

# VIAS DE VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA<sup>1</sup>

## *Ways of Energy Valuation of Biomass*

Luiz Carlos Couto<sup>2</sup>, Laércio Couto<sup>3</sup>, Luciano Farinha Watzlawick<sup>2</sup> e Daniel Câmara<sup>3</sup>

**Resumo:** Este estudo procurou demonstrar o potencial da biomassa como matéria-prima para produção de energia, identificando as principais vias de sua conversão em biocombustíveis. Desta forma, estimular o desenvolvimento e a implantação de tecnologias modernas que permitam integrar, por exemplo, os setores produtivo e industrial de base florestal e o de produção agrícola, com o aproveitamento racional de seus resíduos nas respectivas cadeias produtivas para geração de energia, constituem, para esta década, alternativas que podem combater as restrições de ordem econômica, técnicas e ambientais que progressivamente vêm limitando a expansão de fontes de energias convencionais. Na elaboração deste estudo fez-se uma breve retrospectiva nos anos 80 com relação à disponibilidade de biomassa para fins energéticos, bem como procurou-se evidenciar alguns aspectos dos atuais processos de bioconversão para fins energéticos.

**Palavras-chave:** Biomassa, energia, processos, recursos.

**Abstract:** This study aims to show the biomass potential as raw material for energy production, identifying the main ways it can be converted into bio-fuels. Thus, stimulating the development and implantation of modern technologies to integrate the productive and industrial forest-and agricultural sectors through a rational exploitation of its residues in their respective productive chains for energy generation is a viable alternative to successfully face the economic, technical and environmental factors which are gradually limiting the expansion of conventional power plants. A brief retrospective of the availability of biomass for energy purposes in the 1980s was presented as well an analysis of some current aspects of bioconversion processes for energy purposes.

**Key words:** Biomass, energy, processes, resources.

## 1 INTRODUÇÃO

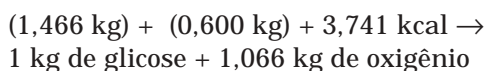
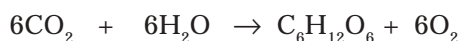
O planeta Terra possui na sua superfície uma zona onde se desenvolvem os organismos vivos: a biosfera. Esta, por sua vez, se divide em duas partes: a região autótrofa, onde se desenvolvem e vivem as plantas verdes; e a região heterotrófica, na qual estão inseridos os seres que, direta ou indiretamente, vivem às expensas das plantas clorofiladas. A massa que

constitui a biosfera é denominada *biomassa*. A biomassa engloba simultaneamente tanto os seres vivos como também o conjunto dos produtos orgânicos gerados por estes seres vivos, mas que não se encontram completamente decompostos em moléculas elementares. Essa biomassa contém uma energia química que, para as plantas verdes, provém da conversão da energia luminosa graças à fotossíntese.

<sup>1</sup> Trabalho convidado.

<sup>2</sup> Universidade Estadual do Centro-Oeste – UNICENTRO, Rua Presidente Zacarias, 875, Caixa Postal 3010, 85015-430 Guarapuava-PR. <sup>3</sup> Universidade Federal de Viçosa – UFV, 36570-000 Viçosa-MG.

O Brasil, em particular por ostentar uma elevada taxa de incidência de energia solar, condições edafoclimáticas significativamente favoráveis e uma disponibilidade relativamente elevada de grandes áreas apropriadas para a agricultura e, ou, silvicultura, apresenta todas as condições necessárias ao processo natural de bioconversão para produção de biomassa, quer seja para fins energéticos ou para produção de alimentos. A energia solar condiciona o crescimento de todos os seres vivos, especialmente o dos vegetais, que graças à fotossíntese elaboram a sua biomassa a partir da energia disponibilizada pelo sol, através da seguinte reação apresentada por Thibeau (2000):



Assim, a fotossíntese corresponde à absorção da energia solar que a planta faz à custa de sua clorofila, convertendo-a em energia química. Na fotossíntese, a energia solar é aproveitada para usar a água que a planta retira do solo e o gás carbônico absorvido do ar, transformando-o em matéria orgânica (carboidratos: glicose, celulose e outros) e desprendendo o oxigênio.

Malgradas as trocas e conversões de energia inerentes ao processo fotossintético, os vegetais absorvem apenas uma pequena parte desta. O processo fotossintético é condicionado por inúmeros parâmetros, dentre os quais a espécie, as condições de luminosidade, os teores em oxigênio, a temperatura do ar, o estresse fisiológico, entre outros. Assim, torna-se evidente que o clima e as características do solo interferem consideravelmente na velocidade de crescimento dos vegetais, de forma que através do mundo uma gama significativa de formações vegetais em equilíbrio com o meio ambiente apresenta um potencial de produção energética bem diversificado, conforme ilustra a Quadro 1.

**Quadro 1** – Produção anual de biomassa seca para as formações vegetais mais típicas

**Table 1** – Annual production of dry biomass for the most typical vegetal formations

Tipo de Ecossistema	Biomassa Seca (Mg ha <sup>-1</sup> )
Tundra	1 a 30
Savanas	2 a 150
Áreas pantanosas	30 a 500
Florestas boreais (taïga)	60 a 400
Florestas temperadas de coníferas	60 a 600
Florestas ombrófilas tropicais	60 a 800

Fonte: Benabdallha (1996).

A biomassa constitui a massa total dos organismos por unidade de superfície ou de volume, capaz de ser aproveitada como insumo energético. No caso particular da biomassa florestal, ela está constituída pelos elementos aéreos e subterrâneos das árvores (troncos, galhos, folhas e raízes), bem como da vegetação herbácea e arbustiva, dos líquens e da serapilheira (biomassa morta) (Service Canadien Des Forêts, 2004).

No contexto puramente energético é preciso distinguir entre a biomassa que foi implantada com a finalidade puramente energética, como as florestas energéticas de *Eucalyptus* spp. no Estado de Minas Gerais, implantadas exclusivamente para atender à demanda industrial do setor siderúrgico, e a biomassa que engloba todos os resíduos orgânicos provenientes de outras atividades, como o bagaço de cana, a palha de arroz, o caroço de algodão, a casca do amendoim, entre outros.

A quantificação da biomassa tem recebido, nesses últimos anos, uma atenção especial na medida em que ela se relaciona diretamente com a fixação do CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) atmosférico, agindo em consequência como redutora das emissões de dióxido de carbono, um dos grandes responsáveis pelo efeito estufa. Todavia, a metodologia utilizada na quantificação da biomassa não tem sido unânime

em contemplar os mesmos procedimentos, tendo em vista que algumas delas não levam em consideração nem a biomassa morta (serapilheira) e nem tão pouco aquela subterrânea (Watzlawick, 2003).

O mundo se encontra diante de uma grave situação para o seu suprimento sustentável de energia, e este problema tem um número reduzido de soluções, principalmente no que tange aos combustíveis fósseis. Cada país deverá, então, concentrar esforços de imediato para que ele possa dispor da maior flexibilidade possível de opções no campo energético. Para tal, é essencial inverter o atual quadro de consumo, dependente de poucas fontes energéticas em fase de esgotamento, para uma estrutura de consumo na qual seja utilizado um maior número de alternativas, e dentre estas, principalmente para os países em desenvolvimento como o Brasil, é que surge a biomassa, que por ser renovável constitui a mais promissora fonte alternativa para uma situação de suprimento energético que só tende a se agravar.

A partir da biomassa podem ser produzidos combustíveis sólidos, líquidos e gasosos. Assim, independentemente da forma e da fonte de energia utilizada, ela tem se mostrado, ao longo de décadas, um dos mais determinantes fatores de desenvolvimento econômico e social dos países industrializados e, por extensão, se tornando igualmente determinante em muitos aspectos da vida econômica e social no contexto atual. Portanto, este estudo pretendeu evidenciar o potencial energético da biomassa florestal e dos resíduos para geração de energia, bem como dos principais processos envolvidos nesta bioconversão.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

Dentre todas as utilizações possíveis para biomassa, a geração de energia pode ser considerada a mais expressiva. Em efeito, a sua combustão constituiu tradicionalmente a fonte de energia mais importante desde o descobrimento do fogo, e teve uma participação

significativa até a Revolução Industrial, quando outras fontes alternativas de energia foram disponibilizadas, de forma a acompanhar o surto do desenvolvimento e a respectiva demanda por produtos industrializados (Infante & Veiras, 2003).

A biomassa representa a quarta fonte de energia em nível global e constitui o principal combustível para 75% da população mundial. No contexto energético satisfaz hoje 14% da demanda energética mundial, com uma significativa participação na matriz energética dos países subdesenvolvidos, onde a sua contribuição pode atingir níveis da ordem de 90%. Todavia, enquanto ela se apresenta como a principal fonte de energia para os países em desenvolvimento, para outros, como alguns países da União Européia, ela satisfaz apenas 2% de suas necessidades energéticas. Neste caso, a produção e a utilização da biomassa para fins energéticos para esses países têm sido o resultado da gestão de suas próprias reservas, ainda que aproximadamente 2.000 ha de florestas tenham sido implantados com essa finalidade pelo conjunto dos países da União Européia (Parlamento Europeu, 2004). Muitos têm sido os argumentos favoráveis ao desenvolvimento de tecnologias para o melhor aproveitamento da biomassa florestal para fins energéticos, porém três deles em particular têm merecido uma atenção especial:

- *Ecológico* - a madeira, por ser um recurso renovável, possibilita a redução significativa das fontes de energia de origem fóssil e a utilização racional desses recursos, além de também limitar as emissões de gases causadores do efeito estufa. O impacto ecológico favorável se manifesta igualmente sobre o plano mais localizado, uma vez que a utilização dos subprodutos da colheita florestal para a mesma finalidade permite a exploração e a valorização mais racionais e otimizadas dos recursos florestais;
- *Econômica* - considerando a possibilidade de aproveitamento de todos os subprodutos

oriundos da cadeia produtiva da matéria-prima florestal e comparativamente à produção energética equivalente, a biomassa florestal oferece empregos em uma escala quatro vezes maior que outras fontes energéticas; e

- *Social* - uma vez que a madeira como suprimento energético contribui com um impacto positivo sobre o desenvolvimento rural, permitindo aos agricultores diversificar suas atividades através do reflorestamento de áreas inadequadas para a agricultura tradicional.

O Brasil, no contexto da geração de energia a partir de fontes renováveis, ocupa atualmente uma posição de destaque no cenário mundial, ao produzir 95% de sua energia elétrica a partir da energia hidráulica e ter 30% do consumo local de energia de base a partir de elementos bióticos, ou seja, a biomassa (Pnud, 2003), que a grosso modo pode ser considerada a maior fonte não utilizada de carboidratos (Vargas, 1979).

Adicionalmente, a energia derivada da biomassa florestal, por ser renovável, ao contrário das formas de energia nuclear e fóssil, admite ciclos de rotações que variam de 5 a 200 anos, dependendo da espécie e dos métodos silviculturais utilizados. Por esta razão, o período de recomposição do material lenhoso pode ser considerado desprezível em comparação com o do carbono (250 a 300 milhões de anos) ou do petróleo (100 a 450 milhões de anos). Comparada aos combustíveis fósseis, a madeira apresenta um baixo teor de enxofre (0,1 a 0,2%) e, por isto, sua combustão é menos nociva à atmosfera do que aquela de combustíveis fósseis.

Estima-se que as emissões de CO<sub>2</sub> oriundas da queima de combustíveis fósseis (petróleo, carvão mineral e gás natural) em indústrias, nas termelétricas, nas emanações de veículos automotivos e nas habitações respondem por aproximadamente 50% do fenômeno. Neste particular, o destino de todo carbono lançado

na atmosfera desde o início da Revolução Industrial, em 1850, é o fundo dos oceanos. Lá ele se encontra depositado sob a forma de carbonatos e bicarbonatos, totalizando aproximadamente 41.000 Giga toneladas (Gt), ou 41 x 10<sup>12</sup> toneladas de carbono (97% do total), enquanto a atmosfera retém apenas 700 Gt (1,6%) e toda biomassa terrestre, por sua vez, retém apenas 600 Gt, ou aproximadamente 1,4% do total (Ab'Sáber et al., 1990). Comparada ao petróleo, por exemplo, a combustão de 1 tonelada seca de madeira evita emissões de CO<sub>2</sub> da ordem de 1.600 kg (Staiss & Pereira, 2001).

Dentro deste contexto, se considerarmos o aumento crescente da concentração de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) na atmosfera e as possíveis consequências sobre as plantas, principalmente em razão do aumento da temperatura, cuja previsão é elevar de 1,5 a 4,5 °C até o ano 2050, controlar o aumento do dióxido de carbono torna-se imprescindível (Watzlawick, 2003). Esses dados demonstram a importância da implementação de estratégias que venham a contribuir para o aumento da participação da biomassa terrestre neste balanço, envolvendo o ciclo do carbono, desde que, naturalmente, sejam favoráveis os critérios de avaliação das fontes de energias renováveis, como o atual estágio tecnológico para o seu aproveitamento racional, as potencialidades para promover a substituição das formas de energias não-renováveis, a valorização energética pelos segmentos interessados e a viabilidade econômica e compatibilidade ambiental com as estratégias concernentes à proteção dos recursos naturais e aos objetivos governamentais.

Estima-se que a cobertura florestal mundial seja da ordem de 3,9 bilhões de hectares, dos quais 886 milhões se encontram no continente latino-americano, devendo-se destacar que o Brasil detém aproximadamente 61%, ou seja, 540,46 milhões de hectares. No contexto produtivo, 374,6 milhões de hectares, ou 69% da cobertura florestal, apresentam um grande

potencial como fonte de matéria-prima para o setor industrial de base florestal; as florestas nativas respondem por 98% desta oferta, ou seja, 367,1 milhões de hectares, enquanto as florestas plantadas respondem por aproximadamente 6,4 milhões de hectares (BNDES, 2002).

Na prática, as principais fontes de matérias lignocelulósicas com potencial de utilização energético são: 1) a atividade de colheita florestal, que dá origem a subprodutos significativamente diversificados, quantitativa e qualitativamente, segundo a espécie e as técnicas silviculturais de colheita utilizadas; 2) a

indústria de transformação da madeira, que produz subprodutos com alto índice de concentração local e consideravelmente heterogêneos; e 3) as culturas de curta e média rotação, com potencial de utilização para fins de energia (Benabdallah, 1996). Nesta classificação poderiam ser incluídos também os resíduos urbanos, e, entre estes, aqueles de origem lignocelulósica (De Souza, 1997).

A transformação energética da biomassa florestal está alicerçada nos processos químicos, termoquímicos e biológicos. A Figura 1 ilustra as possíveis vias de valorização energética da biomassa e seus principais produtos,

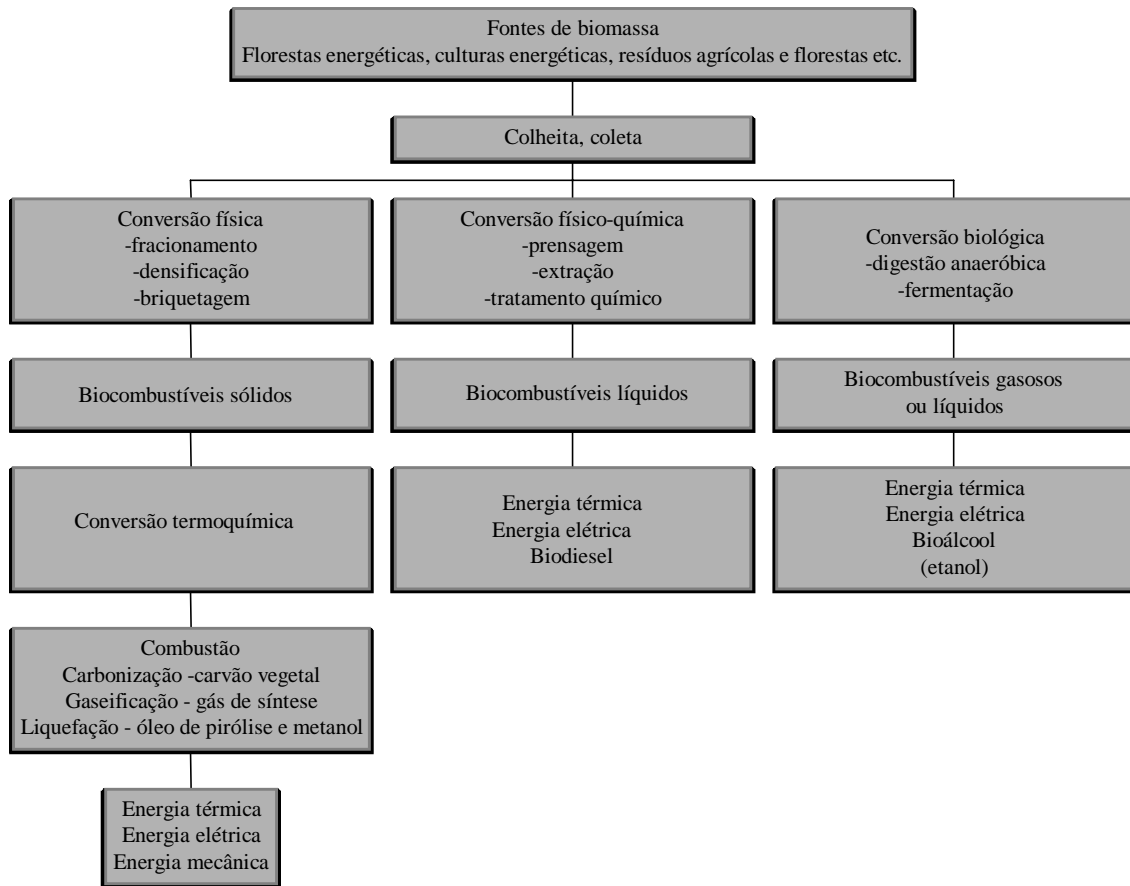


Figura 1 – Estrutura hierárquica dos diferentes processos para produção de energia a partir de biomassa (adaptado de Staiss & Pereira, 2001).

Figure 1 - Hierarchic structure of the different processes for the production of energy from biomass (adapted from STAISS & PEREIRA, 2001).

como também mostra que a valorização energética não é destinada unicamente à produção de calor, mas igualmente de outras formas energéticas, como os açúcares fermentáveis e os carburantes líquidos. Neste contexto, torna-se cada vez mais vantajoso associar a valorização química da biomassa com finalidades energéticas.

A Figura 1 ilustra, ainda, a estrutura hierárquica dos diferentes processos para bio-conversão energética, e o Quadro 2 apresenta os rendimentos energéticos dos principais processos termoquímicos.

A combustão ou pirólise é um processo que consiste em aquecer a biomassa, ou seja, a madeira ou os resíduos das indústrias de transformação. A temperaturas relativamente elevadas, em presença de quantidades controladas de oxigênio, gera um resíduo sólido (carvão vegetal), o líquido pirolenhoso e os gases

combustíveis. O líquido pirolenhoso é constituído de ácidos pirolenhosos solúveis em água (espírito da madeira), como também de produtos fenólicos que constituem os alcatrões. Sistemas mais recentes de pirólise (pirólise a vácuo e flash pirólise) conduzem à formação de produtos bem diferentes. Distinguem-se, assim, diferentes processos de pirólise, segundo a taxa de aquecimento e o tempo de residência. Desta forma, têm-se desde o processo de carbonização clássica, que tem um tempo de duração que pode atingir dias, com uma taxa de aquecimento lento à temperatura de 400 °C, produzindo neste caso, o carvão vegetal, até a metanólise, cujo tempo de residência é de 0,5 a 1,5 segundo, com uma taxa de aquecimento elevada e com uma temperatura de 1.050 °C, cujos resultados são os produtos químicos (Benabdallah, 1996). A Figura 2 ilustra o rendimento da carbonização de 1 tonelada métrica de madeira seca ao ar (12-15% umidade).

**Quadro 2** – Rendimento energético dos principais processos termoquímicos  
*Table 2* – Energy yield of the main thermal - chemical processes

1 Tonelada de Madeira Absolutamente Seca (4.395 kcal kg <sup>-1</sup> )			
	Carbonização = 80% 3.515 kcal kg <sup>-1</sup>	Carbonização 300 kg de carvão vegetal 2.388 kcal kg <sup>-1</sup>	Gaseificação = 75% 3.296 kcal kg <sup>-1</sup>
		Combustão = 80% 1.910 kcal kg <sup>-1</sup>	Gaseificação = 80% 1.910 kcal kg <sup>-1</sup>
Calor q energia	80% 3.515 kcal kg <sup>-1</sup>	44% 1.910 kcal kg <sup>-1</sup>	80% 1.910 kcal kg <sup>-1</sup>
	Vapor = 12,5% 440 kcal kg <sup>-1</sup> Alternador = 90% 394 kcal kg <sup>-1</sup>	Motor = 28% 535 kcal kg <sup>-1</sup> Alternador = 90% 482 kcal kg <sup>-1</sup>	Motor = 28% 922 kcal kg <sup>-1</sup> Alternador = 90% 831 kcal kg <sup>-1</sup>
Eletricidade rendimento q energia	90% 396 kcal kg <sup>-1</sup>	11% 482 kcal kg <sup>-1</sup>	18,9% 831 kcal kg <sup>-1</sup>

Fonte: Benabdallah (1996) adaptado.

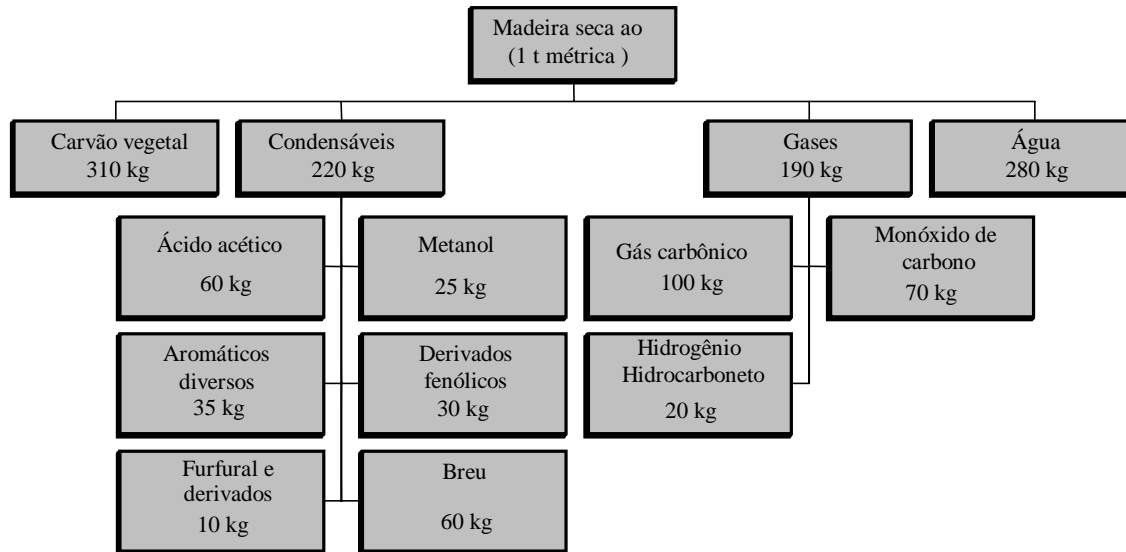


Figura 2 – Rendimento do processo de carbonização da madeira seca ao ar (adaptado de Benabdallah, 1996).

Figura 2 – Air-dried wood carbonization process yield (adapted from Benabdallah, 1996).

Ressalta-se que a carbonização é uma pirólise lenta e consiste em promover a decomposição térmica da biomassa sob ação do calor, na presença de quantidades controladas de ar, gerando carvão vegetal, diferentes produtos químicos e combustíveis líquidos e gasosos. Carbonização é o nome que recebe a pirólise quando o objetivo da operação é a produção de carvão vegetal, ou ainda destilação seca, quando o objetivo do processo é a recuperação fracionada dos efluentes líquidos, denominados pirolenhosos. A carbonização pode ser considerada otimizada desde a década de 1930, tendo em vista que a partir daí se conseguia recuperar o conjunto dos produtos líquidos e por intermédio da destilação permitia-se a obtenção de ácido acético e metanol, principalmente, e muito freqüentemente produtos gasosos reciclados dentro do próprio processo de carbonização. Ainda que possam existir diferenças entre a qualidade do carvão vegetal produzido em função de uma série de variáveis (temperatura e tempo de carbonização, espécie, tipo de forno etc.), as características médias deste

resíduo sólido energético no estado completamente seco (Benabdallah, 1996) seriam:

- Densidade aparente: 0,1 a 0,5 g cm<sup>-3</sup>.
- Superfície específica: 1-2 m<sup>3</sup> g<sup>-1</sup>.
- Teor em matérias voláteis: 7-25%.
- Teor em carbono fixo: 72-90%.
- Poder calorífico inferior: 6.928 – 8.003 kcal kg<sup>-1</sup>.
- Cinzas: 0,5-10%.

Com relação aos processos de conversão físico-química da biomassa, a utilização, por exemplo, dos resíduos de determinadas culturas como a do girassol, do babaçu, do dendê, da soja, do pequi, entre outras, vem recebendo atenção especial, pela possibilidade de sua transformação em uma forma de combustível alternativo para o óleo diesel, o biodiesel. Este processo faz apelo uma técnica conhecida, na Química Industrial, por “Transesterificação”. Esta consiste da reação de óleos vegetais com um produto intermediário ativo (metóxido ou

etóxido), oriundo da reação entre álcoois (metanol ou etanol) e uma base (hidróxido de sódio ou de potássio). Os produtos dessa reação química são a glicerina e uma mistura de ésteres etílicos ou metílicos, que recebem o nome de biodiesel. Por apresentar características físico-químicas muito semelhantes às do óleo diesel tradicional, pode ser usado em motores de combustão interna de uso veicular ou estacionário (Cefetpe, 2004).

O biodiesel foi definido pela “*National Biodiesel Board*” dos Estados Unidos como o derivado monoalquil-éster de ácidos graxos de cadeia longa, proveniente de fontes renováveis como óleos vegetais ou gordura animal, cuja utilização está associada à substituição de combustíveis fósseis em motores de ignição por compressão (motores do ciclo diesel). Como produto, pode-se dizer que o biodiesel tem as seguintes características: 1) é virtualmente livre de enxofre e de aromáticos; 2) tem alto número de cetano; 3) possui teor médio de oxigênio em torno de 11%; 4) possui maior viscosidade e maior ponto de fulgor que o diesel convencional; 5) possui nicho de mercado diretamente associado às atividades agrícolas; e, finalmente, 6) tem preço de mercado relativamente superior ao do diesel comercial. Todavia, o processo foi otimizado de forma que a sua produção pode ser viabilizada facilmente a um preço comercialmente competitivo com o do óleo diesel, ou seja, aquele observado diretamente nas bombas dos postos de abastecimento (Costa Neto et al., 2000).

A consolidação do uso do biodiesel como combustível é potencialmente promissor para o mundo inteiro, por estar diretamente associado ao meio ambiente, pelo fato de ele possibilitar, ao contrário do óleo diesel, a redução qualitativa e quantitativa dos níveis de poluição ambiental, bem como por valorizar o potencial que representa como fonte de energia renovável aos resíduos agrícolas e agroindustriais.

Através do Programa Brasileiro de Biocombustíveis, o governo pretende gerar, até

2005, 200 mil novos empregos, e através desse programa o País, que importará neste mesmo ano cerca de 18% do óleo diesel que consome, a um custo de US\$ 1,22 bilhão, pretende adicionar 5% de biocombustível em todo o óleo diesel disponibilizado para o consumo. Esta estratégia representará uma economia de 1,8 bilhão de litros de diesel importado no primeiro ano de implantação do referido programa.

O Brasil é o primeiro país a dominar a tecnologia para produção de biodiesel totalmente renovável, contando no processo com o álcool de cana-de-açúcar (etanol) no lugar de metanol, um derivado do petróleo, reduzindo assim os custos de produção. Nas formas de biodiesel desenvolvidas em outros países o metanol é utilizado como reagente para a queima do óleo vegetal. Desta forma, o Brasil, que produz 57 milhões de hectares de cana, 90 milhões de grãos e mais 220 milhões de hectares de pastagem, poderá liderar plenamente o mercado mundial de biocombustíveis, demonstrando assim o impacto significativo da agricultura energética no contexto ambiental, ao reduzir os efeitos de emissões nocivas que comprometem todo o Planeta e, também, pela possibilidade de utilização de fontes alternativas e renováveis de energia em face do esgotamento eminente das fontes naturais, como o petróleo (Centro de Comunicação Social, 2004). No Quadro 3 estão listadas as especificações de alguns óleos vegetais *in natura* com potencial de produção de biodiesel e as do óleo diesel convencional.

Finalmente, com relação aos processos biológicos de conversão da biomassa que conduzem, inclusive, à geração de biocombustíveis líquidos ou gasosos, com o advento da biotecnologia puderam ser explorados, de maneira controlada, o metabolismo ativo e a eficácia dos microrganismos e sua capacidade de se multiplicar em meio propício e de produzir enzimas necessárias ao fracionamento das moléculas lignocelulósicas para obter, em seguida, biocarburantes de um lado e subprodutos da química fina do outro.



**Quadro 3** – Especificações de alguns óleos vegetais *in natura* e do óleo diesel  
**Table 3** – Specifications of some vegetal oils *in natura* and diesel oil

Característica	Tipo de Óleo					
	Mamona	Babaçu	Dendê	Soja	Pequi	Diesel
Poder calorífico (kcal kg <sup>-1</sup> )	8913	9049	8946	9421	9330	10950
Ponto de névoa	10	26	31	13	26	0
Índice de cetano	nd	38	38-40	36-39	38	40
Densidade a 25 °C	0,9578	0,9153	0,9118	nd	0,9102	0,8497
Viscosidade a 37,8 °C (cSt)	285	30,3	36,8	36,8	47,0	2,0-4,3
Destilação a 90% (°C)	nd	349	359	370	nd	338
Cinzas (%)	nd	0,03	0,01	nd	0,01	0,014
Cor (ASTM)	1,0	0,5	1,0	nd	2,0	2,0
Resíduo de carbono Conradson (%)	Nd	0,28	0,54	0,54	nd	0,35

Fonte: Neto et al. (2000).

Os açúcares fermentáveis pela conversão da celulose (glucose) e das hemiceluloses (hexoses e pentoses) contidas nas paredes celulares lignocelulósicas são, em seguida, transformadas pela fermentação enzimática em vários produtos da química fina e em produtos energéticos, dos quais os mais comuns são o etanol e o butanol. Neste caso, a maioria das enzimas é produzida pelos microorganismos conhecidos como: *Candida utilis*, *Clostridium acetobutylicum*, *Pachysolen tannophylus*, *Pichia stipitis*, *Saccharomyces cerevisiae*, *Trichoderma reesei* e *Trichoderma viride*, entre outros. A metanolização é também considerada um processo de conversão energética de suprodutos lignocelulósicos. Ela está associada ao processo de fermentação anaeróbica dos produtos biológicos, entre os quais os lignocelulósicos. O biogás (metano) é, em seguida, utilizado na forma segundo a qual foi obtido, ou então depurado para melhorar o seu rendimento, se as condições tecnológicas o permitirem (Benabdallah, 1996).

A propósito, o biogás resulta da fermentação anaeróbica microbiana de matéria orgânica na ausência de oxigênio do ar e na presença de água a um intervalo de temperatura de 20 a 55 °C. Ele, normalmente, é constituído de 50 a 80% de metano (CH<sub>4</sub>), de 20 a 50% de dióxido

de carbono (CO<sub>2</sub>) e de outros gases em baixas concentrações. Em relação ao teor de metano, o poder calorífico de 1 metro cúbico de biogás equivale, aproximadamente, a 0,6 metro cúbico de gasogênio ou 0,6 metro cúbico de gás natural. Antes de o gás ser utilizado em motores de combustão, torna-se necessário proceder a sua purificação de forma a remover o enxofre. A co-digestão melhora substancialmente a rentabilidade de produção de biogás, consistindo na digestão anaeróbica de outros resíduos orgânicos que poderiam estar associados aos resíduos agrícolas e florestais. A produção de bioetanol se baseia em substratos com elevado teor de açúcar, como a cana-de-açúcar, o sorgo sacarínico, bem como em plantas com elevado teor de amido, entre as quais o milho, batata e cereais diversos.

O bioetanol é obtido por fermentação de biomassa por ação de populações microbianas. As plantas com elevado teor em açúcares são favorecidas porque a solução inicial açucarada pode ser gerada diretamente através do esmagamento mecânico, como seria no caso da cana-de-açúcar. A solução seria, então, fermentada e a água e o álcool separados por processo de destilação. O sorgo sacarínico, por exemplo, produz de 8 a 10 toneladas de açúcar por hectare, o que equivale a 4.800 ou 6.000 litros

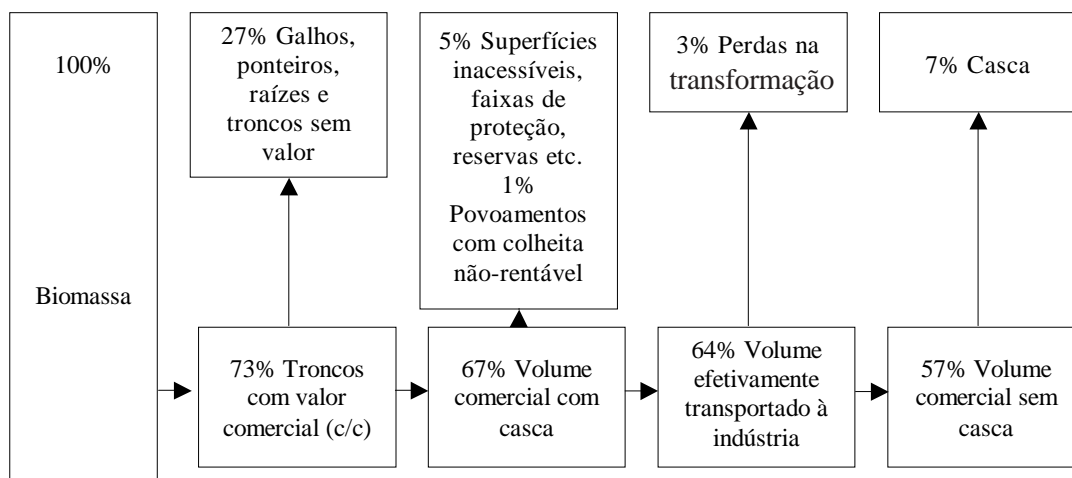
de bioetanol. O processo para obtenção do bioálcool de substratos celulósicos é relativamente mais oneroso do ponto de vista econômico, e o processo tecnológico é um pouco mais complexo. Todavia, o álcool produzido substitui plenamente a gasolina nos motores de ciclo Otto (Staiss & Pereira, 2001).

A utilização racional da biomassa oriunda dessas fontes diferenciadas não tem sido totalmente eficiente, considerando que um dos principais entraves para sua utilização generalizada é justamente a sua heterogeneidade, tanto no aspecto físico (ex. forma e umidade) quanto no aspecto químico (ex. composição molecular, teor em matérias minerais etc). Portanto, tratamentos adicionais de subprodutos como a secagem, a uniformização granulométrica e até mesmo a densificação desses subprodutos têm sido recomendados, inviabilizando assim a sua utilização maciça. No caso específico dos subprodutos da colheita florestal cuja diversidade é relativamente grande e inclui as folhas, as acículas, os galhos, a casca, a madeira morta e os tocos remanescentes, os parâmetros mais importantes continuam sendo a espécie e o diâmetro das árvores. Estima-se

que o percentual de biomassa disponível para geração de energia decorrente das atividades colheita, transporte e transformação mecânica da madeira seria da ordem de 43%, conforme ilustra a Figura 3.

A Figura 3 mostra que ao longo da cadeia produtiva somente 57% do volume total será efetivamente processado. Reportando-se a 1986, o índice de aproveitamento da madeira, comparado ao apresentado na Figura 3, era de apenas de 45% (Gauthier, 1986). Danon et al. (1997) também relatam que os subprodutos das atividades de colheita florestal equivalem, em média, a 50% da biomassa florestal total.

Segundo estimativas da FAO (1999), o Brasil deverá produzir, até o final desta década, em torno de 2,6 bilhões de metros cúbicos de madeira, dos quais 67% serão utilizados para atender à demanda do setor industrial e o restante, 33%, para fins exclusivos de geração de energia. Com base nas informações da Figura 1, a expectativa de geração de resíduos decorrentes das atividades de colheita florestal e processamento mecânico da madeira será da ordem de 0,75 bilhão de metros cúbicos de



**Figura 3** – Repartição da biomassa de uma árvore (adaptado de Benabdallah, 1996).

*Figura 3* – Biomass distribution of a tree (adapted from Benabdallah, 1996).

biomassa florestal em todas as suas formas, o qual, juntamente com o percentual destinado à geração de energia, atingiria a cifra de aproximadamente 1,6 bilhão de metros cúbicos. Ressalta-se que ao final do mesmo período a expectativa de consumo total de madeira no Brasil será da ordem de 2,48 bilhões de metros cúbicos, evidenciando um déficit inevitável.

Os dados apresentados no parágrafo anterior demonstram que a participação da madeira para fins energéticos (lenha), ao final desta década, permanecerá mais ou menos constante, a exemplo do que ocorreu no final da última década. Como conseqüência, a madeira contribuiu, na década passada, com aproximadamente 10% da produção de energia primária na matriz energética nacional, tendo 40% desta sido utilizada para produção de carvão vegetal (Remade, 2003). Dentro de um cenário em que a demanda de energia será igualmente dinâmica para atender às necessidades internas do País, supõe-se que este comportamento de estabilidade relativa do consumo de lenha para fins energéticos estaria associado à participação de uma outra fonte alternativa de energia, que muito provavelmente deverá ser o gás natural. A propósito, o Brasil caminha na direção do modelo de matriz energética mundial, na qual existe uma maior participação de gás natural e uma menor participação de energia hidráulica. No entanto, ainda dentro deste cenário, o País apresenta uma situação privilegiada em termos de utilização de fontes renováveis de energia (Brasil, 2003).

- No setor industrial de processamento mecânico da madeira são considerados subprodutos do processo industrial a serragem, o cepilho e a lenha, originados da operação de serras, plainas (disponível somente em estado seco); e os subprodutos de maiores dimensões (compostos por costaneiras, aparas, refilos, casca e outros). Neste perfil industrial se enquadram as serrarias (desdobro de toras em pranchas, tábuas, ripas e outros elementos de menor dimensão); as

serrarias/beneficiamento (além da transformação primária, também executam uma fase posterior de beneficiamento); o beneficiamento (transforma a madeira em componentes para móveis, esquadrias, pisos, forros e outros); e as laminadoras/fábricas de compensado (indústrias produtoras de compensados e as integradas laminação/compensado). Esses subprodutos são distribuídos em duas classes, segundo o conteúdo de umidade: estado seco (umidade inferior a 15%, base seca) e estado verde (umidade média em torno de 50%, base seca). Quanto à destinação, os subprodutos são classificados em subproduto consumido, de uso industrial, de uso não-industrial e disponível. A conceituação destas quatro destinações pode ser assim definida pelo Ministério da Agricultura (1984):

- Subproduto consumido – é todo aquele utilizado dentro da própria indústria (combustão, reaproveitamento industrial etc.);
- Subproduto de uso industrial – é aquele utilizado para geração de energia e, ou, matéria-prima para outros processos industriais próprio ou de terceiros;
- Subproduto de uso não-industrial – é o que já se encontra comprometido, principalmente sob o aspecto social, utilizado pela população de baixa renda e,
- Subproduto disponível – quando se encontra sem alguma utilização específica, sendo utilizado para a combustão ou descartado. É a categoria de maior interesse, por se apresentar imediatamente disponível para qualquer utilização

No Brasil, infelizmente, não existem estatísticas oficiais que forneçam com exatidão os rendimentos operacionais dos diferentes processos de transformação mecânica da madeira, bem como a quantificação total dos resíduos gerados no processo, razão pela qual são utilizados valores médios de unidades industriais, onde o setor se encontra mais consolidado.

Segundo Lima (1998), estima-se para as serrarias uma média de rendimento da ordem de 50%, o que, de forma sucinta, significaria que para cada metro cúbico de madeira processada 0,5 m cúbico seria representado pelos resíduos nas suas mais diferentes formas, com todas as suas implicações e dificuldades para viabilizar, de alguma forma, a sua utilização.

Em 1991, o Brasil foi responsável por 4% da produção mundial de toras para serraria e laminação, totalizando 37.968.000 milhões de metros cúbicos. Desta forma, aproximadamente 49,29%, ou 18,7 milhões de metros cúbicos, foram convertidos em produto acabado, gerando 19,2 milhões de metros cúbicos de resíduos no processo. Neste processo de geração de resíduos, as costaneiras, os refilos, as aparas e a casca respondem por 71%, a serragem por 22% e, finalmente, os cepilhos ou as maravalhas por 7% (Brito, 1995). Atualmente, a expectativa anual de produção de resíduos oriundos da biomassa vegetal é da ordem de 254,7 milhões de toneladas, e o segmento industrial de base florestal responde por aproximadamente 60 milhões de toneladas, ou seja, 23,6% do total disponibilizado no País (Quirino, 2003).

Nas indústrias de polpa e papel, ainda que a combustão do licor negro residual concentrado possa ser contabilizada no processo de geração de energia, a casca e a serragem geradas no processo industrial constituem as principais fontes de subprodutos. A Riocel, por exemplo, com uma produção anual de 300 mil toneladas de celulose de fibra curta, gera em torno de 1.300 t de casca e 1.900 t de serragem mensalmente. E para essas duas categorias de subprodutos a eficiência de uso é da ordem de 100%. No caso da casca, além de ela ser utilizada como fertilizante orgânico pela própria empresa, uma parte é disponibilizada para terceiros, com este mesmo propósito e como substrato para vasos. A serragem, por sua vez, tem sido largamente utilizada para queima e conseqüente geração de vapor e também como

leito para animais domésticos e cama para aviários (Zini et al., 1997).

Cortez (s/d), relatou que para uma produção anual combinada de *Pinus* e *Eucalyptus* no País, da ordem de 131 milhões de metros cúbicos de madeira, são produzidas anualmente 9 milhões de toneladas de casca nos diferentes pátios industriais. A produção total de madeira serrada (coníferas e folhosas), da ordem de 22,5 milhões de toneladas anualmente, coloca o Brasil em quinto lugar no mundo em consumo, todavia este significativamente distante daquele dos Estados Unidos da América (110 milhões) e da Rússia (90 milhões). Com a produção de 22,5 milhões de toneladas e considerando uma eficiência industrial da ordem de 50%, serão obtidas nada menos do que outros 22,5 milhões de toneladas de resíduos, em todas as suas formas (serragem, costaneiras, pontas, lascas, cascas e maravalhas), com um grande potencial de aproveitamento, inclusive para geração de energia, quer seja na forma de briquetes de madeira, carvão vegetal, briquetes de carvão, peletes e até mesmo na combustão direta (De Souza, 1997). O Quadro 4 ilustra a produção de resíduos das indústrias madeireiras dos Estados do Paraná e Santa Catarina, em 1980.

O Paraná, além de ter contribuído, em 1980, com uma produção significativa de resíduos oriundos do setor industrial de base florestal (Quadro 4) no triênio 1980/1983, segundo o Balanço Energético do Paraná, realizado pela COPEL, teve uma economia 1.193.000 tep (toneladas equivalentes de petróleo) ao utilizar a madeira para fins energéticos (Gauthier, 1986).

Concernente à biomassa florestal não são observadas diferenças significativas na composição química elementar das células lignocelulósicas. Os principais elementos químicos da madeira são o carbono (50%), o hidrogênio (6%), o oxigênio (45%), o nitrogênio (0,1 à 1%) e as cinzas da madeira (cálcio, potássio e magnésio). Geralmente, o teor de cinzas das espécies de zonas temperadas é  $\leq 0,2\%$  ou  $\geq 1\%$  da massa

absolutamente seca da madeira. Certas espécies tropicais podem apresentar quantidades significativamente superiores, devido à presença do silício. Esses componentes orgânicos da madeira formam, em grande parte, a celulose, as hemiceluloses (polioses), a lignina, pequenas quantidades de pectina e outros extrativos (Benabdallah, 1996). O Quadro 5 ilustra a composição química da madeira em porcentagem de sua massa absolutamente seca.

A grande versatilidade de uso da biomassa florestal no setor inclui, entre outros, desde a produção de energia até fabricação de móveis, chapas e de papel, este último certamente o seu produto mais nobre. Os avanços tecnológicos decorrentes da própria expansão do setor permitiram que, hoje, fossem utilizadas espécies para finalidades específicas. Dentre

os critérios técnicos considerados dentro deste contexto, a classificação das espécies através de sua composição química pode ser considerada a mais adequada e racional. Desta forma, o Brasil dispõe hoje de alternativas lenhosas mais adequadas, por exemplo, para produção de carvão vegetal, que requer um teor de lignina significativamente superior àquele das espécies apropriadas para fabricação de polpa celulósica, nas quais a fração holocelulósica se reveste de maior importância, em relação às primeiras.

No primeiro caso, para as mesmas condições de carbonização, espécies com teores de lignina significativamente mais elevados permitirão maior quantidade de carbono no resíduo (carvão vegetal), o que irá contribuir significativamente com o poder calorífico do

**Quadro 4** – Produção de resíduos das indústrias madeireiras dos Estados do Paraná e Santa Catarina, em 1980

*Table 4* – Residue production by the lumber industries in the states of Paraná and Santa Catarina in 1980

Tipo de Indústria	Consumo de Matéria-Prima (t) <sup>(1)</sup>	Produção (t) <sup>(2)</sup>	Subprodutos (t) <sup>(3)</sup>			Total Geral (t)
			Cepilho	Serragem	Lenha	
Serraria	513.678	292.394	2412	65.258	156.614	224.284
Serraria/beneficiamento	205.334	110.039	13.814	23.847	57.434	95.095
Beneficiamento	152.322	104.782	21.501	8.020	18.019	47.540
Laminadoras/fábrica de compensado	369.713	216.920	253	2.966	149.574	152.793
Total	1.241.047	724.137	37.980	100.091	381.641	519.712

<sup>(1)</sup> Coníferas e folhosas; <sup>(2)</sup> madeira serrada de coníferas e folhosas e <sup>(3)</sup> peso absolutamente seco (0% de umidade).

Fonte: Ministério da Agricultura (1984).

**Tabela 5** – Composição química da madeira em porcentagem de seu peso seco

*Table 5* – Chemical composition of the wood in dry weight percent

Essência	Celulose	Hemiceluloses	Lignina	Outros
Resinosa	40 a 50%	20%	20 a 35%	1 a 5%
Folhosa	40 a 50%	5 a 35%	7 a 35%	1 a 5%

Fonte: Benabdallah (1996).

produto final. Da mesma forma, espécies com maior teor de holocelulose são as de maior interesse na fabricação da polpa celulósica (celulose química), por permitirem maiores rendimentos industriais. Através da análise química das espécies lignocelulósicas podem ser estabelecidos padrões mais apropriados para os diferentes processos de processamento da madeira, bem como de sua própria bioconversão. O Quadro 6 apresenta os resultados da análise química da madeira e da casca de algumas espécies de interesse no Brasil, e o Quadro 7 lista o poder calorífico de alguns combustíveis.

Os resíduos agrícolas vêm se constituindo uma das mais expressivas fontes de carboidratos não-utilizadas de forma devida, que poderiam ser convertidas em combustíveis líquidos, sólidos e gasosos, além de outros processos de bioconversão para fins industriais (Vargas, 1979).

Ainda que sejam produzidas fontes diferenciadas de resíduos agrícolas, a palha de arroz e o bagaço de cana-de-açúcar são aqueles

de maior importância econômica para o Brasil. A casca de arroz é praticamente produzida em todo o País, destacando-se os Estados do Rio Grande do Sul, Goiás, Mato Grosso, Maranhão, Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Paraná e São Paulo, e o bagaço é gerado principalmente nas Regiões Sudeste e Nordeste (De Souza, 1997). O Quadro 8 ilustra as principais categorias de resíduos agrícolas no Brasil, com potencial de utilização para fins energéticos, bem como algumas de suas características.

A casca de arroz apresenta um PCI (poder calorífico inferior) da ordem de 3.500 kcal kg<sup>-1</sup>, portanto tem, naturalmente, um grande potencial para fins energéticos, principalmente quando utilizada dentro da própria agroindústria. Todavia, o pouco interesse existente no seu aproveitamento racional como fonte energética é o principal responsável pelo atual estado da arte da tecnologia, e tem as suas raízes de produção em regiões às vezes distantes da sua potencial utilização, que, somada à sua baixa densidade, ao armazenamento e ao transporte, constituem obstáculos ao seu aproveitamento. Porém, agora, quando este resíduo se

**Quadro 6** – Composição química da madeira e da casca de algumas espécies de madeira  
*Table 6* – Chemical composition of the wood and the bark of some wooden species

Espécie	Lignina	Celulose	Pentosanas	Holocelulose	Cinzas
<b>Madeira (%)</b>					
<i>Pinus elliotti</i> <sup>(1)</sup>	27,80	59,4	8,30		0,30
Pinheiro-do-paraná <sup>(1)</sup>	28,00	-	8,60		0,20
Acácia-negra <sup>(1)</sup>	20,80	62,0	18,60		0,50
<i>Eucalyptus urophylla</i> <sup>(3)</sup>	27,81	-	14,37	85,43	0,18
<i>Eucalyptus urophylla</i> <sup>(2)</sup>	25,10	-	-	69,60	-
<b>Casca (%)</b>					
<i>Eucalyptus saligna</i> <sup>(1)</sup>	11,20	39,7	13,00	-	8,00
<i>Eucalyptus urophylla</i> ( <i>E. alba</i> de Rio Claro) <sup>(1)</sup>	18,90	40,5	14,00	-	4,80
<i>Eucalyptus grandis</i> <sup>(1)</sup>	11,10	40,0	13,50	-	6,40
<i>Eucalyptus citriodora</i> <sup>(1)</sup>	16,30	44,0	21,10	-	2,60
<i>Eucalyptus urophylla</i> <sup>(3)</sup>	25,73	-	11,77	48,67	9,98

Fonte: <sup>(1)</sup> D'Almeida (1988), <sup>(2)</sup> Brito et al. (1987) e <sup>(3)</sup> Foelkel et al. (1978).

**Quadro 7** – Poder calorífico de alguns combustíveis**Tabela 7** – Heating value of some fuels

Combustível					
Lenhosos	kcal kg <sup>-1</sup>	Fóssil	kcal kg <sup>-1</sup>	Gasoso	kg m <sup>-3</sup>
Celulose	3.797	Turfa	3.439	Gás natural	8.622
Lignina	5.995	Coque	7.308	Propano	21.997
Amido	3.797	Óleo pesado	9.649	Butano	28.446
Açúcar	3.797	Óleo leve	10.055		
Carbono puro	8.049	Óleo diesel	10.750		
Casca	4.991	Petróleo	10.800		
Madeira	4.394				
Lenha catada	3.300				
Lenha comercial	3.300				
Carvão vegetal	6.800				

Fontes: Brasil (1997) e Benabdallah (1996).

**Quadro 8** – Principais categorias de resíduos agrícolas no Brasil**Table 8** – Main categories of agricultural residues in Brazil

Matéria-Prima	Percentual em Resíduos	Poder Calorífico (kcal kg <sup>-1</sup> ) <sup>(1)</sup>
Algodão	50	3.800
Arroz	20 a 25	3.300
Coco	50	4.200
Café	20	4.300
Cana-de-açúcar	80	3.600
Girassol	10 a 15	3.200
Milho	25 a 30	4.000

<sup>1</sup> Teor de umidade 10%.

Fonte: Gauthier (1986).

apresenta potencialmente apto como substituto de outras fontes de energia obtidas a maior custo, o seu uso racional adquire novas proporções (Ministério da Agricultura, 1984).

Para a biomassa sólida em particular (florestal, resíduos agrícolas, resíduos urbanos etc.), as propriedades físicas mais importantes

que se encontram diretamente relacionadas com a sua utilização para fins energéticos são o conteúdo de umidade residual (base seca) e a sua densidade energética. A baixa densidade energética da biomassa sólida, em comparação com o petróleo e o carvão mineral, resulta em custos elevados de transporte e armazenamento. Assim, o desenvolvimento contínuo de técnicas para aumentar a concentração de energia ampliará o espectro de utilização da biomassa na transformação energética, por exemplo a briquetagem. O conteúdo de umidade influencia significativamente a qualidade de combustão e o poder calorífico da biomassa. Por exemplo, o poder calorífico da madeira duplica se o seu teor de umidade de 50% for reduzido para 20%. Em comparação ao petróleo, cujo poder calorífico é de 42 MJ kg<sup>-1</sup> (10.031 kcal kg<sup>-1</sup>), a madeira seca ao ar teria um poder calorífico da ordem de 14 MJ kg<sup>-1</sup> (3.349 kcal kg<sup>-1</sup>). Para igual conteúdo de umidade os poderes caloríficos dos diferentes biocombustíveis não se distinguem significativamente entre si (Staiss & Pereira, 2001).

No caso da casca de arroz, a sua densificação energética seria uma alternativa técnica e economicamente viável para adequá-la como fonte de energia. O seu briquete poderia ser utilizado, entre outros, como combustível de gaseificadores, fornalhas e caldeiras industriais. A propósito, a briquetagem consiste na aplicação de pressão a uma massa de partículas, com ou sem a adição de ligante, e com ou sem tratamento térmico posterior. O processo exige bons conhecimentos sobre as forças de coesão entre sólidos, adesividade do ligante, comportamento do conjunto de partícula-ligante e, fundamentalmente, propriedades físicas das partículas, química de superfície e mudanças físicas e químicas durante o processo de aquecimento reológico (Quirino & Brito, 1991).

Já na década de 1980, aproximadamente, 25-30% da casca de arroz produzida no País vinha sendo utilizada na geração de calor para secagem “mecânica” do próprio produto. Todavia, resultava em um excedente sem uso energético definido em torno de 1,6 milhão de toneladas, ou seja, um volume de 4,4 milhões de metros cúbicos de lenha equivalente, ou ainda, 29.500 hectares de florestas de *Eucalyptus*, com cinco anos de idade e com níveis de produtividade média de 150 metros cúbicos por hectare. As principais formas de utilização da casca de arroz no Brasil tem sido, ao longo de décadas:

- Secagem do próprio grão nas áreas de produção através da queima em fornalhas.
- Cama para equinos, suínos, frangos e outros animais.
- Adubação orgânica, uma vez compostada.
- Peletização e posteriormente incorporada em ração para ruminantes.
- Briquetagem.

A disponibilidade dos resíduos agrícolas no Brasil tem alcançado valores expressivos ao longo de décadas. Entretanto, a utilização do pleno potencial desta biomassa, principalmente

para fins energéticos, tem sido incipiente em razão das dificuldades operacionais relacionadas com o transporte, o armazenamento, a densificação e, sobretudo, o teor de umidade relativamente alto e muito variável na origem, podendo ultrapassar facilmente a cifra de 50%. Em consequência, haverá um comprometimento no processo de conversão e da equivalência energética em função das implicações do teor de umidade com o poder calorífico ( $\text{kcal kg}^{-1}$ ) (Gauthier, 1986).

Em 1980, a produção nacional de arroz foi da ordem de 9.775.720 t, o que gerou, consequentemente, cerca de 2.731.100 t de casca (Ministério da Agricultura (1984). A estimativa da utilização deste resíduo para geração de energia calórica através da sua combustão direta em fornalha, briquetada e, ou, gaseificada, para gerar energia calórica e mecânica, permitiu as seguintes equivalências: 1) 886.000 t de óleo combustível ( $\text{PCI } 10.350 \text{ kcal kg}^{-1}$ ), 2) 7.619.700  $\text{m}^3$  de lenha ( $3.340 \text{ kcal kg}^{-1}$ ) e 3) 50.800 ha de floresta energética de *Eucalyptus* com cinco anos e primeiro corte. Neste mesmo período, fez-se uma estimativa da equivalência energética do excedente da casca de arroz para alguns Estados da Federação, e esses dados estão apresentados no Quadro 9. O Quadro 10 ilustra esta mesma equivalência, todavia com os dados atualizados da safra agrícola de 2002 (IBGE, 2003). Para efeito de cálculo dos valores apresentados no Quadro 10, foram considerados os mesmos índices de conversão utilizados no Quadro 9, com exceção do fator de conversão para quantificação da casca.

Quanto ao bagaço de cana-de-açúcar, seu aproveitamento para fins energéticos encontra-se em um estágio limitado. Embora se reconheça a influência de fatores básicos de produtividade, como o clima, o solo e as variedades, a produção agrícola é, seguramente, dependente da energia investida na cultura, a qual, notadamente, depende de certos “combustíveis” que, em sua maioria, dependem do petróleo. Assim, tem-se um impasse; pois não se pode



**Tabela 9** – Estimativa da casca de arroz excedente e sua equivalência energética, por Estado, em 1980  
**Table 9** – Surplus rice husk estimate and its energy equivalence per state in 1980

Estado	Casca de Arroz (t) <sup>(1)</sup>	Consumo (t) <sup>(2)</sup>	Excedente (t) <sup>(3)</sup>	Equivalente	
				Lenha (m <sup>3</sup> )	Florestas (ha)
São Paulo	126.000	31.500	94.500	263.655	1.758
Minas Gerais	250.149	62.537	187.612	523.473	3.490
Paraná	153.120	38.280	114.840	320.404	2.136
Rio Grande do Sul	550.413	137.603	412.810	1.151.739	7.678
Santa Catarina	102.928	25.732	77.196	215.377	1.436
Total	1.182.610	295.652	886.958	2.474.648	16.498

Fonte: Ministério da Agricultura, 1984.

<sup>(1)</sup> Considerou-se o rendimento em casca de 30% para SP e MG e de 24% para SC e RS; <sup>(2)</sup> considerou-se um coeficiente de consumo para o conjunto dos Estados da ordem de 25%; <sup>(3)</sup> PCI da casca: 3.500 kcal kg<sup>-1</sup>; da lenha: 3.340kcal kg<sup>-1</sup>, e para o *Eucalyptus* com cinco anos: 375 kg m<sup>-3</sup> e 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

**Quadro 10** – Estimativa da casca de arroz excedente e sua equivalência energética, por região  
**Table 10** – Surplus rice husk estimate and its energy equivalence per region

Região	Produção		Consumo (t) <sup>(2)</sup>	Excedente (t) <sup>(3)</sup>	Equivalente	
	Arroz (t)	Casca (t) <sup>(1)</sup>			Lenha (m <sup>3</sup> )	Florestas (ha)
Norte	977.222,00	244.305,50	61.076,38	183.229,13	512.017,51	3.413,45
Nordeste	928.830,00	232.207,50	58.051,88	174.155,63	486.662,43	3.244,42
Sudeste	20.617.744,00	5.154.436,00	1.288.609,00	3.865.827,00	10.802.710,18	72.018,07
Sul	14.166.903,00	3.541.725,75	885.431,44	2.656.294,31	7.422.778,52	49.485,19
Centro-Oeste	560.000,00	140.000,00	35.000,00	105.000,00	293.413,17	1.956,09
Brasil	43.351.684,00	10.837.921,00	2.709.480,25	8.128.440,75	22.714.205,69	151.428,04

<sup>(1)</sup> Considerou-se o rendimento em casca de 25% para todas as regiões; <sup>(2)</sup> considerou-se um coeficiente de consumo para o conjunto dos Estados da ordem de 25%; e <sup>(3)</sup> PCI da casca: 3500 kcal kg<sup>-1</sup>; da lenha: 3.340kcal kg<sup>-1</sup>, e para o *Eucalyptus* com cinco anos: 375 kg m<sup>-3</sup> e 150 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>.

ignorar o enorme potencial para o desenvolvimento agrícola em um país como o Brasil e também não se pode menosprezar as dificuldades envolvidas. Logo, se por um lado há um setor modernizado, que tem reagido rapidamente aos incentivos tecnológicos, por outro, sabe-se que o crescimento baseia-se em um pacote intensivo de capital e energia, precisamente os fatores que agora se tornam escassos. Culturas como a de cana-de-açúcar apresentam uma grande quantidade de biomassa, sendo

esta de aproximadamente 50% da produtividade agrícola, das quais geralmente são aproveitados apenas o bagaço (em sua maioria como combustível para caldeiras), que representa 25% do rendimento. Os outros 25% são constituídos em material remanescente (ponteiro, palha, folhas verdes e frações de colmos), que, de modo geral, são queimados. A sobra dessa queima fica depositada no solo, apodrecendo e criando certas dificuldades para as operações mecânicas a serem realizadas para

o próximo plantio ou para a rebrota (Sartori & Basta, 1999).

Várias são as implicações existentes no caso do aproveitamento do bagaço de cana para uma utilização mais generalizada como insu- mo energético. Dificuldades para a sua prepa- ração, manutenção, enfardamento e transporte, o baixo desempenho de algumas usinas em poder utilizar com eficácia esta biomassa para fins energéticos e o próprio desinteresse de alguns setores industriais consumidores de energia em adotar fontes alternativas têm sido os principais entraves. Na maioria das usinas e destilarias brasileiras, o bagaço é queimado à saída das moendas, para gerar vapor satu- rado a 18-21 kgf cm<sup>-2</sup>, a uma taxa de aproxi- madamente 2,2 kg de vapor kg<sup>-1</sup> de bagaço.

Estima-se que atualmente as usinas utili- zam na geração de suas próprias necessidades de vapor em torno de 80-85% do bagaço disponível. Todavia, pelo melhoramento do ba- lanço energético no processamento da cana, pode-se chegar a valores percentuais bem maiores, permitindo um excedente de 30-35% do bagaço produzido, que poderia ser co- mercializado. O bagaço é um combustível relativamente interessante do ponto de vista energético, por apresentar um poder calorífico inferior em torno de 1.770 kcal kg<sup>-1</sup> a um teor de umidade de 50% na base seca. Por isto, ele tem potencial para substituir, sem dificul- dades maiores, outras fontes de energia mais onerosas (derivados do petróleo e lenha), razão pela qual o seu uso racional adquire proporções crescentes, facilmente quanti- ficáveis (Ministério da Agricultura, 1984). Vale ressaltar que o bagaço de cana devidamente seco (10% de umidade na base seca) poderá oferecer um PCI da ordem de 3.600 kcal kg<sup>-1</sup> (Gauthier, 1986).

A produção nacional de cana-de-açúcar, em 2002, foi de 364.391.016,00 t (IBGE, 2003), com maiores destaques para as Regiões Nordeste e Sudeste do Brasil. Considerando como sendo de 26% o fator de conversão da

cana-de-açúcar em bagaço com um teor de umidade de 45 a 50% e com um PCI de 1.650 kcal kg<sup>-1</sup> (valor médio adotado pela maiori- a das empresas (Lima, 1979) e um fator de consumo interno das próprias usinas para atender às suas necessidades da ordem de 77% (Ministério da Agricultura, 1984), poderia ser obtida a seguinte equivalência energética para o total da produção de bagaço nacional, a qual está apresentada na Figura 4; neste caso foram considerados os mesmos indicadores do Quadro 5 para a madeira (densidade e produtividade).

Tomando-se os dados apresentados no Quadro 6 e na Figura 2, a equivalência ener- gética em termos de petróleo seria de 7.603 x 10<sup>6</sup> toneladas, comparativa à do bagaço de cana, e de 2.836 x 10<sup>6</sup> toneladas de petróleo, no caso da palha de arroz. Assim, o aproveitamento desses dois resíduos para fins energéticos per- mitiria ao Brasil uma economia de aproxima- damente 10.439x 10<sup>6</sup> toneladas de petróleo por ano ano, ou seja, o equivalente a 1.920 x10<sup>6</sup> barris de petróleo. Neste caso, foram conside- rados para os cálculos a massa específica do petróleo como sendo igual a 864 kg m<sup>-3</sup> e 1 m<sup>3</sup> de petróleo correspondendo a 6,289 barris (Brasil, 1997).

Além de seu aproveitamento para geração de energia, o bagaço de cana tem sido utilizado na produção de ração animal, na indústria de chapas de partículas, como substrato para a compostagem, como complemento orgânico para o solo e na produção de furfural e outros químicos. A utilização dos resíduos em algu- mas das aplicações, quer seja da casca de arroz ou do bagaço de cana, depende de algum inves- timento, e em algumas vezes depende de muito investimento, como é o caso de chapas de partí- culas (bagaço de cana). Uma planta industrial automatizada não custa menos de 300 milhões de dólares. Um investimento dessa ordem só poderá ser realizado com um mercado ga- rantido para os produtos, o que não é o que acontece no Brasil. Mas algumas aplicações requerem muito pouco investimento e poderiam

ser implementadas imediatamente em qualquer parte do País, como é o caso da compostagem (De Souza, 1997). Todavia, dada à grande disponibilidade de resíduos agrícolas, principalmente de casca de arroz e de bagaço de cana, deverão ser canalizados esforços no sentido de que esses resíduos possam ser incorporados definitivamente na matriz energética brasileira, de modo que possa haver uma significativa redução da dependência de fontes de combustíveis de origem fóssil. A cana-de-açúcar, após a implantação do programa governamental do "Pró-Álcool", consolidou-se definitivamente na respectiva matriz energética, ao possibilitar que uma parte significativa da frota nacional possa utilizar combustíveis de origem etílica.

A matriz energética brasileira inclui fontes de energia renováveis e aquela derivada de combustíveis fósseis. Assim, a energia hidráulica representa 41,9%, o petróleo e seus derivados 29,8% e, finalmente, a biomassa constituída pela lenha e pela cana-de-açúcar 19,3%. Essas cifras totalizam 91% do total de energia produzida no País (Brasil, 2002), para uma estrutura de oferta interna de energia apresentada na Figura 5.

Comparativamente ao cenário mundial e da própria Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico – OECD, o Brasil se encontra em uma posição consideravelmente consolidada no que diz respeito a seus investimentos na geração de energia a partir de fontes renováveis de energia (biomassa), conforme se pode constatar na Figura 6.

A Figura 6 mostra que no Brasil, aproximadamente, 41% da OIE provém de fontes alternativas, enquanto a média mundial e nos países da Organização de Cooperação e de Desenvolvimento Econômico - OECD ela é, respectivamente, de 14 e 6%, conforme pode ser constatado na Figura 6. Das fontes alternativas e renováveis de energia, a biomassa florestal responde por aproximadamente 27,2% da oferta interna de energia, conforme pode ser

constatado na Figura 5. Os países com grande geração térmica apresentam perdas de transformação e distribuição entre 25 e 30% da OIE. No Brasil, estas perdas são de apenas 10%, dada à alta participação da geração hidráulica. Esta vantagem, complementada pela grande utilização de biomassa, faz com que o País apresente baixa taxa de emissão de CO<sub>2</sub> (1,7 t de CO<sub>2</sub> por tonelada equivalente de petróleo - tep), pela utilização de combustíveis, quando comparada com a média mundial, que é de 2,36 t CO<sub>2</sub> tep<sup>-1</sup> (Brasil, 2003).

Ainda que o Brasil possa, gradualmente, caminhar na direção do modelo de matriz energética mundial, na qual existe a maior participação de gás natural e a menor participação de energia hidráulica, o País apresenta uma situação privilegiada em termos da possibilidade de utilização de fontes renováveis de energia (MME, 2003). Por causa desta situação, a expectativa é de que a participação dos componentes bióticos deverá aumentar significativamente nas próximas décadas, o que, certamente, se deve à certeza absoluta da exaustão das reservas energéticas de origem fóssil, agravada pelos freqüentes conflitos entre determinados países pela hegemonia do petróleo. Certamente, o Brasil deverá implementar estratégias em relação à intensificação da biomassa lignocelulósica para geração de energia, de forma que não venhamos vivenciar as crises do petróleo dos anos 1970 e 1980.

No que se refere à energia gerada a partir da biomassa, o setor industrial absorve 63,1%, o residencial 18,6% e o setor de transporte 13,3%, que correspondente mais especificamente ao álcool combustível. O alto incremento do uso industrial de biomassa, na primeira metade da década de 1980, se deve ao carvão vegetal, que substituiu o óleo combustível, e, ao bagaço da cana utilizada na produção de álcool (Brasil, 2003).

Em 1980, a produção de madeira para carvão vegetal e lenha e a industrial (polpa celulósica, construção civil, chapas, serraria

etc.) foram da ordem de 250,3 milhões de metros cúbicos, com a participação de 70% das florestas nativas neste contexto. Neste mesmo ano foram geradas 2,7 milhões de toneladas de casca de arroz (poder calorífico inferior – PCI de 3.500 kcal kg<sup>-1</sup>) e 43,1 milhões de toneladas de bagaço de cana (PCI 1.770 kcal kg<sup>-1</sup>), e somente no sul do Brasil foram gerados 2 milhões de toneladas de resíduos (base seca) do setor industrial de processamento mecânico (PCI 3340 kcal kg<sup>-1</sup>) (Ministério da Agricultura, 1984).

#### 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As crises do petróleo vivenciadas, indistintamente, pelos países desenvolvidos e subdesenvolvidos nos anos 1970 e 1980, demonstraram, por um lado, a extrema fragilidade dessas economias em relação aos combustíveis fósseis e, por outro, foram a mola propulsora para a deflagração de esforços no sentido de buscar alternativas na busca de fontes alternativas de energia com o objetivo, se não o da auto-suficiência energética, pelo menos de minimizar o grau de dependência para os combustíveis fósseis nas décadas posteriores.

No Brasil, a estratégia governamental permitiu avanços consideráveis no setor, na medida em que se consolidaram definitivamente projetos energéticos como Itaipu, o Pró-álcool, as florestas e culturas energéticas e, mais recentemente, o advento do biodiesel e as termoeletricas, que buscam todos colaborar para uma maior participação e diversificação da Matriz Energética Nacional.

Na discussão atual sobre a política energética, com o advento da *Eco 92*, do Protocolo de Quioto e outros *Fóruns* equivalentes, praticamente tornou-se impossível dissociar da questão energética o compromisso com a questão ambiental. Desta forma, as energias alternativas devem substituir as formas de energias convencionais como o petróleo, o carvão mineral e o gás natural e, assim, contribuir para minimizar o efeito das emissões

nocivas na atmosfera, que têm como consequência o efeito estufa e as eminentes mudanças climáticas. Aliado ao fato de que no melhor dos cenários as reservas mundiais de combustíveis fósseis terão apenas mais três séculos de existência, a eficiência dos processos físicos, químicos e biológicos de conversão energética da biomassa farão desta, neste milênio, não somente a solução para crises intermitentes de energia, mas o principal caminho para concretizar uma mudança definitiva nos desígnios dos novos conceitos da geração de energia limpa e renovável.

No contexto da disponibilidade nacional de biomassa, ainda que no Brasil não se disponha de estatísticas atualizadas, estima-se como sendo de aproximadamente 260 milhões de toneladas anuais de biomassa, que poderiam ser utilizadas nos diferentes processos de bioconversão energética. Todavia, esses valores poderiam ser significativamente aumentados através de uma política nacional de uso e ocupação da terra, orientados racionalmente para a produção simultânea de alimentos e de energia.

Quanto aos aspectos socioeconômicos e ambientais da produção de energia a partir da biomassa em detrimento dos combustíveis fósseis, um dos fatores decisivos para sua implantação é sua competitividade técnica e econômica em relação aos combustíveis fósseis, além de gerar empregos em escala quatro vezes maior e de o seu valor ambiental ser indiscutivelmente superior ao dos combustíveis tradicionais (petróleo e seus derivados, carvão mineral e gás natural). A propósito, na combustão dos biocombustíveis a quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> equivale à quantidade que foi retirada do ar durante a fase de crescimento da biomassa em anos anteriores. No caso particular da madeira, por exemplo, a produção, a colheita e o transporte da matéria-prima florestal até o consumidor final geram apenas 43 kg de dióxido de carbono por tonelada de matéria-seca; no caso do petróleo este valor seria da ordem de 152 kg de CO<sub>2</sub> e a sua combustão

contribuiria ainda para lançar na atmosfera aproximadamente um adicional de 1.500 kg de CO<sub>2</sub>, além de outros poluentes potenciais como o monóxido de carbono e o dióxido de enxofre.

Finalmente, ainda que alguns dos critérios e ajustes tecnológicos com relação à utilização do potencial da biomassa sejam ainda necessários em determinados casos, o Brasil reúne todas as condições para que possa, ainda nesta década, mudar definitivamente o seu perfil energético através de uma política que venha valorizar ainda mais a contribuição desses recursos e que, na Matriz Energética Nacional, a participação dos elementos bióticos possa ultrapassar logo os atuais 27%.

## 5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SÁBER, A.; J. GOLDEMBERG.; L. RODÉS.; W. ZULAUF. Identificação de áreas para o florestamento no espaço total do Brasil. **Estudos Avançados**, n. 4, v. 9, p. 63-119, 1990.
- BANQUE MONDIALE. Démonstration commerciale de l'énergie dérivée de la biomassa. Disponível em: <[www.worldbank.org/html/pic/gefdoc.htm](http://www.worldbank.org/html/pic/gefdoc.htm)>. Acesso em: 5 mar. 2004.
- BENABDALLHA, B. Structure de la matière ligneuse. In: Manuel de Foresterie. Les Presses de l'Université Laval. Québec. p.1275-1413, 1996.
- BNDES. Disponível em: <[www.herbario.com.br/atual/rbnde/htm](http://www.herbario.com.br/atual/rbnde/htm)>. Acesso em: 7 mar. 2004.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço energético nacional**. Brasília: 1997. 143 p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço energético nacional**. Brasília: 2002. 200 p.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balço energético nacional**. Brasília: 2003. 168 p.
- BRITO, E. O. Estimativa da produção de resíduos na indústria brasileira de serraria e laminação de madeira. **Remade**, n. 26 v. 4, p. 34-39, 1995.
- BRITO, J. O. ; M. T. FILHO.; A. L. B. SALGADO. Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu. **IPEF**, v. 36, p.13-17, 1987.
- CEFETPE. Energia, espaço geográfico e desenvolvimento. Disponível em: <<http://www.guilhermehahia.hpg.ig.com.br/fontee.htm>>. Acesso em: 13 mar. 2004.
- CENTRO de COMUNICAÇÃO SOCIAL - CCS. Piracicaba poderá implantar projeto piloto de transferência de Biocombustível. Disponível em: <<http://piracicaba2.imagenet.com.br/ccs/ccs.exec/texto?codigo=1354>>. Acesso em: 13 mar. 2004.
- CORTEZ, L. A. B.; BAJAY, S. W.; BRAUNBECK, O. Uso de resíduos agrícolas para fins energéticos: o caso da palha de cana-de-açúcar. São Paulo: CENBIO, s.d., 15 p. (Artigos Técnicos).
- COSTA NETO, P. R. et al. Produção de biocombustível alternativo ao óleo diesel através da transesterificação de óleo de soja usado em fritura. **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 531-537, 2000.
- D'ALMEIDA, M. L. O. Caracterização química e físico-química dos materiais lignocelulósicos. In: **Celulose e papel**. Tecnologia de fabricação da pasta celulósica. v.1. 2.ed. São Paulo: 1988. p. 107-127
- DANON, G. et al. Production domestique de briquettes de chauffage de déchets des forests. Résumés des Memoires Volontaires. In: CONGRES FORESTIER MONDIAL, 11., 1997, Turquie. **Proceedings...** Turquie: 1997. p. 13-22.
- De SOUZA, M. R. Tecnologias para usos alternativos de resíduos florestais: experiência do Laboratório de Produtos Florestais – IBAMA na área de utilização de resíduos florestais e agrícolas. In: **Workshop Sul-Americano sobre usos alternativos de resíduos de origem florestal e urbana**. Curitiba: 1997. p. 49-70.
- ENERGIA, ESPAÇO GEOGRÁFICO E DESENVOLVIMENTO. Disponível em: <<http://www.guilhermehahia.hpg.ig.com.br/fontee.htm>>. Acesso em: 13 mar. 2004.
- ENERGIAS ALTERNATIVA. Mimeografado, s/d, 9 p.
- ZINI, C. A. ; ESCOBAR, R.; De ALENCASTRO, G. Gerenciamento dos resíduos sólidos florestais na Riocel. In: **Workshop Sul-Americano sobre usos alternativos de resíduos de origem florestal e urbana**. Curitiba: 1997. p. 11-27.

- FOELKEL, C. E. B. et al. **Casca desmedulada de eucalipto**: uma nova opção como fonte de fibras para a indústria de celulose kraft. São Paulo: Instituto Roberto Simonsen, 1978. 55 p.
- GAUTHIER, T. G. **Revista O Papel**, n. 9, p. 62-64, 1986 p.
- INFANTE, F. S.; VEIRAS, G. P. Aprovechamiento de la Biomassa Forestal producida por la Cadena Monte-Industria. Parte I: Situación actual y evaluación de sistemas de tratamiento. **Revista CIS-Madera**, n. 10, p. 6-25, 2003.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2003.
- LIMA, R. L. A mandioca como alternativa de geração de energia carburante. In: **Simpósio Nacional sobre fontes convencionais e de energia**. Brasília: Câmara dos Deputados, 1979. p. 173-184.
- LIMA, C. R. Viabilidade Econômica da produção de briquetes a partir da serragem de *Pinus* sp. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 3., 1998, São Paulo. **Anais...** São Paulo: CBPE, 1998.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Proposta de utilização energética de florestas e resíduos agrícolas**. Brasília: 1984. 164 p.
- MORRIS, G. The value of the benefits of U.S. biomass power. National Renewable Energy Laboratory. NREL/Sr-570-27541. Colorado. 1999. 24 p.
- PARLAMENTO EUROPEU. La forêt en tant que ressource renouvelable pour la production d'énergie. Disponível em: <[www.europarl.eu.int/workingpapers/agri/ch5-17\\_fr.htm](http://www.europarl.eu.int/workingpapers/agri/ch5-17_fr.htm)> Acesso em: 21 fev. 2004.
- PNUD. Programme des Nations Unies pour le développement. Production d'électricité à partir de biomasse: bagasse et déchets de canne à sucre. Disponível em: <[www.unpd.org/gef](http://www.unpd.org/gef)>. Acesso em: 05 mar. 2004.
- QUIRINO, W. F. O Caminho sustentável para a Produção do ferro gusa. Palestra apresentada no Congresso Brasileiro de Desenvolvimento Sustentável para a Indústria de Base Florestal, de Geração de energia e de Mineração – Madeira. Araxá, 2003.
- QUIRINO, W. F.; BRITO, J. O. **Características e índice de combustão de briquetes de carvão vegetal**. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA – Laboratório de Produtos Florestais – LPF. 1991. 16 p.
- REMADE – Revista da Madeira. Uso energético requer planejamento racional. **Remade**, n. 72, v. 13, 2003.
- SARTORI, M. M.; BASTA, C. Métodos Matemáticos para o cálculo energético da produção de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.). **Energia na Agricultura**, v. 14, n. 1, p. 52-68, 1999.
- SERVICE CANADIEN DES FORÊTS. Comptabilisation du carbone forestier. Définitions. Disponível em: <[http://carbon.cf.s.nrcan.gc.ca/definitions\\_f.html](http://carbon.cf.s.nrcan.gc.ca/definitions_f.html)>. Acesso em: 15 fev. 2004.
- STAISS, C.; PEREIRA, H. Biomassa: energia renovável na agricultura e no setor florestal. Instituto Superior de Agronomia. Centro de Estudos Florestais. **AGROS**, n. 1, p. 1-10, 2001.
- THIBEAU, C. E. **Produção sustentada em florestas: conceitos e tecnologias, biomassa energética, pesquisas e constatações**. Belo Horizonte: 2000. 512 p.
- VARGAS I. J. Biomassa. In: **Simpósio Nacional sobre fontes convencionais e de energia**. Brasília: Câmara dos Deputados, 1979. p. 626-640.
- WATZLAWICK, L. F. **Estimativa de biomassa e carbono em floresta ombrófila mista e plantações florestais a partir de dados de imagens do satélite Ikonos II**. 2003. 120 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.