda substância, material, ou produto destinado por seu proprietário ao abandono.

2 – Quais são os tipos de resíduos gerados na sociedade moderna?

A Comunidade Européia classifica os resíduos em:

-Resíduos urbanos ou também chamados de domésticos;

-Resíduos industriais:

-resíduo industrial banal – não possui aditivos tóxicos, como a madeira sem tratamento;

-resíduo industrial especial:

-inerte – não libera nem reage com outro tipo de substância;

-último – sem possibilidades de transformação como as cinzas;

-tóxico ou perigoso – libera substâncias tóxicas durante o tratamento ou estocagem, exemplo do resíduo nuclear.

Devido a essa variedade de resíduos o seu controle só pode ser feito através de uma legislação homogênea. Na Europa, a legislação específica sobre os resíduos, é aplicada à indústria ou ao gerador do resíduo, e não a um tipo de resíduo.

Portanto, como os resíduos são classificados e codificados, a indústria produtora de um determinado tipo de resíduo só funcionaria quando dispusesse dos mecanismos adequados para dar um fim correto e estabelecido a esses resíduos. Todo resíduo tem uma origem, um dono, ou melhor, um responsável gerador sobre o qual a legislação deveria atuar.

Em vários países da Europa é cobrada uma taxa por tonelada de resíduo produzido criada justamente para incentivar os processos de valorização dos mesmos. Os recursos advindos da cobrança dessa taxa ajudam a financiar projetos de pesquisa sobre aproveitamento e tratamento dos resíduos, criando um estímulo à sua utilização ou reciclagem.

Valorizando um resíduo elimina-se uma despesa, além de possibilitar uma renda a mais para a indústria geradora, agregando valor à produção.

No Brasil, uma indústria madeireira ao se estabelecer, não é obrigada a dizer o que vai fazer do resíduo gerado, podendo desta maneira produzi-lo sem compromisso. Depois do resíduo produzido, fica com a sociedade e os organismos governamentais de gestão ambiental o ônus de procurar uma forma de dar fim ou utilização ao resíduo.

Classificação e utilização dos resíduos

3 – O que são resíduos ligno-celulósicos?

São resíduos assim chamados porque contém na sua constituição lignina e celulose sendo, em sua maior parte, de origem vegetal. Como exemplo podemos citar todos rejeitos oriundos da madeira ou da indústria madeireira, até mesmo móveis velhos, restos em madeira de demolições, resíduos de culturas agrícolas ou de beneficiamento de produtos agrícolas, postes, estacas, dormentes, paletes e embalagens em fim de vida etc. A exploração florestal é uma grande fonte de resíduos ligno-celulósicos. Até mesmo no lixo urbano é encontrada uma porcentagem significativa de resíduos ligno-celulósicos proveniente de utensílios e embalagens em madeira.

4 – Quais são as maneiras de utilização ou valorização de um resíduo ligno-celulósico?

Um resíduo ligno-celulósico pode ser reciclado, reutilizado como matéria prima em um processo diferente daquele de origem. Por exemplo, pode ser transformado em partículas e constituir-se em painéis à base de madeira. Pode ser também utilizado energeticamente na produção de calor, de vapor ou de eletricidade em grupos geradores, ou termelétricas.

Outro aproveitamento desse resíduo é sob a forma de combustível sólido, como o carvão vegetal. Pode ainda ser gaseificado transformado-se em um combustível gasoso ou utilizado como gás de síntese.

A figura a seguir nos dá uma noção geral das possibilidades de aproveitamento dos resíduos ligno-celulósicos.

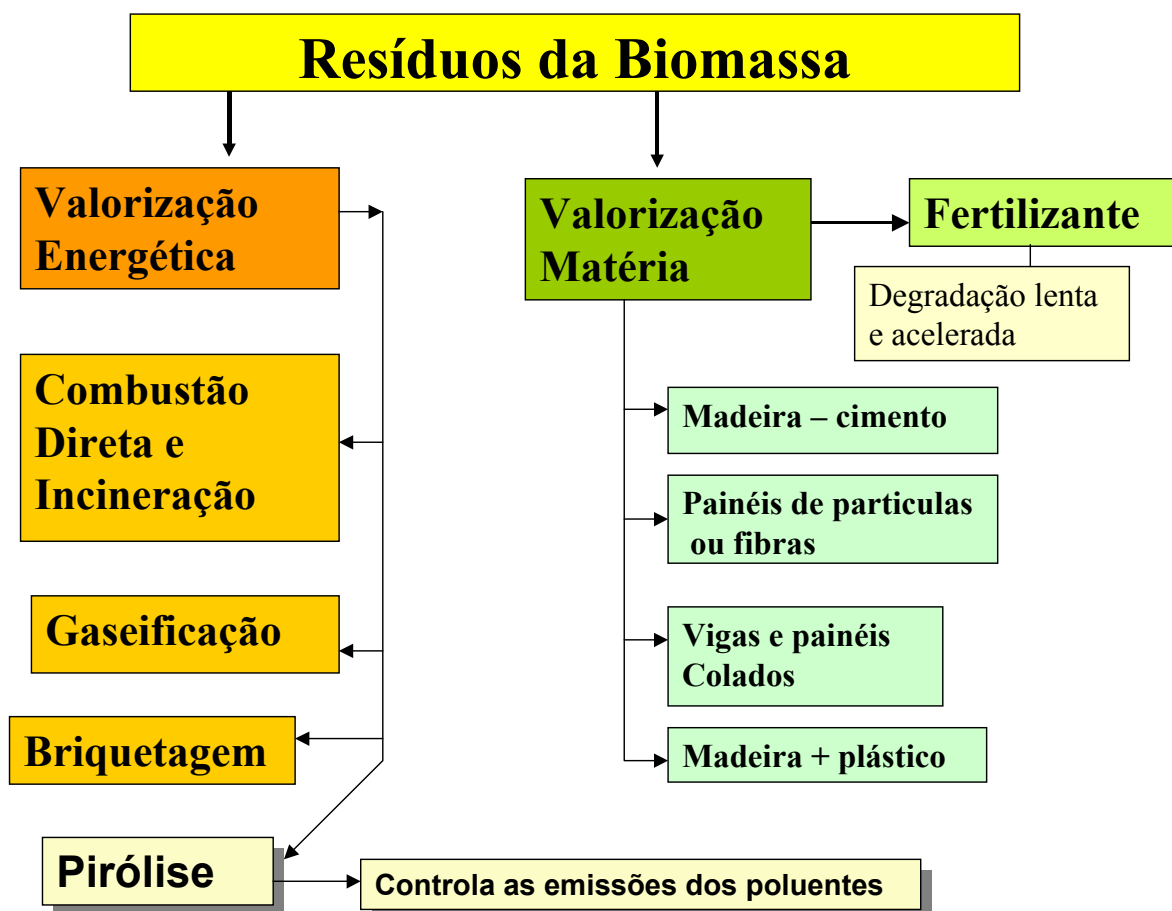


Figura 1 – Possibilidades de aproveitamento dos resíduos ligno-celulósicos.

5 – Qual é a nomenclatura básica no tratamento de um resíduos?

Eliminação: ação de se desfazer de um resíduo sem tirar nenhum proveito, como por exemplo, a incineração sem recuperação de energia.

Recuperação: ato de aproveitar total ou parcialmente um resíduo, através de processos adequados, reduzindo assim o volume destinado à eliminação.

Valorização: está ligada a alguma ação de desenvolvimento de processo tecnológico, podendo ocorrer através de diversas maneiras, como reciclagem, reutilização, regeneração etc.

A indústria deve ser incentivada a abandonar a **eliminação** promovendo a **recuperação** com a **valorização** dos seus resíduos. E, uma forma bastante objetiva de se conseguir isso, é através da normalização e da legislação específicas.

6 – Existem outros resíduos que podem ser aproveitados semelhante aos resíduos ligno-celulósicos?

Sim, os resíduos de papel, papelão e plásticos de embalagens oriundas do lixo também podem e devem ser aproveitados. O papel e o papelão são constituídos de celulose mais alguns aditivos. Já os plásticos são constituídos de longas cadeias poliméricas. Tanto o papel usado como os plásticos podem ser reciclados, mas, em uma segunda hipótese podem também ser valorizados energeticamente assim como a madeira.

7 – Quais seriam as regras básicas para tratamento dos resíduos?

a-Prever, limitar e administrar a produção de resíduos, reduzindo sua nocividade.

b-Assegurar a reutilização, a reciclagem e a valorização dos resíduos.

c-Controlar a eliminação dos resíduos, os fluxos e a sua qualidade.

d-Limitar a estocagem definitiva somente aos resíduos finais.

Um resíduo não poderá ser eliminado por incineração, neutralizado quimicamente, descartado ou estocado subterraneamente desde que sua reciclagem ou valorização possa ser feita a um custo economicamente aceitável. Essa é uma norma da Comunidade Européia que deveríamos adotar. Um resíduo só poderá ser descartado ou estocado subterraneamente quando as outras demais formas de aproveitamento não possam ser empregadas.

A melhor alternativa para uma gestão adequada dos resíduos é se trabalhar na sua origem, utilizando-se tecnologias limpas, buscando sua valorização e lutando contra o desperdício e só utilizando a estocagem como última opção.

Por isso ter bem claro o conceito de resíduo final é extremamente importante. Resíduo final é aquele para o qual não se dispõe de mais nenhuma

opção técnica e economicamente viável de aproveitamento. Só aí é que se deve recorrer ao descarte ou estocagem do resíduo.

A gestão dos resíduos envolve fases ou etapas diferentes e ao mesmo tempo básicas, iniciando-se pelo estudo e caracterização precisa, da definição da sua origem e do fluxo dos produtos. O estudo técnico e econômico das soluções alternativas para produção, para administração e eliminação dos resíduos.

8 – Quais as principais propriedades e características dos resíduos?

Os resíduos ligno-celulósicos geralmente apresentam baixa densidade, elevado teor de umidade e são dispersos geograficamente, encarecendo a coleta e o transporte e dificultando o aproveitamento energético. Apresentam na maioria das vezes, uma grande diversidade de formas e granulometria variada. Portanto, uma característica bastante comum dos resíduos é a heterogeneidade.

Os resíduos também podem estar associados a outros produtos químicos, como por exemplo, a madeira associada com tintas, resinas, vernizes, produtos de conservação. Isso pode conferir a esses resíduos, características de emissões contendo gases altamente tóxicos durante a valorização energética.

9 – Quais são as tecnologias que permitem transformar os resíduos ligno-celulósicos em energia ou em combustível?

Vários são os procedimentos que permitem transformar os resíduos em energia. A queima direta pode gerar calor e é empregada para produzir vapor. A gaseificação pode gerar um gás combustível ou um gás de síntese. A carbonização produz um carvão vegetal energético ou de termo-redução na indústria siderúrgica, ou um carvão ativo.

Vejam abaixo algumas dessas possibilidades.

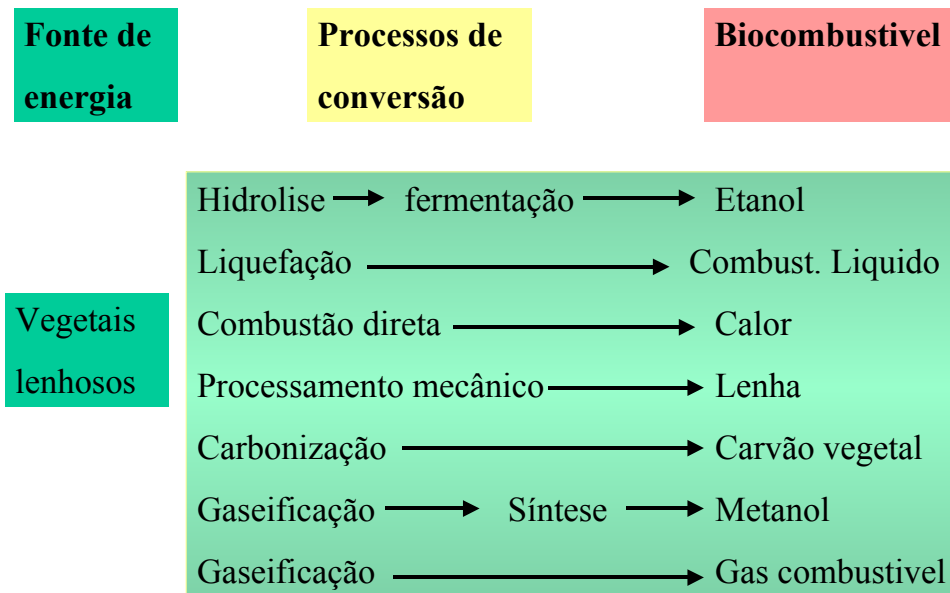


Figura 2 – Processos de transformação dos resíduos em biocombustível.

10 – Quais as maneiras para utilização energética dos resíduos?

A utilização energética dos resíduos pode se dar através da:

- queima direta, em caldeiras, como lenha ou resíduo, gerando calor ou vapor de processo;
- queima direta em termelétrica para produção e comércio de energia elétrica;
- queima direta em queimadores de partículas como ocorre na indústria de cerâmica vermelha;
- compactação de resíduos, transformando-os em briquetes para posterior utilização como lenha, em todos processos que tradicionalmente já utilizam lenha, sejam padarias, pizzarias, caldeiras em geral;
- produção de carvão utilizado comumente para carbonização de lenha;
- carbonização dos resíduos sob a forma de partículas;
- produção de carvão ativo, a partir de finos de carvão ou de finos de madeira, através de ativação física ou química.

11 – Qual a influência da umidade no aproveitamento energético dos resíduos ligno-celulósicos?

A influência é negativa. A umidade reduz a quantidade de energia global produzida durante a combustão. Na prática, a madeira seca oferece combustão mais rápida e melhor rendimento na carbonização. Uma parte da energia contida nos resíduos é utilizada para aquecer e vaporizar essa umidade. São necessárias 580 cal para evaporar 1 g de água. Se a água estiver fortemente ligada à madeira, é necessário mais energia para deslocar essa umidade.

12 – O que é Poder Calorífico?

É a quantidade de calorias liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível. A unidade mais usada no Brasil para combustíveis sólidos é a kcal/kg ou cal/g. Para combustíveis gasosos é kcal/m³. Sua determinação pode ser teórica pelo conhecimento da composição química do combustível ou experimental com o auxílio da bomba calorimétrica.

O poder calorífico superior (PCS) é aquele obtido na bomba calorimétrica a partir do combustível seco. O poder calorífico inferior (PCI) é aquele calculado a partir do PCS considerando o teor de umidade a que se encontra o combustível. O poder calorífico inferior retrata melhor a qualidade do combustível. O calor de vaporização da água é de 580 kcal/kg. A diferença entre PCI e PCS está na quantidade de água presente na madeira, ou seja, no calor necessário para vaporizar esta água (580 kcal/kg).

Em relação a uma madeira seca, com PCS de aproximadamente 4800 kcal/kg, pode-se utilizar a seguinte relação para obter o PCI a uma determinada umidade:

$$\text{PCI} = \frac{(\text{PCS} - 25,11 \times \text{H})}{(100 + \text{H})} \times 100$$

onde:

H = umidade da madeira base peso seco.

Por exemplo, uma madeira com PCS de 4800 kcal/kg a 25 % de umidade terá um PCI = 3.337,8 kcal/kg.

O calor oferecido pela combustão da madeira vai variar de acordo com os seus constituintes. Entretanto, girará em torno de 4.700 a 5.000 Kcal/Kg da madeira seca a 0% de umidade, independente de sua espécie. Os resíduos ligno-celulósicos apresentam PCS semelhante à madeira, variando em função da contaminação do resíduo.

Eucalyptus	4.850 kcal/kg (superior)		
turfa	5.000 kcal/kg (inferior)		
linhita	6.250	“	“
coque	8.500	“	“
antracito	8.000	“	“
carvão de madeira	7.250	“	“
carbono puro	8.100	“	“
hidrogênio	34.000	“	“

Fonte : BRIANE e DOIT, 1985

Figura 3 – Poder caloríficos de alguns materiais

Podemos visualizar acima exemplos de poder calorífico de alguns combustíveis.

Caloria é a quantidade de calor necessária para elevar de 1°C 1 grama de água (14,5 a 15,5 °C).

A velocidade de formação do carvão em uma peça de madeira conforme procedimento da norma ASTM E-119 é constante e igual a 38 mm/h. Uma peça roliça de madeira de 15 cm de diâmetro submetida a carbonização levaria aproximadamente 2 horas para ser transformada em carvão.

A combustão de partículas de madeira (na forma de cepilho) em um combustor desenvolvido em laboratório (QUIRINO, 1988), apresenta um pico

de degradação (velocidade máxima de combustão) entre 5 e 7 minutos. Portanto, o tempo de queima depende da forma do combustível madeira e do equipamento onde está sendo efetuada esta queima (combustão), havendo vários fatores que influenciam uma reação de combustão.

13 – O que é densidade energética de um resíduo?

Densidade energética é a quantidade de energia por unidade de volume de um combustível.

Por exemplo, 1 estéreo (st) de lenha possui 300 kg, segundo o Balanço Energético Nacional – BEM - cada kg de lenha catada possui 3.300 kcal/kg. Portanto, 1 st de lenha (1 m³), possui

$$300 \text{ kg} \times 3.300 \text{ kcal/kg} = 990.000 \text{ kcal}$$

Se esta lenha for picada e compactada em uma briquetadeira, 1 st de briquetes terá aproximadamente 700 kg. Pelas razões expostas anteriormente cada kg de briquete terá um poder calorífico de 4.400 kcal/kg. Portanto, 1 st de briquete possui

$$700 \text{ kg} \times 4.400 \text{ kcal/kg} = 3.080.000 \text{ kcal}$$

Se dividirmos a quantidade de energia de 1 st de briquetes pela quantidade de energia de 1 st de lenha, obteremos uma relação de:

$$3.080.000 \text{ kcal} : 990.000 \text{ kcal} = 3,11$$

Isto significa dizer que 1 st de briquetes terá 3,11 vezes mais energia do que 1 st de lenha. Portanto a densidade energética do briquete é, comparativamente, três vezes superior à da lenha.

14 – O que é carvão vegetal e quais suas características e propriedades principais?

É o produto resultante da combustão incompleta da madeira, o carvão é também definido como uma pirólise que proporciona uma policondensação energética com características bem definidas:

- densidade bem inferior à da madeira;
- alta reatividade;
- baixa resistência mecânica, friável mas duro;
- baixo teor de cinzas.

Produtos da pirólise da madeira

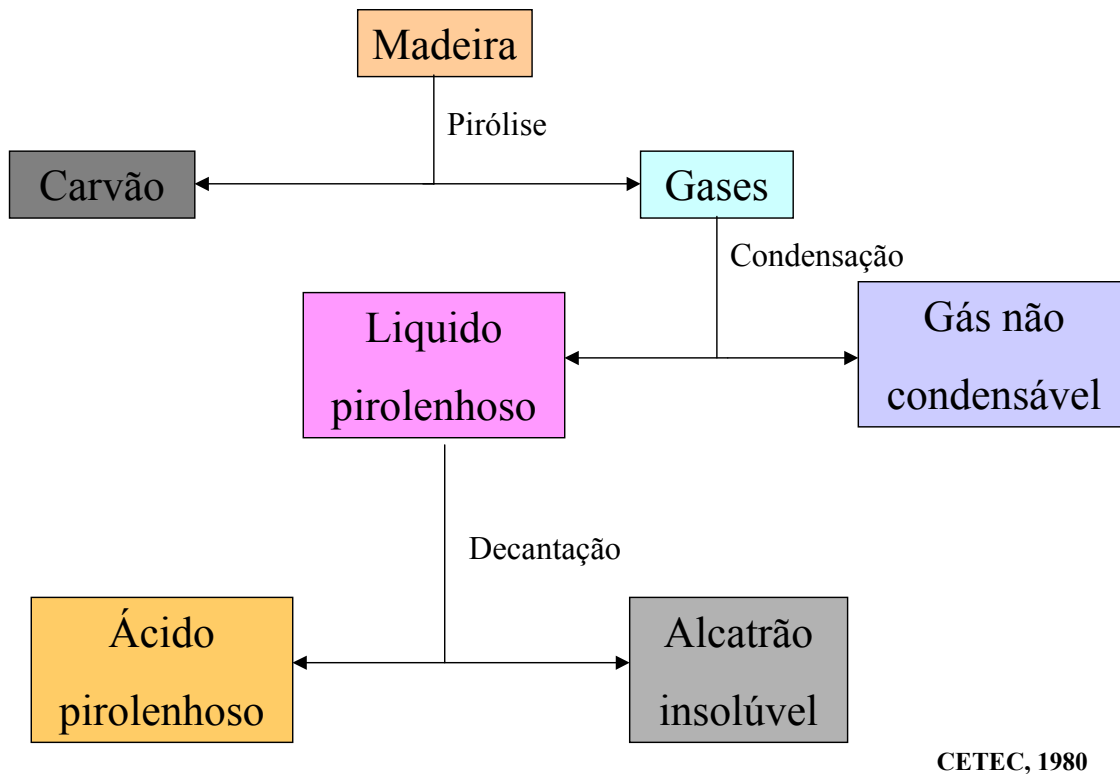


Figura 4 – Degradação térmica da madeira e produtos

Fatores que influem na produção e qualidade do carvão vegetal:

Na madeira:

- densidade da madeira;
- umidade da madeira;
- dimensão das peças de madeira;

No processo:

- temperatura final de carbonização;

- velocidade de aquecimento;
- controle da oxidação.

Tabela 1 - Composição elementar e rendimento de carvão em função da temperatura de carbonização.

Temperatura de Carbonização (°C)	posição Elementar			Tendimen- to (%)
	C	H	O	
200	52,3	6,3	41,4	91,8
300	73,2	4,9	21,9	51,4
400	82,7	3,8	13,5	37,8
500	89,6	3,1	6,7	33,0
600	92,6	2,6	5,2	31,0
800	95,8	1,0	3,3	26,7
1000	96,6	0,5	2,9	26,5

Fonte: WENZEL, 1970.

Tabela 2 - Influência da densidade da madeira no conteúdo energético do carvão:

Densidade da madeira (g/cm ³)	Densidade a granel da lenha (kg/st)	Densidade energética da madeira (Mcal/st)
0.61	332	1.371
0.71	386	1.633
0.76	413	1.756

Existe um ganho de 20 % de energia por estéreo com o aumento da densidade da madeira

Tabela 3 - Etapas de geração de finos no processo do carvão vegetal

Carvoaria	- 3.7 %
Carregamento/transporte	- 5.8 %
Armazenagem	- 6.3 %
Peneiramento siderurgia	- 9.4 %
TOTAL	- 25,2%

Fonte: CETEC, 1982.

Evolução da carbonização durante a pirólise da madeira

Temperatura	Reações e produtos
Até 200 °C	Período de secagem, perda de umidade e degradação inicial da lignina e da hemicelulose.
200 a 280 °C	Degradação componentes menos estáveis, prod. CO ₂ , CO, vapor H ₂ O, ácido acético e CH ₄ .
270 - 300 °C	Reações exotérmicas, madeira torrada, forte prod gases ácido acético, álcool metílico frações leves de alcatrão.
300 - 600 °C	Diminui volume de gases, frações médias e pesadas de alcatrões, prod carvão.
Acima de 300 °C	Fase do hidrogênio, dissociação do carvão, gases com elevado teor de hidrogênio.

15 – Quais os tipos de fornos usados na produção do carvão vegetal?

Inúmeros são os tipos de fornos para produção de carvão vegetal, o que torna quase impossível citar um a um, O importante é reconhecer todas as etapas do processo de carvoejamento que são comuns a todos eles. Estas etapas foram descritas na questão anterior, sendo distinguidas em função das reações que ocorrem a diferentes intervalos de temperatura.

Os fornos podem ser construídos em alvenaria, de tijolos maciços, como é o procedimento mais difundido no Brasil, ou em fornos metálicos com formas e tamanhos bastante variados.

As figuras a seguir dão uma idéia da diversidade de formas dos fornos em alvenaria e metálicos.

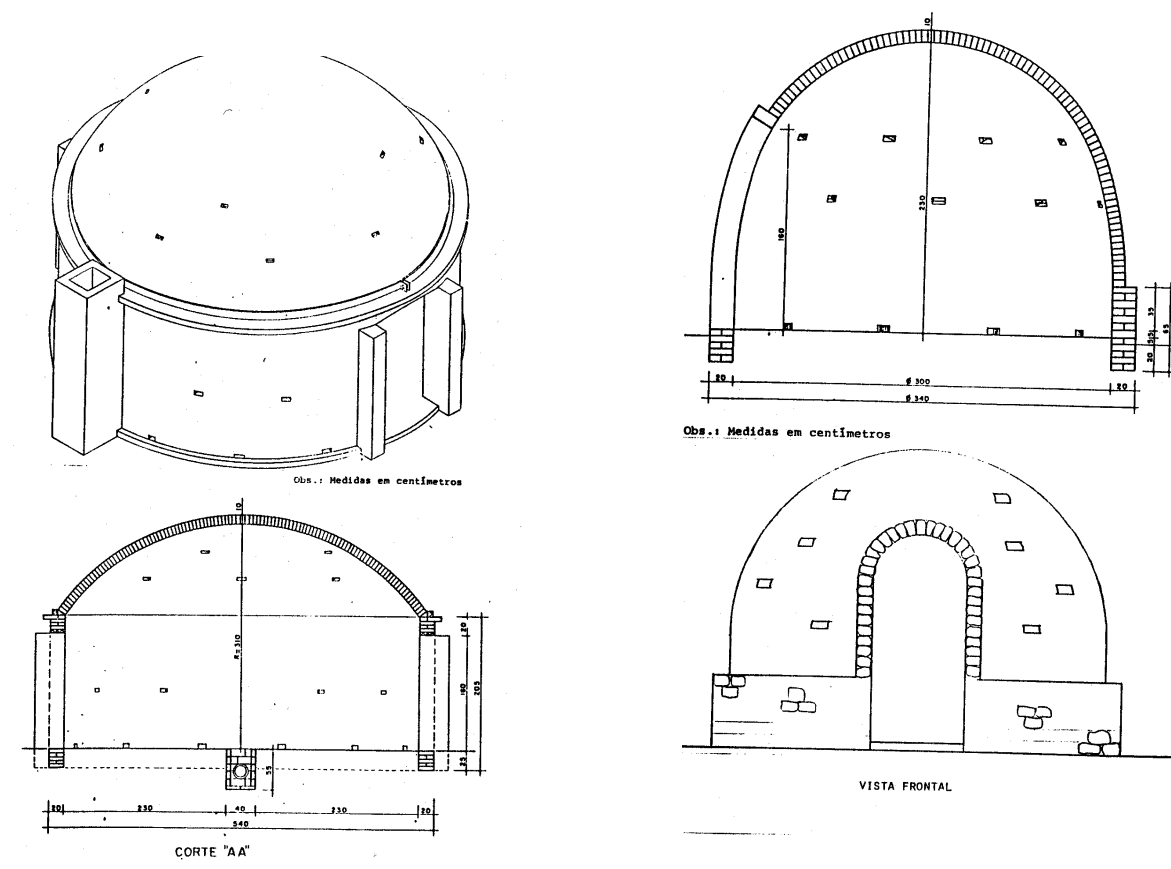


Figura 5 – Fornos de alvenaria para produção de carvão vegetal.

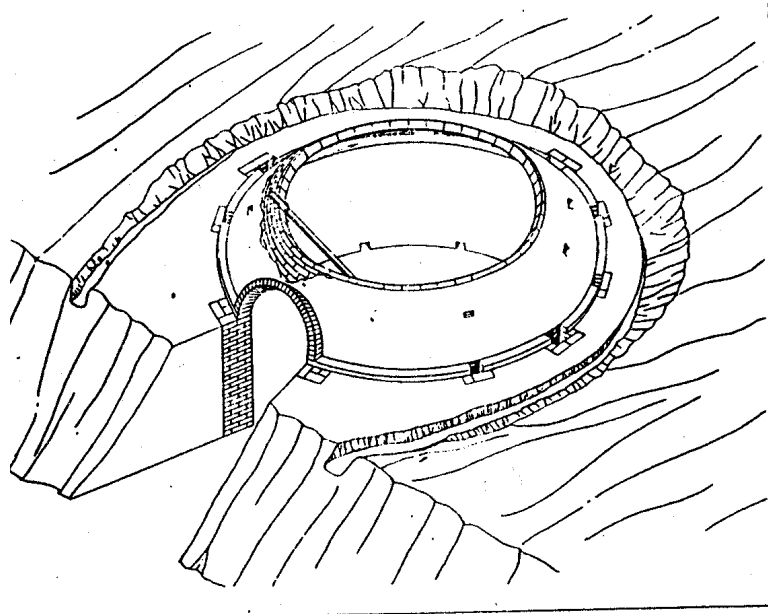


Figura 6 – Forno de encosta para produção de carvão vegetal muito utilizado em regiões acidentadas, como Minas Gerais.



Figura 7 – Forno metálico de anéis desmontáveis.

Podemos ainda dispor de fornos de carbonização contínua como forno Lambiote Francês, que tem o princípio construtivo baseado no esquema da Figura 8.

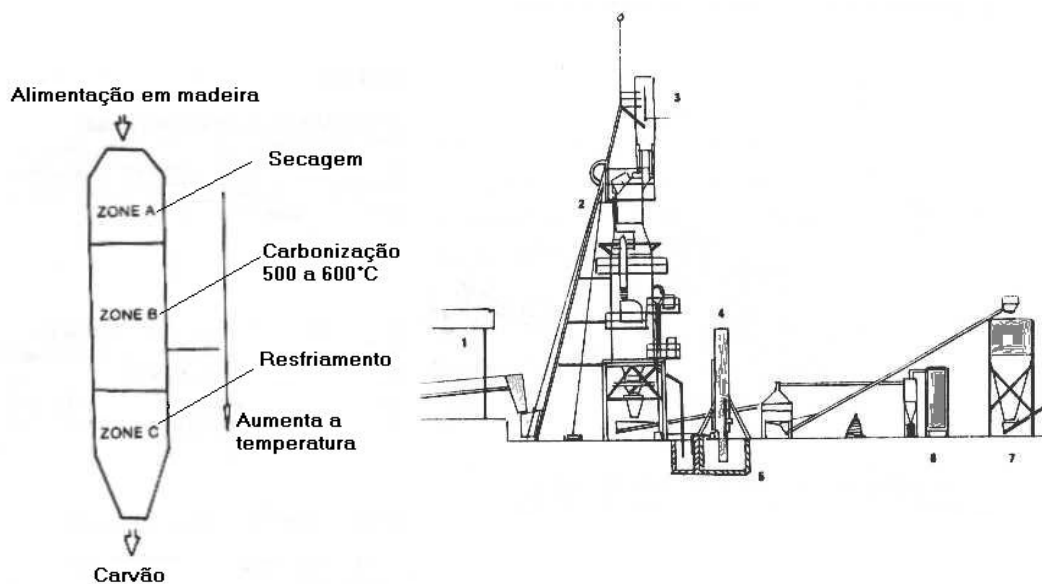


Figura 8 –Esquema de forno Lambiote construído na França, utilizado na produção de carvão vegetal em processo contínuo (fonte: CTFT-CIRAD).

16 – Quais são os processos de carvoejamento disponíveis para resíduos?

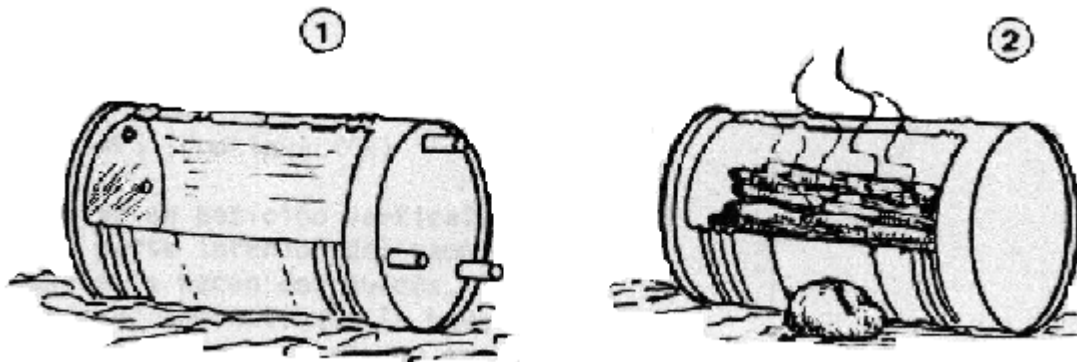
No processo de carvoejamento podem ser utilizados equipamentos mais simples ou mais sofisticados, dependendo de cada caso.

Os fornos mais simplificados e populares (ilustrados nas figuras 9 a 16) são utilizados em alguns lugares do pacífico sul, principalmente para fazer carvão vegetal de cascas de cocos, segundo cita o International Labour Office Geneva (fuelwood and charcoal preparation, Switzerland, 1989). Pela simplicidade dos mesmos, podem ser construídos e testados no próprio local sem necessidade de transporte dos resíduos.

A seguir veremos os principais tipos de fornos simplificados e sua maneira de operação.

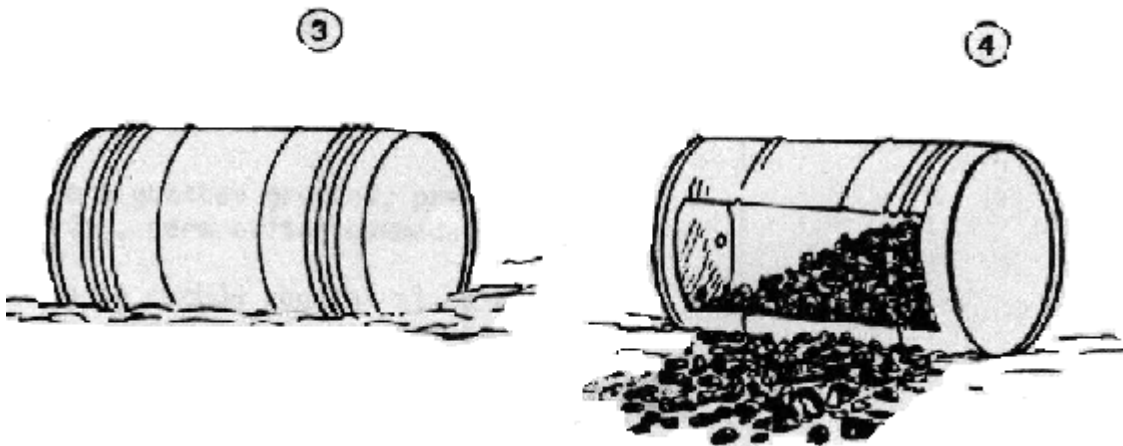
Instruções de montagem e operação:

1. Em um tambor de óleo de 200 litros, de boa qualidade, faz-se uma abertura de 20cm conforme a figura 9;



Figuras 9 e 10 – Enchimento do forno e início da carbonização.

2. Com o tambor deitado sobre o solo, com a abertura paralela à direção do vento e a 20 cm do solo, colocam-se gravetos e lenhas finas para dar início a carbonização. A seguir ergue-se a abertura 10 cm e adicionam-se cascas de cocos. Repete-se esta operação até o tambor estar completamente cheio de cocos incandescentes e a abertura alcançar a posição superior;
3. Cobre-se a abertura do tambor com a chapa que foi recortada do tambor, prendendo-a com arame. Gira-se o tambor de maneira que a abertura que foi fechada com a tampa fique virada sobre o solo. Vedando-se com terra qualquer entrada de ar, como se vê na figura 11. Deixa-se o tambor nessa posição por aproximadamente 5 horas, até esfriar.



Figuras 11 e 12 – Carvoejamento, esfriamento e retirada do carvão dos tambores

4. Iniciando-se a carbonização pela manhã, já no final da tarde pode-se abrir e recolher o carvão.
5. Outra possibilidade é utilizar os tambores na posição vertical, como nas figuras 13, 14 e 15.

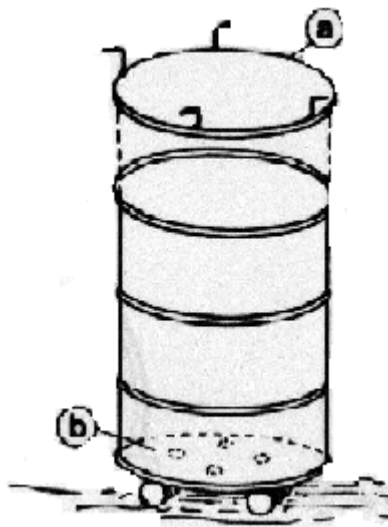
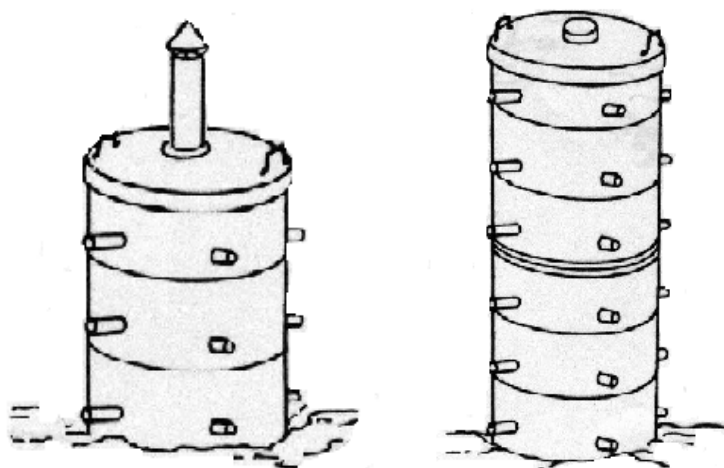


Figura 13 – Tambor de 200 litros com tampa removível e orifícios no fundo.

Na figura 13, a lateral do tambor é convertida em tampa, sendo feita na outra lateral, perfurações para acesso de ar de combustão (grelha). Inicia-se a combustão pelo fundo do tambor, alimentando-o em seguida com cascas de coco.

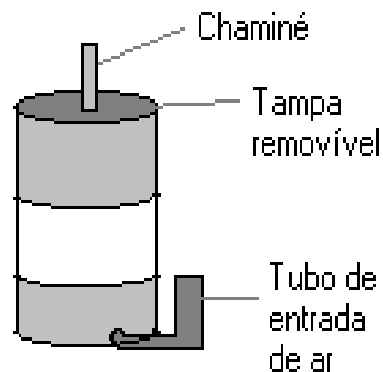
Quando o tambor estiver pela metade de brasas vivas, veda-se a parte inferior com terra. Aguarda-se o final da carbonização e resfriamento.



Figuras 14 e 15 – Tambor metálico de 200 litros com chaminé, orifícios laterais e no fundo, mostrando a vedação do fundo com terra. Dois tambores juntos aumentando a capacidade de produção.

Pode-se usar também tambores verticais com aberturas laterais para entrada de ar, como mostram as figuras 14 e 15. Estas aberturas têm funções semelhantes aos “tatus” e “baianas” dos fornos de alvenaria. À medida que elevam-se o nível das brasas dentro do tambor, selam-se as aberturas com argila. Como se observa na figura 15, pode-se também utilizar dois tambores soldados.

Figura 16 – Sugestão do Laboratório de Produtos Florestais – LPF - de forno de tambor de 200 litros, operado como o forno da figura 13, sem o fundo do tambor.



Além desses podemos citar outros processos que permitem carbonizar resíduos em forma de partículas e que são utilizados em outros países (Figuras 17 e 18).

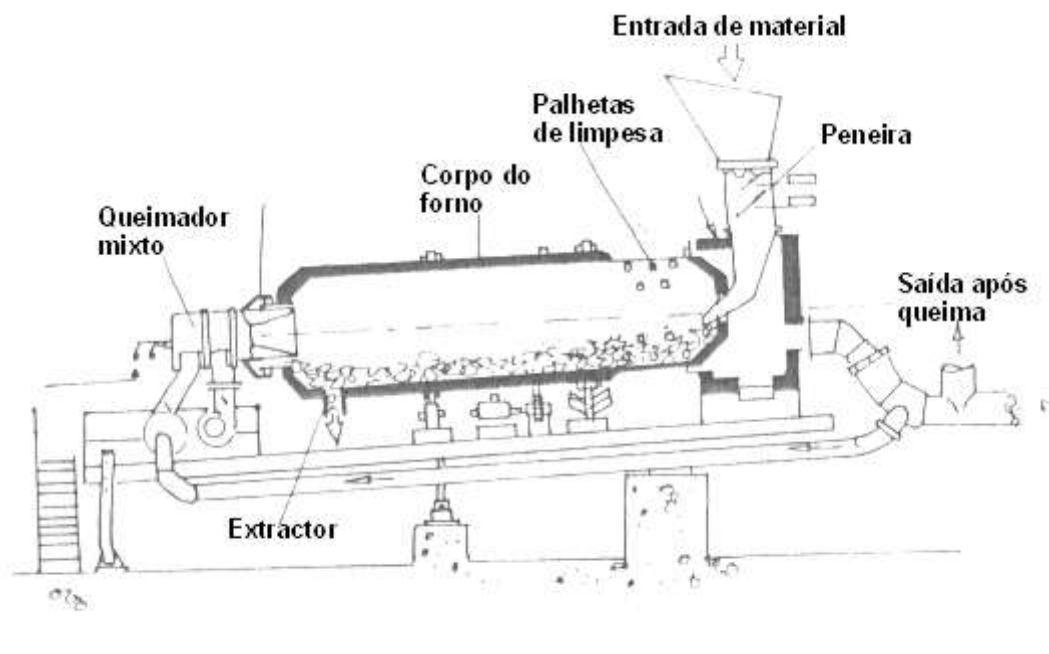


Figura 17 – Forno contínuo francês tipo Pillard para carbonização de resíduos (*fonte: CTFT, CIRAD*).

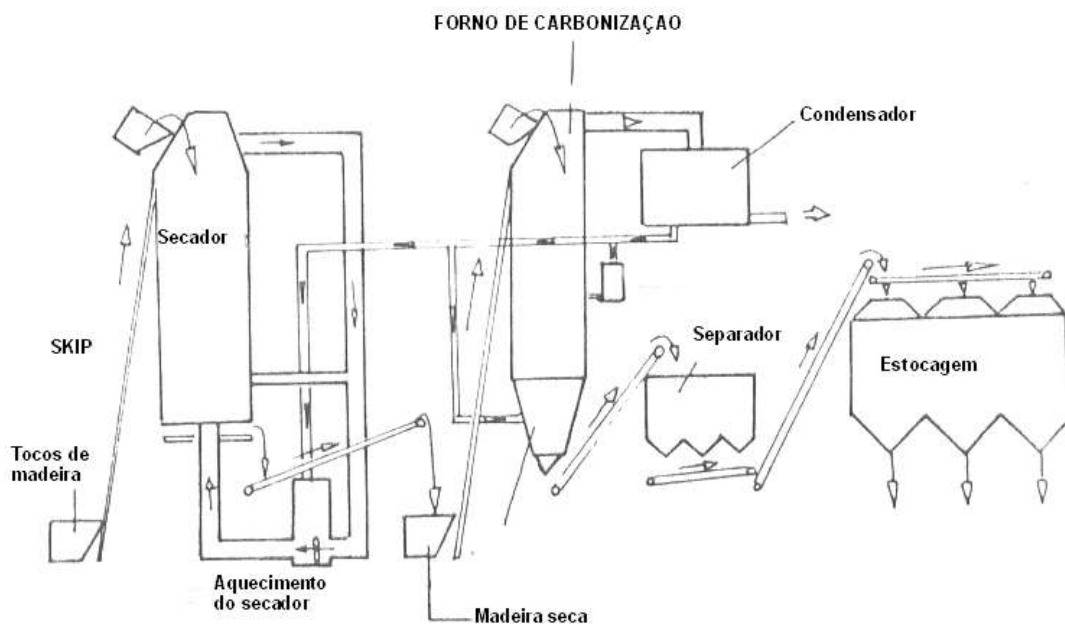


Figura 18 – Forno contínuo tipo Lambiote para carbonização de madeira em pedaços (fonte: CTFT, CIRAD).

17 – O que é carvão ativo e para que serve?

O carvão ativo é um adsorvente universal, bastante difundido, com usos destacados no refino de açúcar, tratamento de água, envelhecimento de bebidas, recuperação de solventes, purificação de ar, tratamentos medicinais, produção de resinas sintéticas, purificação de resíduos industriais, além de aplicações analíticas de laboratório como análises cromatográficas, etc.

O carvão vegetal é oriundo da formação de cristalitos grafiticos, elementares, com disposição irregular, bloqueado estruturalmente pelos carvões amorfos e alcatrões, durante um processo de pirólise convencional. A ativação do carvão consiste em eliminar estes bloqueios pelo tratamento físico ou químico.

A capacidade de adsorção do carvão ativo é determinada pela estrutura porosa e pela composição química. A adsorção do carvão ativo pode ser física ou química.

Métodos de análise de eficiência:

- número de iôdo;
- isoterma de Freudlich e isotermas teóricas
 $x/m = kcE1/n$ onde x = massa adsorvida
 m = massa adsorvente, c = concentração adsorbato,
 k e n = constantes do sistema.

Processos de ativação do carvão:

- ativação química = carbonização + agente ativante;
- ativação física = é o carvão tratado com agentes oxidantes (ar, CO₂, vapor H₂O super aquecido);

Matérias-primas:

- resíduos de madeira, resíduos da exploração florestal,
- resíduos de licores sulfito e linhita, cascas vegetais em geral, antracito, celulose, etc.;

Parâmetros do processo:

- temperatura, tempo de ativação, tipo de forno, agente ativante.

Um aspecto importante do carvão ativo é que ele pode ser produzido a partir de resíduos de madeira ou finos residuais do processo de produção de carvão vegetal, que como vimos, pode chegar até 25 % da produção total de carvão. Apesar da grande disponibilidade desses resíduos no Brasil, o carvão ativo continua ainda a ser importado.

18 – O que é briquetagem de resíduos?

A briquetagem é um processo de **densificação de resíduos**.

Todo resíduo de origem vegetal pode ser compactado pela briquetagem, bastando atender às necessidades de granulometria e teor de umidade exigido pelo processo.

Esse processo possui a vantagem de transformar um resíduo de baixíssima densidade em uma **lenha de alta qualidade**. O quadro a seguir da uma idéia da compactação alcançada para alguns resíduos.

Tabela 4 – Densidade e poder calorífico de de resíduos e dos briquetes correspondentes.

Tipo de Resíduo	Densidade natural do resíduo (kg/m ³)	Densidade de um briquete (g/cm ³)	Densidade à granel do briquete (kg/m ³)	Poder calorífico (kcal/kg)
Palha de milho	33	0,91	550	3570
Pó de serra	274	1,22	570	4880
Aparas de madeira	112	1,16	565-615	4800
Usina de compensado	132	0,83	560	4424
Casca de arroz	150	1,28	610	3730
Bagaço-de-cana	180	1,10	500-600	3700

Observamos que resíduos mais comuns das serrarias são compactados da ordem de 5 vezes. Isso permite afirmar que teremos pelo menos 5 vezes mais energia em 1 m³ de briquetes do que em um m³ de resíduos.

Os resíduos briquetados são secos, possuindo um teor de umidade por volta de 8-12 %. Estes briquetes são equivalentes a uma lenha seca, de elevada densidade e com uma forma extremamente homogênea, permitindo mecanização na alimentação de equipamentos.

Todos os tipos de resíduos orgânicos podem ser briquetados, necessitando apenas serem colocados numa granulometria e num teor de umidade adequadas ao processo de densificação.

A densificação dos resíduos facilita a estocagem e amplia o raio econômico de transporte dos mesmos, viabilizando técnica e economicamente a utilização de muitos resíduos.

Uma máquina de briquetagem (como a do LPF) produz o equivalente em briquetes a 5.440 kWh/h enquanto consome apenas 26,4 kWh/h.

19 - Quais são os princípios de briquetagem de resíduos vegetais?

Existem diversas tecnologias para compactação da biomassa.

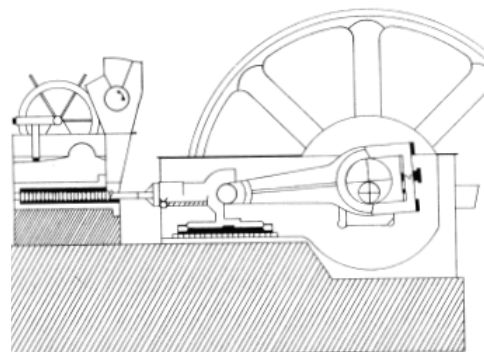
Os resíduos após transformação em cavacos e secos entre 12 a 18 %, podem ser briquetados em **extrusoras de pistão mecânico**, extrusoras de pistão hidráulico, extrusoras de rosca sem fim, ou ainda peletizados. O Laboratório de Produtos Florestais faz a difusão de um desses processos denominado briquetagem em extrusora de pistão mecânico, mostrado na figura 19. Este processo já é empregado há muito tempo na Europa.



Figura 19 – Briquetadeira de pistão mecânico (fonte: Biomax).

Estas briquetadeiras possuem o sistema de compactação mostrado na Figura 20, ou seja, um pistão ligado a um eixo de manivela acionado por um motor elétrico. O volante serve para armazenar energia cinética para sustentar o funcionamento contínuo que necessita de grande potência.

Figura 20 – Princípio de briquetagem das extrusoras de pistão mecânico



Além deste processo podemos utilizar compactadoras de serragem como ilustra a figura 21, que é uma extrusora baseada no processo de rosca sem-fim.



Figura 21 – briquetadeira de rosca sem-fim, importada da Itália (*fonte: POR Ecomec s.r.l.*).

A prensa extrusora de rosca sem-fim é um processo muito utilizado em outros países, apresentando ótimos resultados. Apresenta excelentes resultados. Seu princípio mecânico é semelhante às marombas da indústria cerâmica. É um equipamento de fácil manutenção de baixo consumo de energia, se comparado aos outros tipos.

A prensa hidráulica é um equipamento que usa um pistão acionado hidráulicamente. O material a ser compactado é alimentado lateralmente por uma rosca sem fim. Uma peça frontal ao embolo abre a expulsa o briquete quando se atinge a pressão desejada. Esse processo, apesar de produzir um briquete de qualidade, apresenta um baixo rendimento de produção.

20 – A briquetagem dos resíduos tem alguma vantagem adicional na geração de energiab?

Sim. Podemos exemplificar e melhor compreender este aspecto fazendo algumas considerações.

O Balanço Energético Nacional-BEN do Ministério das Minas e Energia – MME, atribui para a lenha catada, ou seja, aquela que provém de coleta residual, da sobra de exploração florestal ou de resíduos e não tendo origem em plantios homogêneos, a densidade de 300 kg/st, com poder calorífico de 3.300 kcal/kg a 25 % de conteúdo de umidade. Portanto, este é o valor adotado para se chegar ao presente raciocínio.

Para **1 tonelada** de lenha teremos necessidade de **3,33 st de lenha**, chamados vulgarmente de metro de lenha.

Consideramos que cada tonelada de lenha possui 3,33 estéreos de lenha, ou popularmente 3,33 metros de lenha. Com o poder calorífico de 3.300 kcal/kg.

O LPF/IBAMA, em várias medições recentes do poder calorífico de briquetes de resíduos, obteve um valor médio de 4.400 kcal/kg com uma densidade média de 655 kg/t. Os briquetes variam de densidade a granel em função da forma e do diâmetro de produção adotados.

Para estabelecer uma comparação entre o rendimento energético de briquetes de resíduos e da lenha catada precisamos fazer os seguintes cálculos:

$$1 \text{ t de lenha} \Rightarrow 3.300 \text{ kcal/kg} \times 1000 \text{ kg} = 3.300.000 \text{ kcal}$$

$$1 \text{ t de briquetes} \Rightarrow 4.400 \text{ kcal/kg} \times 1000 \text{ kg} = 4.400.000 \text{ kcal}$$

$$1 \text{ t de lenha ocupa } 3,3 \text{ m}^3 \quad - \text{ de 1 tonelada de lenha, } 250 \text{ kg é água.}$$

$$1 \text{ t de briquetes ocupa } 1,5 \text{ m}^3 \quad - \text{ de 1 tonelada de briquetes, } 80 \text{ kg é água.}$$

A lenha é um material heterogêneo que provém de espécies diferentes de madeira com forma variável e teor de umidade geralmente elevada. O briquete apresenta forma regular, umidade próxima a 8 % e constituição homogeneizada pelo processo de compactação.

Esses fatores fazem com que, em um equipamento térmico, o briquete alcance um rendimento térmico superior em até 50 %, mencionado pela literatura técnica e comprovado pelo LPF/IBAMA.

Este fato é bastante compreensível se fizermos uma analogia com o desempenho de um veículo utilizando uma gasolina de má qualidade e uma gasolina de excelente qualidade.

Uma indústria cerâmica, operando com briquetes, consegue uma operação homogênea com ciclos de queima mais curtos e uma proporção de produtos de primeira qualidade bastante superior, facilitando-se regularização e aperfeiçoamento do processo produtivo. Isso significa utilizar menos

toneladas de briquetes que toneladas de lenha, tanto pelo conteúdo energético como pelo rendimento térmico superior. Em consequência, a rentabilidade econômica do processo produtivo é maior. Além disso, a irregularidade de fornecimento da lenha, identificado por todos os tipos de indústrias da região, pode ser vencida.

Um industrial ceramista é sensível à importância da qualidade da lenha, ele observa na prática a diferença de operar com lenha de má e boa qualidade.

Dessa maneira, se considerarmos o poder calorífico do briquete é superior em 1,33 vezes à lenha, e que o rendimento energético é superior em até 50 %, podemos admitir que o custo da tonelada de briquete chegue ao dobro da tonelada de lenha.

$$\begin{aligned} & 1,33 \text{ (superioridade do PC do briquete)} \\ & \times 1,5 \text{ (superioridade no rendimento do forno)} \\ & = 2 \text{ (superior ao rendimento da lenha)} \end{aligned}$$

21 – O que é briquetagem do carvão vegetal?

A briquetagem de carvão vegetal é um processo que permite aproveitar os carvões na forma de finos, ou então, carbonizar resíduos na forma de partículas e após compactá-los. O briquete é um pequeno bloco de forma pré-definida, resultante da aplicação de pressão em uma mistura de finos de carvão com um aglutinante, dentro de moldes matrizes, através de orifícios entre cilindros rotativos ou outros artifícios semelhante. O importante é que exista, surja ou se crie, durante a prensagem, uma afinidade entre as partículas fazendo com que elas permaneçam coesas, mantendo ou melhorando as características do material de origem.

Os aglutinantes utilizados na briquetagem de carvão são materiais essenciais no auxílio à briquetagem de forma técnica e econômica.

As partículas de finos devem ter uma distribuição granulométrica adequada para proporcionar qualidade do briquete e economia do aglutinante.

Os aglutinantes podem ser de natureza diversa, sendo que os mais utilizados comercialmente são de amido de milho. No Brasil busca-se utilizar o amido de mandioca, pela abundância desse produto.

Os tipos de aglutinantes são:

-aglutinante tipo matriz, como alcatrão e piche, que envolvem completamente as partículas formando uma matriz contínua;

-aglutinante tipo filme, usado como soluções ou dispersões, sendo a água o solvente mais comum, a exemplo do silicato de sódio, amido, melaço;

-Aglutinante químico, cujo efeito de adesão depende de reações químicas efetivas dos componentes dos aglomerantes, a exemplo dos silicatos + CO₂.

No Brasil, apesar da grande oferta de finos de carvão vegetal de resíduos carbonizáveis, os briquetes ainda são pouco fabricados em função do baixo preço do carvão vegetal comum.

Normalmente os briquetes de carvão vegetal são fabricados para uso doméstico. Dependendo do uso, a qualidade do briquete é deve ser diferente. Para uso siderúrgico, como termo-redutor, o briquete necessita de possuir resistência a quente.

Para uso doméstico, a baixa toxidez é a propriedade mais importante, seguida da resistência ao manuseio, facilidade de acendimento, facilidade de transporte e estocagem.

Para uso siderúrgico são necessárias as seguintes características: um teor de cinzas abaixo de 12 %, materiais voláteis abaixo de 15 %, carbono fixo acima de 73 %, teor de enxofre abaixo de 0,5 % e resistência mecânica à compressão à quente superior à 70 kg/cm².

Na composição de um briquete de carvão vegetal entram mais que os finos de carvão e o aglomerante. Podemos adicionar outros produtos que vão contribuir para melhorar propriedades desejadas, influenciando em todas as características do briquete, incluindo-se até produtos que vão agregar cheiro característico aos mesmos.

Como os equipamentos de briquetagem de carvão vegetal não possuem linha de produção no Brasil, faz com que os mesmos sejam importados ou sejam produzidos no Brasil sobre encomenda, através de projetos específicos.

22 – O que é a gaseificação?

A gaseificação é um processo de degradação térmica que permite transformar um combustível sólido, como os resíduos vegetais, em gás combustível ou gás de síntese. Nesta pirólise integral, o que resta são os minerais que participam da constituição dos resíduos ou são associados aos mesmos durante sua vida útil. O que sobra na gaseificação são as cinzas, normalmente de origem mineral. Este processo se inicia com a combustão, passando pela carbonização que se dá até 500-600°C entrando a partir de temperaturas acima de 600°C na fase propriamente de gaseificação ou fase do hidrogênio.

O tipo de gaseificador pode ser definido em função do gás desejado, gás de síntese ou gás combustível, ou em função do tipo de combustível gaseificado, lenha, carvão etc.

Os gaseificadores que produzem gás de síntese geralmente são mais sofisticados e trabalham pressurizado com oxigênio, são de maior porte e necessitam de unidades auxiliares de limpeza .

Os gaseificadores para produzir gás combustível podem ser mais simples, pois o gás pode ser menos puro contendo maior teor de pirolenhosos, não necessitando de alimentação com oxigênio.

Os sistemas de gaseificação de madeira podem ser de leito fixo contracorrente ou concorrente e leito fluidizado.

A gaseificação de madeira é conhecida há vários anos, geralmente evoluída da gaseificação de carvão mineral.

Existem gaseificadores chamados gasogênios, que já foram bastante utilizados em automóveis, durante a Segunda Grande Guerra. Estes gaseificadores produzem gás combustível para os motores a explosão. Durante o segundo choque do petróleo, final da década de setenta, utilizou-se novamente este tipo de gaseificador em grupos geradores de eletricidade, utilitários rurais e caminhões.

Também a partir da Segunda Guerra Mundial, alguns modelos de gaseificadores industriais ficaram célebres, sendo bastante usados na Europa, principalmente Inglaterra e Alemanha, grandes produtores de carvão mineral. Alguns desses gaseificadores foram posteriormente transformados para utilizar madeira em vez de carvão mineral. Os principais modelos fabricados foram : gaseificador tipo Davy com leito móvel (up-draft),fluxo de ar-oxigênio contracorrente, grelha rotativa, funcionando à pressão atmosférica. O tipo Lacote, construído na França em 1938, que com a falta de gasolina passou a produzir gás de síntese para o metanol a partir de madeira. Gaseificador Winkler, desenvolvido na Alemanha em 1922, possuindo unidades que funcionam até hoje.

23 – O que é madeira torrificada?

Se a pirólise da madeira é interrompida abaixo de 280°C, nós teremos um produto intermediário entre a madeira e o carvão vegetal, chamado madeira torrada, ou madeira retificada termicamente. Esta denominação dependerá para qual finalidade estaremos fazendo o tratamento térmico. Utilizando-se esse tratamento para produzir um combustível, pode-se simplesmente chama-lo de madeira torrada, como fazem os franceses. Se, no entanto, trata-se a madeira para obter um produto com características modificadas, ai o mais correto é designa-lo de madeira retificada termicamente.

A madeira pode ser tratada termicamente com três objetivos específicos:

- obter uma madeira mais resistente à biodegradação;
- obter um combustível mais rico energeticamente do que a madeira, ou seja, dar a ela um poder calorífico aproximado de 6.000 kcal/kg, intermediário entre a madeira não tratada e o carvão vegetal;
- obter uma madeira mais dura fisicamente e estável às variações dimensionais frente às alterações do teor de umidade.

Por exemplo, uma madeira de baixa densidade e macia, se retificada termicamente em uma autoclave, adquire maior dureza superficial, podendo até ser utilizada em pisos. Esses produtos já são comercializados há alguns anos, na Europa. A madeira com esse tratamento, escurece um pouco. As madeiras claras de coníferas tendem a adquirir a coloração de uma Embuia.

Com relação à resistência à biodegradação, a madeira torna-se bem mais resistente aos fungos mas continua susceptível aos cupins.

Frente às variações dimensionais, relacionadas à umidade, a madeira tratada termicamente adquire maior estabilidade dimensional, fato já identificado experimentalmente por vários pesquisadores, há mais de 50 anos.

24 – O que são centrais termelétricas a lenha?

A queima da biomassa numa caldeira produz vapor com pressão elevada que é utilizado numa turbina, onde se expande e produz trabalho na forma de um eixo girando; que irá acionar um alternador e produzir, em seus bornes, energia elétrica para consumo (segundo um “ciclo motor a vapor de Rankine”)

A tecnologia envolvida no fornecimento de uma pequena central termelétrica é conhecida e dominada pela engenharia brasileira através de várias empresas nacionais.

A pequena central termelétrica é concebida primitivamente para consumir lenha, podendo também consumir outras biomassas como, casca de arroz, bagaço-de-cana, casca de babaçu e resíduos celulósicos em geral. Lembramos que o resíduo compactado (briquete) é ideal pela homogeneidade de forma e qualidade energética podendo, inclusive, facilitar a mecanização da alimentação da caldeira.

As pequenas termelétricas podem também ser transportáveis, de fácil manutenção podendo ser operada por mão-de-obra não especializada.

Por exemplo, uma usina que produz nos bornes do seu gerador 5.000 kW de potência, apresenta um consumo específico de 2 kg de lenha por kWh (segundo dados de um fabricante das Centrais termelétricas DEDINI). Considerando que um briquete de resíduos da indústria madeireira tenha qualidade superior à lenha considerada nesse exemplo, podemos supor que 1 tonelada de briquete numa unidade deste porte, possa produzir 600 kWh.

À medida que aumentamos a dimensão das centrais termelétricas, a tendência é aumentar a eficiência deste rendimento.

Como se viu, o aproveitamento energético dos resíduos vegetais é totalmente viável, apresentando várias possibilidades de valorização, em função das diversas tecnologias disponíveis. Para cada resíduo é necessário analisar a viabilidade técnica e econômica. O Brasil atual não permite a negligência na conservação do meio ambiente através da descarga de resíduos, nem o desperdício energético desta significativa fonte de energia.

Referências de “*Sites*” sobre energia de biomassa na América e Europa

Como o assunto está sujeito a inovações e aperfeiçoamentos constantes, recomenda-se a pesquisa rotineira na internet. Abaixo, são relacionados mais de 60 “sites”, dentre os mais recomendados.

- [ITEBE](#) : Institut Technique Européen du Bois-énergie
- [le bois énergie au Congrès forestier mondial 1997 - FAO](#)
- [Agricultural and Forestry Science](#) (energy crops) : Université d'Helsinki
- [Agricultural research center of Finland](#) : Institut of Crop and Soil Science, Energy Crops
- [BIOENERGIA](#) : programme de recherche sur l'énergie de la biomasse
- [Canadian renewable fuels association](#)
- [Combustion and gasification research](#) : Université d'Åbo Akademi
- [Euroforest : la forêt en tant que ressource renouvelable pour la production d'énergie](#)
- [Forestry Science](#) : Université de Joensuu
- [la Forêt en tant que ressource renouvelable pour la production d'énergie](#) : rapport du Parlement européen (en français, also available in other languages)
- [Les chaudières Géminox](#)
- [valorisation énergéla biomasse par voie thermochimique - IEPF](#)
- [IVO Group](#) : fournisseur pour centrale de production d'énergie

- [Ministry of trade and industry of Finland, Energy department](#)
- [Research on combustion and gasification technology](#) : Université technologique d'Helsinki
- [Research on peat, wood and agrobiomass production and utilization](#) : Université de Oulu
- [le bois énergie chez Rhône Alpes Energie - environnement](#)
- [Sermet Oy](#) : fabricant de chaudières biomasse finlandais
- [TEKES](#) : promotion et support financier pour la R&D en bois énergie en Finlande
- [VTT Energy](#) : technologies de production et de combustion de la biomasse, services d'information sur la biomasse, essences de moteur alternatives
- [VTT Chemical Technology](#) : recherche sur les technologies de l'environnement
- [Atmospheric Impact of Biomass Burning](#) - from the Environmental Geochemistry division of the National Institute for Space Research.
- [Bioenergy](#) - A resource for biomass conversion technology.
- [Bioenergy Feedstock Development Program](#) - aims to develop and demonstrate environmentally acceptable crops and cropping systems for producing high-quality biomass feedstocks.
- [Bioenergy: Its Present and Future Competitiveness](#)
- [Biofuels Information Center](#) - operated by the National Renewable Energy Laboratory.
- [Biofuels Information Network](#) - BIN provides electronic versions of information created and managed by the Oak Ridge National Laboratory and the National Renewable Energy Laboratory.
- [Biomass Energy Businesses in the World](#)
- [Biomass Resource Information Clearinghouse](#) - purpose of this clearinghouse is to provide high-quality biomass resource data for the United States.
- [Energy Technology Center](#) - biomass research center.
- [Greenhouse Gas Mitigation: Biomass Utilization](#) - from the EPA.
- [IEA Bioenergy](#) - information on biomass production, harvesting and supply; biomass utilization; energy recovery from municipal solid waste; greenhouse gas balances of bioenergy systems.
- [Regional Biomass Energy Program](#) - goal is to increase the production and use of biomass energy resources.
- [T.R. Miles' Biomass Page](#)
- [U.S. Department of Energy - BioPower](#) - information about creating electricity from biomass.

- [Kentucky Pollution Prevention Center](#) KWWAWebpage.htm wood@kppc.org
- [Department for Natural Resources \(DNR\), Division of Energy](#)
- [Kentucky Department of Agriculture, Division of Value-Added Marketing](#)
- [Kentucky Division of Forestry](#)
- [Kentucky Forest Industries Association](#)
- Kentucky Wood Manufacturer Association
- [East Kentucky Corporation](#)
- [Eastern Kentucky University's Center for Economic Development, Entrepreneurship, and Technology](#)
- [Kentucky Wood Products Competitiveness Corporation](#)
- [KDEP, Division of Waste Management](#)
- [KY Business Environmental Assistance Program](#)
-

<http://www.ibama.gov.br/>
<http://www.lpf.ibama.gov.br/>
[Rede Bras de Inf em Energia - REBIE](#)
[ABRACAVE](#)
sbs.org.br
[Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG](#)
[FAO - Forestry - Home Page](#)
[BIOEXTON](#)
[ITTO Index Page](#)
[Bem-Vindo ao Laboratório de Ozônio](#)
[Ben](#)
[Bolsa de Reciclagem Sistema FIEP](#)
[Frameset1](#)
[KWWAWebpage.htm](#)
wood@kppc.org
[Kentucky Division of Energy](#)
[AJENA énergie et environnement](#)
[ITEBE Institut Technique Européen du Bois Energie](#)
[Resíduos no Brasil](#)