

ENERGIA DA BIOMASSA FLORESTAL

Paulo Fernando Trugilho¹

1. INTRODUÇÃO

A biomassa florestal está distribuída nos compartimentos aéreos e subterrâneos das espécies florestais, em diferentes porcentagens, e a energia também está presente dentro desses compartimentos. Entretanto, nesse trabalho será abordado apenas o compartimento relativo à parte aérea das árvores, representada pela porção madeira. A biomassa, de modo geral, é uma fonte de energia primária e renovável, que além da energia disponível, atua como importante fator de fixação do carbono atmosférico contribuindo, dessa forma, com a redução do efeito estufa. Devido a sua variabilidade e gama de espécies adaptadas a diferentes condições ambientais, a madeira apresenta-se com um material de extraordinário valor ambiental, social e econômico. A madeira é sem dúvida o mais antigo combustível usado pelo homem.

A madeira pode ser utilizada diretamente ou convertida em um novo combustível, sob a forma sólida, líquida ou gasosa, em processos que variam de simples fornos ou até mesmo em sofisticadas unidades industriais. Estes processos podem ser classificados em: combustão direta, carbonização ou pirólise, gaseificação e hidrólise ácida ou enzimática.

Na avaliação da madeira como matéria prima para produção de energia deve-se levar em consideração várias características, além da sua composição química, elementar e imediata. Deve-se iniciar considerando as características de crescimento ou dendrológicas da planta, pois estas influem significativamente sobre a produção de massa seca individual ou por área. A densidade básica, o teor de umidade, o poder calorífico superior, inferior e líquido, são outras propriedades a serem devidamente consideradas.

Do ponto de vista químico a madeira madura é formada por uma mistura complexa e interpenetrada de polímeros, constituída basicamente por carboidratos (holocelulose), lignina, componentes estranhos (extrativos) e elementos minerais (BROWNING, 1963 e PETTERSEN, 1984), em que os teores de lignina e de extrativos são muito importantes do ponto de vista energético. A lignina é um componente aromático, que apresenta alta estabilidade térmica, além de ser rico em

¹ Professor da Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciências Florestais. trugilho@dcf.ufla.br.

carbono. O seu poder calorífico gira em torno de 6.400 cal/g. Os extrativos são considerados como compostos que não fazem parte da estrutura da parede celular vegetal, sendo solúveis em água, solventes orgânicos e volatilizados com vapor. Podem apresentar elevado poder calorífico, podendo chegar a 8.300 cal/g, dependendo da classe do extrativo. O teor de minerais afeta negativamente o valor calórico do combustível, sendo, portanto, indesejável em qualquer tipo de combustível.

Com relação o teor de umidade, a madeira por se tratar de um material higroscópico, ou seja, possui a capacidade de absorver água do ambiente de exposição, o que acarreta perda significativa do seu potencial energético em virtude do gasto de energia ocasionado durante a etapa da secagem do combustível. O teor de umidade possui relação inversamente proporcional ao valor calórico da madeira ou de qualquer combustível convencional.

A madeira possui poder calorífico variável, dependendo da espécie. Madeiras de coníferas possuem poder calorífico superior médio de 5.200 cal/g, enquanto que as madeiras de folhosas possuem poder calorífico superior médio de 4.500 cal/g. A composição química é a responsável por essa variação, estando relacionada diretamente aos teores de lignina, cinzas e extrativos.

A densidade básica da madeira, da mesma forma que as características de crescimento, possui relação direta com a produção de matéria seca pelo vegetal. É uma característica importante e considerada, por diversos autores, como sendo um excelente índice de qualidade para diferentes produtos da madeira, pois está associada com outras propriedades intrínsecas da mesma. Entretanto, não se deve utilizar a densidade básica de forma isolada na classificação ou seleção de indivíduos para determinado tipo de uso da madeira.

A conversão da madeira em outro tipo de combustível também é afetada pela sua estrutura anatômica, composição química e física, além do processo de transformação utilizado. No geral, fatores como o teor de lignina da madeira e a sua qualidade (relação siringil/guaiacil) desempenham papel fundamental dependendo do produto desejado, enquanto que a temperatura e as taxas de aquecimento são importantes efeitos associados aos processos de conversão.

O objetivo desse trabalho foi apresentar uma visão geral das possibilidades de obtenção de energia proveniente da biomassa florestal, representada pela madeira, que é

um importante e estratégico insumo energético, que deveria ser mais valorizado nos balanços energéticos, estaduais, municipais e nacional.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Para se entender a madeira como importante produto energético deve-se conhecer a sua composição química e elementar, suas propriedades energéticas, além das variações que normalmente ocorrem nesta fabulosa matéria-prima. Deve-se procurar entender que existem grandes variações radiais e, em menor escala, longitudinais na madeira e que estas diferenciações vão afetar de forma significativa a sua melhor forma de utilização.

A madeira é formada por holocelulose, lignina, extrativos e cinzas. Todos estes compostos que a madeira produz influem de forma positiva no seu valor calórico, exceto o teor de minerais, que apresenta relação inversa com o poder calorífico da madeira. Entretanto, do ponto de vista energético o teor de lignina é o mais importante, não somente pelo valor calórico desse componente, mas principalmente pela sua elevada estabilidade térmica. A elevada estabilidade térmica associada à lignina está relacionada com os tipos de ligações químicas existentes dentro da macromolécula.

2.1. Panorama do Uso Energético da Madeira no Brasil

No Brasil, a madeira e o carvão vegetal são utilizados amplamente como fonte de energia. Existe uma tradição no emprego dos recursos naturais renováveis, em que a energia hidráulica, a lenha, o bagaço de cana e outras fontes primárias contribuíram com 47,3% da oferta interna de energia. Neste contexto, a lenha e o carvão vegetal contribuíram com 11,6% desse total (BRASIL, 2010). A Figura 1 mostra a distribuição, por fonte, da oferta interna de energia. Verifica-se uma distribuição bem equilibrada entre as fontes de energia, renovável e não renovável, que compõem a matriz energética brasileira. Nesse cenário, a biomassa, de forma geral, representa 31,5% da oferta interna de energia.

Vários setores da economia brasileira utilizam a lenha e seus derivados como fonte de energia. A Figura 2 mostra a composição setorial do consumo final de biomassa. Observa-se que o setor industrial é o grande consumidor da

biomassa como fonte de energia, seguido pelo setor energético e transportes. O setor comercial e público participa com somente 0,2%.

A Figura 3 mostra os principais setores industriais consumidores de biomassa. Verifica-se que o setor de bebidas e alimentos utiliza a biomassa intensivamente, enquanto que setores como o de cerâmica (0,5%), química (0,2% e têxtil (0,1%) são os que menos utilizam a biomassa.

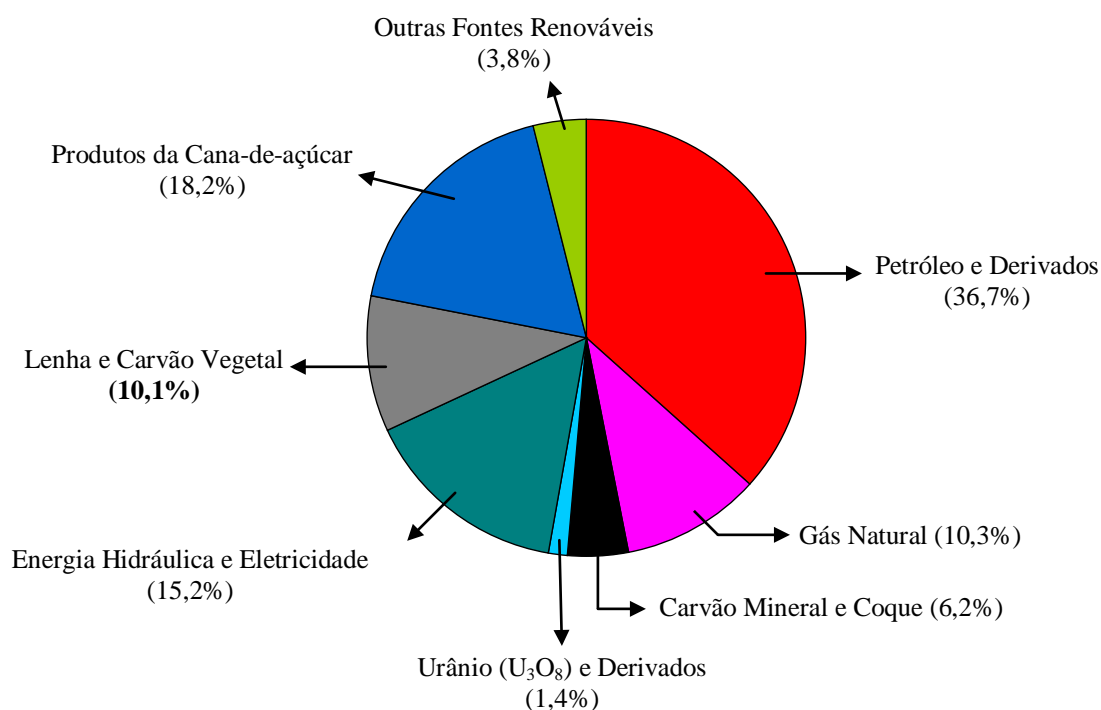


FIGURA 1 – Distribuição, por fonte, da oferta interna de energia
Fonte: BRASIL (2010)

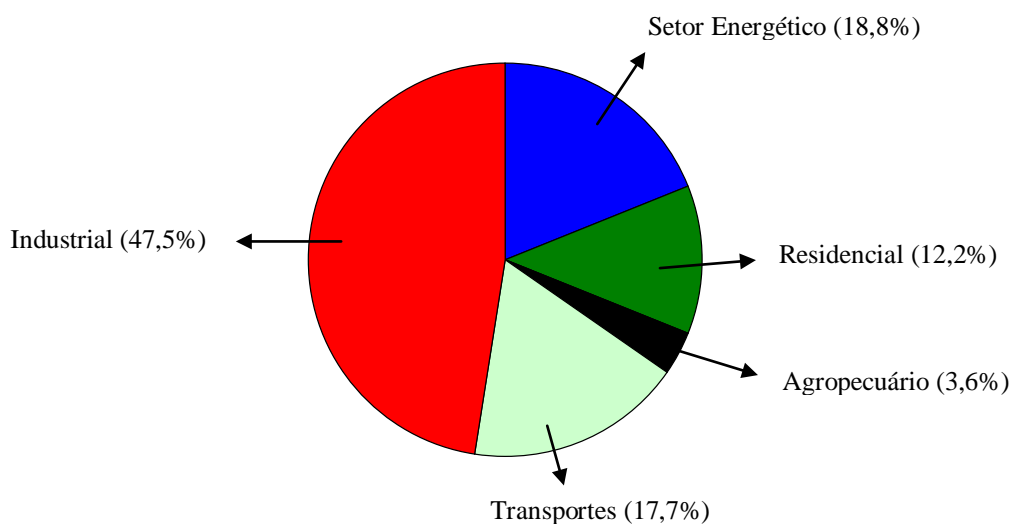


FIGURA 2 – Composição setorial do consumo final de biomassa
Fonte: BRASIL (2010)

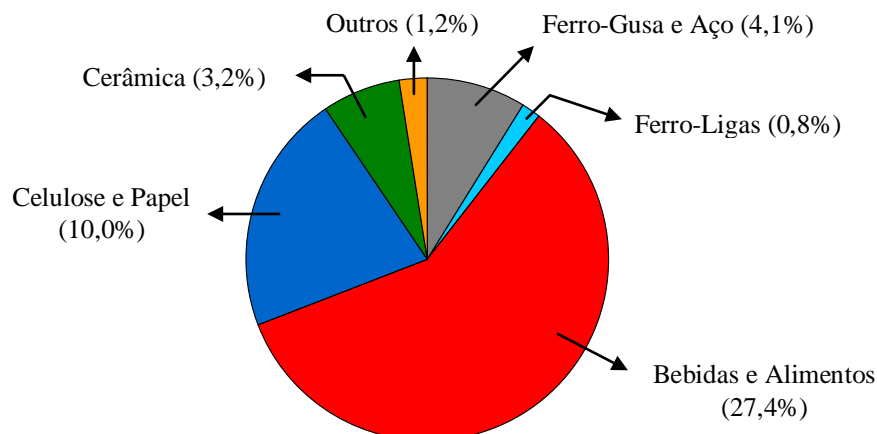


FIGURA 3 – Composição setorial do consumo final de biomassa
 Fonte: BRASIL (2010)

2.2. Formas de Uso da Madeira para Energia

As formas mais comuns de energia fotossintética são obtidas da madeira e do carvão vegetal. Outras formas menos comuns são os líquidos e gases gerados da madeira e do carvão vegetal nos processos de destilação seca e gaseificação (MARTINS, 1982). Atualmente a hidrólise, ácida ou enzimática, de material lignocelulósico visando à produção de álcool de segunda geração já é uma realidade. Diversos países, como, por exemplo, os Estados Unidos, têm investido intensivamente nessa linha de pesquisa, obtendo resultados bem satisfatórios, porém a um custo ainda muito elevado.

No caso da madeira, o Brasil aparece como destaque em relação tanto à área com florestas nativas, como as plantações, especialmente as de eucalipto, uma das maiores do mundo. As espécies de eucalipto introduzidas inicialmente no Brasil foram selecionadas, obedecendo ao zoneamento ecológico para reflorestamento proposto por Golfari e Pinheiro Neto, em 1970. Posteriormente, foram consideradas as características de crescimento da planta e atualmente diversas propriedades da madeira já são utilizadas como referência nos programas de genética e melhoramento florestal. Dentro desses programas de melhoramento genético florestal as características da madeira consideradas estão sempre relacionadas ao produto que se deseja obter. O que fez do Brasil o destaque mundial na silvicultura das espécies desse gênero.

2.3. Formas de Utilização da Energia da Madeira

A madeira ou a biomassa pode ser utilizada tanto na forma direta como por meio da sua conversão em outros produtos de interesse. A forma mais simples de uso da madeira e não menos importante é a sua combustão direta para a geração de calor ou cocção de alimentos. Essa forma de utilização é muito importante em países como a África e Índia e em algumas regiões do Brasil, onde existe uma maior dependência dos recursos naturais. As formas de conversão mais utilizadas são a carbonização ou pirólise, a gaseificação e a hidrólise.

2.3.1. Combustão

Combustão é uma reação de oxidação que o combustível sofre, ocorrendo quando a quantidade de O_2 é suficiente para transformá-lo em gases, deixando como resíduo somente os óxidos minerais (cinzas). É uma reação francamente exotérmica, isto é, de liberação de energia. O carbono e o hidrogênio, no caso da madeira, combinam-se com o O_2 , liberando energia calorífica.

Existem duas formas de combustão, a saber:

- a) Combustão completa ou direta, que ocorre na presença de O_2 em excesso e;
- b) Combustão incompleta ou indireta, que ocorre na presença controlada de O_2 .

A intensidade da combustão é medida, geralmente, pela presença de CO, que é um gás oxidável, entre os seus produtos. A combustão envolve uma série de reações químicas que ocorrem simultaneamente. Porém para que as reações iniciem é necessário o fornecimento de certa quantidade de energia, a chamada energia de ativação.

Segundo BRAND (2010) a combustão pode ser dividida em seis etapas bem definidas:

- ✓ Secagem: ocorre em temperaturas inferiores de 200 °C, sendo responsável pelo consumo de 20% da massa;
- ✓ Emissão de voláteis: ocorre em temperaturas de até 400 °C;
- ✓ Ignição dos voláteis: ocorre até 600 °C, chegando a perda de 40% da massa;
- ✓ Combustão dos voláteis: ocorre até 800 °C, na qual 60% da massa é perdida;
- ✓ Extinção da chama dos voláteis: ocorre acima de 800 °C, com continuidade da perda de massa e;
- ✓ Combustão dos resíduos de carbono, que ocorre acima de 800 °C, restando somente às cinzas ao final do processo.

Os sistemas típicos de combustão de madeira e biomassa são: queima em grelha, queima de combustível pulverizado e queima em leito fluidizado. O sistema mais convencional de queima é o que se dá sobre grelhas, que podem ser fixas ou móveis e ter vários modelos, como a grelha plana resfriada, a grelha inclinada, a grelha basculante e a grelha rotativa (BRAND, 2010).

2.3.2. Carbonização ou Pirólise

Carbonização é o processo pelo qual a madeira é transformada em carvão vegetal, quando aquecida em local fechado, na ausência ou presença controlada de ar (oxigênio). Uma parte da madeira permanece como resíduo sólido e outra parte é transformada em gases. A carbonização da madeira envolve fenômenos complexos, que possibilitam a geração de um elevado número de compostos. A carbonização é caracterizada pela decomposição térmica dos compostos químicos que compõem a madeira em condição controlada. O objetivo da carbonização é a concentração de carbono no carvão vegetal, aumentando a densidade energética do combustível. A Figura 4 mostra o esquema ilustrativo da produção do carvão vegetal.

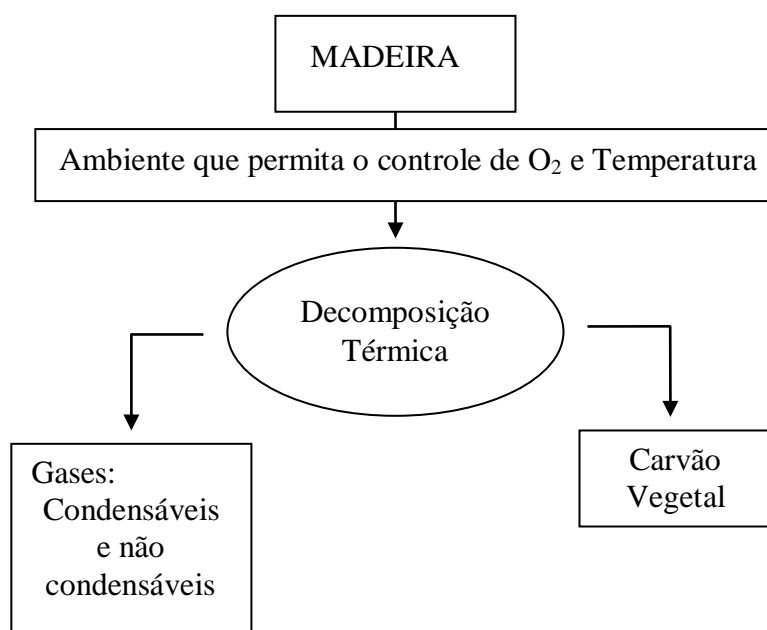


FIGURA 4 – Esquema ilustrativo da produção de carvão vegetal

A fração gasosa é dividida em duas partes distintas, ou seja, uma parte que pode ser condensada e uma não condensável. A fração condensável é formada pelo líquido

pirolenhoso, o qual pode ser separado em duas partes o ácido pirolenhoso e o alcatrão insolúvel. O ácido pirolenhoso é formado basicamente ácido acético e fórmico, metanol, acetona, solventes metilênicos e alcatrão solúvel diluídos em aproximadamente 70% de água. O alcatrão insolúvel é caracterizado por uma mistura complexa, de caráter fenólico, contendo mais de 400 compostos na sua constituição. Estas duas frações são facilmente separadas por decantação, pois o alcatrão insolúvel é mais pesado que o ácido pirolenhoso. A coloração do ácido pirolenhoso é voltada geralmente para o marrom castanho, enquanto que o alcatrão insolúvel apresenta coloração mais escura. A coloração das duas frações sofre influência da madeira utilizada. A fração não condensável é formada basicamente pelos gases CO_2 , CO , CH_4 , C_mH_n , e H_2 .

O processo de carbonização pode ser dividido em quatro etapas, de acordo com a temperatura (OLIVEIRA et al., 1982a; MEDEIROS e RESENDE, 1983):

- a. abaixo de $200\text{ }^{\circ}\text{C}$: secagem e início da decomposição térmica;
- b. de 200 a $280\text{ }^{\circ}\text{C}$: predominância das reações endotérmicas, com a liberação de ácido acético e fórmico, metanol, água e gás carbônico (CO_2);
- c. 280 a $500\text{ }^{\circ}\text{C}$: predominância das reações exotérmicas, que levam à liberação dos gases combustíveis (CO , CH_4 etc.) e alcatrões; e
- d. acima de $500\text{ }^{\circ}\text{C}$: o carvão já é bem estável e apenas pequenas quantidades de voláteis, principalmente H_2 , são liberadas.

Essas etapas podem ocorrer de modo simultâneo em peças de maior dimensão, caracterizando períodos e, ou, zonas de carbonização com temperatura variada.

Os hidrocarbonetos presentes na madeira, principalmente a celulose, as hemiceluloses e a lignina, sofrem uma série de reações de decomposição durante a carbonização, sob a ação do calor, originando como produtos gases voláteis e o carvão vegetal. Os diversos componentes da madeira reagem em diferentes temperaturas, produzindo uma mistura de produtos (EBERHARD e DAVIS, 1991).

Segundo SARKANEN e LUDWIG (1971) e OLIVEIRA et al. (1982a), a lignina é o componente da madeira mais estável termicamente, quando comparada com a celulose, com as hemiceluloses e com a própria madeira. Este

fato está relacionado com a estrutura química complexa e com os tipos de ligações presentes na estrutura da macromolécula lignina.

O teor de lignina na madeira afeta diretamente a produção de carvão vegetal, onde as madeiras com maiores teores de lignina irão produzir maior quantidade de carvão. A Figura 5 mostra a relação existente entre o teor de lignina e o rendimento gravimétrico da carbonização para seis espécies de eucaliptos (*E. maculata*, *E. pellita*, *E. tereticornis*, *E. urophylla*, *E. cloeziana* e um Híbrido de *E. urophylla* x *E. grandis*) aos sete anos de idade.

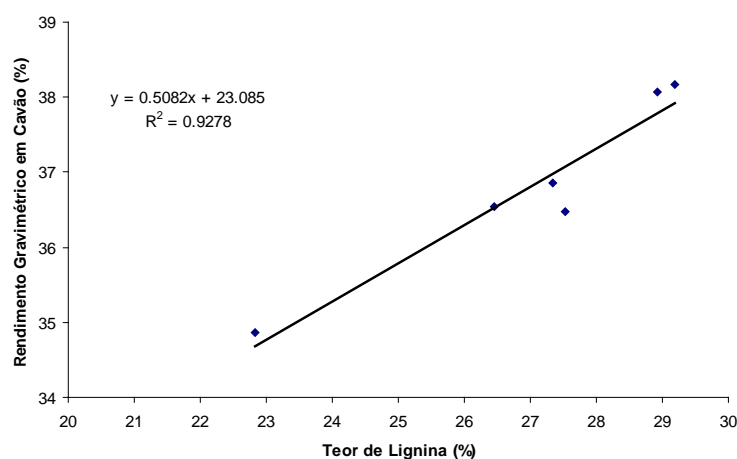


FIGURA 5 – Relação entre o teor de lignina da madeira e o rendimento em carvão vegetal

A umidade da madeira afeta de forma negativa o rendimento e a qualidade do carvão vegetal, pois quanto maior for o teor de umidade maior será o gasto de energia durante a etapa da secagem. Além de contribuir com a redução do rendimento gravimétrico da carbonização, a umidade afeta de forma positiva a geração de finos no carvão.

O sistema de carbonização apresenta como fatores que afetam a produção a taxa de aquecimento, a temperatura final, o tempo de residência e a pressão, em sistemas pressurizados. A pressão concentra a fase gasosa no reator, melhora a transferência de calor, reduz o tempo de aquecimento, uniformiza o carvão vegetal, reduz o teor de carbono fixo e, aumenta o teor de materiais voláteis. A temperatura final de carbonização afeta a qualidade do carvão produzido, onde maiores temperaturas favorecem positivamente ao teor de carbono fixo e negativamente ao rendimento gravimétrico da carbonização e teor de materiais voláteis. A taxa de aquecimento rápida

favorece a produção de gás, enquanto que menores taxas aumentam a produção de carvão vegetal.

2.3.3. Gaseificação

A gaseificação de combustíveis sólidos é um processo antigo e tem a finalidade de produzir um combustível gasoso, especialmente o CO, com melhores características de transporte, melhor eficiência de combustão e também, que possa ser usado como matéria-prima para outros processos.

Nos processos de gaseificação a matéria orgânica é total ou parcialmente transformada em gases cujos principais componentes são o monóxido de carbono, o dióxido de carbono, o hidrogênio e, dependendo das condições, metano, hidrocarbonetos leves, nitrogênio e vapor d'água em diferentes proporções.

Os gases produzidos podem ser usados em diversas aplicações, tais como:

- a) combustível em fornos de cal, fornos cerâmicos, motores diesel e a gasolina, turbinas a gás, geradores de vapor, etc;
- b) como redutor direto em fornos siderúrgicos e;
- c) como matéria-prima para produção de gás de síntese para o metanol, amônia, etc.

Os gaseificadores são também denominados de gasogênios, quando são destinados à geração de gás pobre, para serem usados como combustível em motores de combustão interna.

O gás produzido em gaseificador é chamado de gás pobre, devido ao seu baixo poder calorífico, que pode variar de 900 a 1450 Kcal/Nm³, em condições normais de temperatura e pressão.

Em princípio pode-se usar qualquer combustível que tenha carbono na sua estrutura. Os combustíveis sólidos mais usados nos gaseificadores são a lenha, a casca de coco, o coque, os resíduos agrícolas, o carvão mineral, o carvão de casca de coco e o carvão vegetal. Entretanto, a lenha e o carvão vegetal são os mais usados.

A composição dos gases e a produção concomitante de combustível sólido (carvão) e líquidos condensáveis (pirolenhoso) depende dos seguintes fatores:

A) Tipo de gaseificador usado

Dentro deste contexto pode-se destacar os seguintes fatores:

- Forma de fornecimento de energia ao processo;
- Introdução ou não de vapor d'água junto ao comburente (ar ou oxigênio);
- Tempo de retenção da carga;

- Sistema de retirada de gases e outros produtos e;

B) Matéria-prima usada;

Com relação à influência da matéria-prima pode-se destacar:

- Umidade do Combustível
- Composição Química

C) Granulometria do combustível

A uniformidade do combustível é um fator que afeta a marcha do gaseificador. O material de menor granulometria tenderá a queimar mais rapidamente na zona de combustão (oxidação), podendo ocasionar deslocamentos da mesma para determinados pontos do gaseificador, com a formação de regiões quentes e frias e, eventualmente, formar bolsões de gás.

D) Composição química do combustível

A composição química é fator primordial na escolha ou indicação de substâncias ou materiais ao uso para fins energéticos. Dentre os componentes químicos, o teor de carbono é uma das características que mais exerce influência na qualidade do combustível, sendo desejável o material com maior teor de carbono possível. Todavia, o teor de carbono não deve ser o fator limitante, uma vez que outras características também devem ser levadas em consideração, tais como a granulometria, a densidade, a umidade, etc., tendo em vista que elas influenciam o poder calorífico do gás.

E) Densidade do combustível

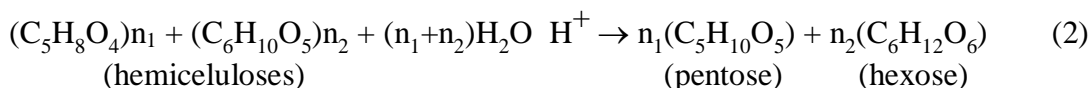
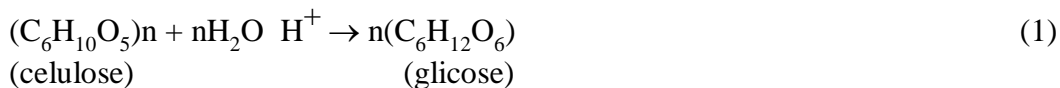
A densidade do combustível é importante pois ela influencia na utilização do reator. Quanto maior a densidade maior será a utilização do reator por unidade de volume. Para o carvão vegetal quanto maior a densidade, menor será a porosidade e conseqüentemente menor a sua reatividade.

2.4.4. Hidrólise

O processo de hidrólise consiste no ataque dos componentes celulósicos da madeira pela água, os quais são convertidos em açúcares simples, hexoses ou pentoses, deixando a lignina como resíduo sólido. A hidrólise pode ser ácida ou enzimática.

Além da madeira outros materiais celulósicos tais como serragem, resíduos florestais, agrícolas (bagaço-de cana, casca de arroz, etc.), babaçu, etc., podem ser usados na hidrólise ácida. Todo material amiláceo e celulósico pode produzir etanol, denominado de etanol de segunda geração.

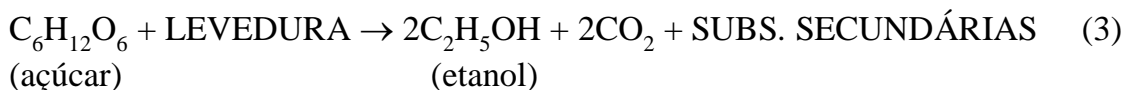
A conversão da celulose em açúcares, denominada de sacarificação, é a etapa mais crítica de todo o processo, a reação envolve o ataque da água, em meio ácido, sobre os componentes celulósicos da madeira. Esquemas da reação de hidrólise ácida sobre a celulose e as hemiceluloses da madeira estão representados pelas equações 1 e 2 (BRASIL, 1981).



As hemiceluloses são mais facilmente hidrolisadas comparadas com a celulose, devido a sua estrutura amorfa e altamente ramificada. A celulose é mais resistente devido a:

- a) forte ligação da cadeia celulósica, ligação $\beta(1,4)$;
- b) pontes de hidrogênio;
- c) regiões cristalinas e;
- d) devido à lignina que age como um cimento natural.

Basicamente o processo de hidrólise consiste em se introduzir a matéria-prima em um digestor, onde os carboidratos da madeira são hidrolisados em açúcares simples pela solução ácida. Terminada a sacarificação, o hidrolisado é retirado, deixando a lignina insolúvel no fundo do digestor. Na etapa de fermentação, o hidrolisado sofre a ação do sistema enzimático das leveduras (*Saccharomyces cerevisiae*), com a transformação dos açúcares em etanol e dióxido de carbono, além de substâncias secundárias em pequenas quantidades. A equação 3 ilustra esse procedimento (BRASIL, 1981).



Após a fermentação, o mosto ou vinho contém etanol e, em menor concentração, ácidos orgânicos, aldeídos, ésteres e alcoóis superiores. As leveduras e outras matérias sólidas, também presentes no mosto, são separadas por centrifugação antes da destilação.

O hidrolisado contém numerosos agentes inibidores (indesejáveis) da fermentação, como o furfural, o ácido fórmico e outros produtos de decomposição dos açúcares.

A fase final do processo refere-se à destilação onde o etanol é purificado e concentrado. Após a destilação e a retificação o álcool é desidratado com benzeno.

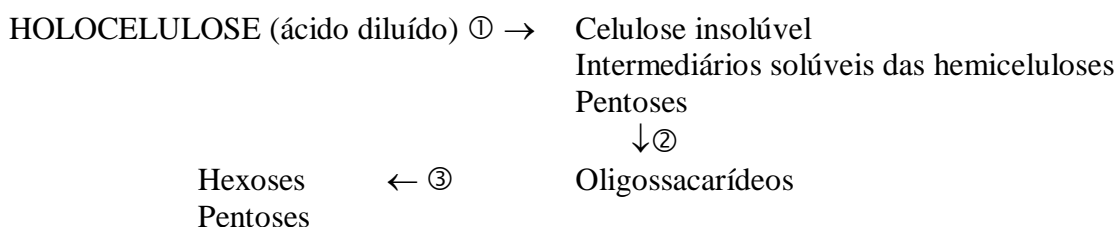
Os principais subprodutos do processo são a lignina e o furfural, importante intermediário na fabricação do nylon, obtido por decomposição das pentoses pelo ácido a quente (BRASIL, 1981).

Os polissacarídeos da madeira (holocelulose) podem ser hidrolisados por dois métodos:

- a) por ácidos concentrados, comumente o ácido sulfúrico (H_2SO_4) 70 - 72% ou ácido clorídrico (HCl) 40 - 45% e;
- b) por ácidos diluídos, normalmente o ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,5 - 2%.

No primeiro caso (a) os polissacarídeos são transformados em oligossacarídeos solúveis e, após diluição com água, são sujeitos a uma segunda hidrólise que converte os produtos intermediários em açúcares redutores.

No segundo caso (b) as reações são heterogêneas e mais complexas. Através da ruptura das ligações glicosídicas (Beta 1,4) da cadeia de celulose insolúvel obtendo-se oligossacarídeos de baixo peso molecular (produtos intermediários) que são convertidos rapidamente em açúcares simples. A seguir é mostrado um esquema da hidrólise com acido diluído (BRASIL, 1981).



Em ① a reação é rápida, hidrólise parcial das hemiceluloses. Em ② a reação é lenta e é a etapa que determina a velocidade da hidrólise. A reação ③ é rápida.

A reação de primeira ordem, envolvida na ruptura das ligações da celulose para produzir açúcares, é seguida por outra de primeira ordem, na qual os açúcares sofrem degradação. Sendo uma molécula reativa, o açúcar se decompõe nas condições em que é formado.

O rendimento de açúcar é, portanto, governado pelas velocidades relativas de formação e de decomposição. Sob as condições de simples bateladas, essas duas velocidades são aproximadamente iguais para um carboidrato cristalino como a celulose. Desse modo, é bastante limitado o rendimento máximo de açúcares e o hidrolisado é contaminado com grandes quantidades de produtos de degradação. Tal efeito se constitui no maior problema para a produção de açúcares a partir da madeira.



onde, K_1 e K_2 são as constantes de velocidade, sendo que quanto maior a relação K_1/K_2 implica em uma maior eficiência (COALBRA, 1983).

A concentração máxima do açúcar é uma função apenas da relação das constantes de velocidade, independentemente de seu valor absoluto e, essa relação é afetada favoravelmente pelo aumento da temperatura ou da concentração do ácido. Pode-se aumentar o rendimento de açúcar, se a hidrólise é processada rapidamente em condições de altas temperaturas.

Estudos para se modificar a reatividade da celulose na madeira, incluindo tratamentos físicos e químicos, no sentido de se aumentar os rendimentos de açúcares redutores. Inclui-se aqui principalmente (Millet et al., 1975, citados por BRASIL, 1981):

- 1) A prévia irradiação da madeira com elétrons de alta velocidade - melhora a sacarificação com ácido diluído. A velocidade da hidrólise aumenta acentuadamente em dosagens acima de 10^7 ROENTGENS. A 10^8 ROENTGENS a velocidade da hidrólise foi aumentada de 10 a 17 vezes, com substancial acréscimo no rendimento.
- 2) Subdivisão dos materiais celulósicos, o que promove aumento da velocidade da hidrólise. A destruição parcial da estrutura cristalina da celulose é obtida por moagem, por 30 minutos, em moinho de bolas. A velocidade de hidrólise pode ser aumentada em até 12 vezes, obtendo-se maiores rendimentos em açúcares.

A produtividade esperada com a hidrólise ácida da madeira de floresta plantada é (COALBRA, 1983):

- Eucalipto = 170 l/t de madeira seca
- Pinus = 200 l/t de madeira seca
- Cana-de-açúcar = 70 l - 56 ton/ha

As variáveis do processo de hidrólise são:

1. Concentração do ácido;
2. Temperatura de reação;
3. Tempo de residência e;
4. Hidromódulo (H_2O /madeira).

O etanol de segunda geração pode também ser obtido com o uso de complexos enzimáticos, denominados genericamente de celulases, capazes de catalizar a reação de hidrólise dos polissacarídeos. Esses complexos enzimáticos são produzidos por microorganismos tais como *Trichoderma viride* e *Aspergillus niger*.

As vantagens em relação à catálise química são:

- a) maior especificidade e;
- b) reações em condições mais brandas.

A hidrólise enzimática inclui o pré-tratamento, a conversão biológica e a recuperação do produto, as utilidades e o tratamento dos resíduos. O pré-tratamento tem como objetivo tornar a celulose apta à ação das enzimas hidrolíticas, para possibilitar um maior rendimento em etanol. Este pode ser realizado com ácido diluído, explosão a vapor, explosão com amônia e água quente (BRAND, 2010).

Os processos de hidrólise ácida a partir da biomassa, resíduos e lixo já encontram-se consolidados em países como os Estados Unidos, Rússia, Alemanha, entre outros.

3. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Como apresentado à madeira e a biomassa de forma geral apresenta grande potencial como fonte de energia. Apesar de ser considerada como um combustível de baixa densidade energética a madeira é o material mais indicado para esta finalidade, pois é uma fonte de energia completamente renovável, que gasta pouquíssima quantidade de energia na sua formação. Dentro desse contexto, muitos países no mundo vêm tentando aumentar a participação da energia da biomassa na matriz energética, na tentativa de contribuir com a redução das emissões de gases causadores do efeito estufa.

A elevada variabilidade faz com que a madeira seja uma importante fonte de matéria-prima para diferentes formas de utilizações, fazendo com que a silvicultura e o melhoramento genético florestal tenham apresentado um salto grande na seleção de material genético mais adaptado aos diferentes usos industriais, em especial como energia.

A madeira de eucalipto apresentou grande aptidão para ser utilizada como fonte de energia ou bionergia, onde as características como a densidade básica, composição química (teor de lignina, extrativos e cinzas ou minerais) e poder calorífico atestam esta forma de utilização. Dessa forma, deve-se procurar utilizar os materiais genéticos com elevada densidade básica, teor de lignina e extrativos e que estas características estejam associadas de forma positiva com as de crescimento do vegetal.

Para o Brasil, que possui uma grande participação da energia da biomassa na sua matriz energética, é importante continuar os estudos envolvendo a qualidade da madeira para a finalidade energética, pois trata-se de uma questão estratégica, onde os produtos obtidos por esta fonte renovável de energia terão certamente uma maior aceitação tanto nos mercados nacional como internacional.

Dos processos de utilização da biomassa como fonte de energia a hidrólise é a mais complexa. A hidrólise ácida ou enzimática da madeira ou biomassa apesar dos processos já consolidados, ainda requerem mais estudos a respeito da sua viabilidade econômica, pois a obtenção do etanol a partir da cana-de-açúcar é uma atividade já estruturada e simples, onde os entraves tecnológicos já foram solucionados.

4. LITERATURA CITADA

BRAND, M.A. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro, Ed. Interciência, 2010. 131 p.

BRASIL, MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO. **Tecnologia da produção de etanol a partir de materiais celulósicos**. Brasília, STI/MIC, v.1, 190 p. 1981. (Ilust.).

BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2010**. Brasília/DF, Ministério de Minas e Energia/MME, 271 p., 2010 (ano base 2009).

BROWNING, B.L. **The chemistry of wood**. New York, John Wiley & Sons, 1963. 689p.

COALBRA/COQUE E ÁLCOOL A PARTIR DA MADEIRA. **Produção de etanol da madeira**. Brasília, Cadernos COALBRA 1, 118 p. 1983. (Ilust.).

EBERHARD, A.A. & DAVIS, M. Combustion characteristics of fuelwood. **South African Forestry Journal**, (158):17-22, 1991.

MARTINS, H. Madeira como fonte de energia. In: PENEDO, W.R.(ed.). **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, MG, CETEC, 1982. p.9-26.

MEDEIROS, C.A. & RESENDE, M.E.A. Alcatrão vegetal: perspectivas de produção e utilização. **Revista Fundação João Pinheiro**, **13**(9-12):42-48, 1983.

OLIVEIRA, J.B.de.; VIVACQUA FILHO, A.; GOMES, P.A. Produção de carvão vegetal - aspectos técnicos. In: PENEDO, W.R.(ed.) **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, CETEC, 1982a. p.60-73.

PETTERSEN, R.C. The chemical composition of wood. In: ROWELL, R. (ed.) **The chemistry of solid wood**. Washington, American Chemical Society, 1984. p.54-126.

SARKANEN, K.V. & LUDWIG, C.H. **Lignins: occurrence, formation, structure and reation**. New York, John Wiley & Sons, 1971. 916p.