

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO
BIOMASSA

ELIO VEIT PRETO
GLADSON LIMA MORTOZA

ORIENTADOR: MAURO MOURA SEVERINO

TRABALHO FINAL DE GRADUAÇÃO NO CURSO DE
ENGENHARIA ELÉTRICA

BRASÍLIA/DF: AGOSTO - 2010

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, pela oportunidade de viver e aproveitar as felicidades da vida.

Aos meus pais e irmão, pela força e apoio em todos os momentos de minha vida e em especial à minha mãe por sempre estar de braços abertos em momentos de dificuldades.

A minha futura esposa Ana Carolina, por ser minha constante fonte de inspiração.

Aos amigos e familiares, que mesmo sentindo a minha ausência sempre me incentivaram.

Ao meu colega de trabalho Elio Veit, pelo apoio e contribuição para finalização deste trabalho.

Ao professor Mauro Severino pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Gladson Lima Mortoza

AGRADECIMENTOS

A Deus, por presentear-me com a vida e por proporcionar felicidade em minha caminhada.

Aos meus amados pais, pelo apoio incondicional nos momentos difíceis e por apoiarem minhas decisões.

À minha namorada, pela compreensão e apoio, mesmo em momentos de ausência.

Ao meu amigo Gladson Mortoza, pelo apoio e oportunidade de participação neste trabalho.

Ao professor Mauro Moura Severino, pelas maravilhosas aulas e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

Elio Veit Preto

RESUMO

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO BIOMASSA

Atualmente, a humanidade enfrenta o desafio de suprir suas necessidades energéticas de forma eficiente e sustentável. Esforços em diversas esferas da sociedade são desempenhados na busca por alternativas ao atual modelo de geração e consumo de energia. Nesse contexto, a biomassa é apresentada como uma fonte energética alternativa em relação às fontes energéticas tradicionais usadas em larga escala em todo o mundo. Dessa forma, motivado por esse desafio, este trabalho apresenta uma visão sobre a utilização da biomassa para a geração de energia elétrica.

Com a intenção de propiciar uma compreensão do tema, o trabalho apresenta um estudo do estado-da-arte em geração de energia a partir da biomassa, partindo da conceituação da biomassa como fonte energética e seguindo para uma exposição do panorama do uso da biomassa na geração de eletricidade no Brasil. São apresentadas as principais fontes de biomassa com atrativo potencial de exploração, com enfoque em suas capacidades energéticas e oferta disponível para o aproveitamento. Por fim, é apresentada uma exposição relativa ao estado-da-arte das principais rotas tecnológica para o aproveitamento da biomassa na geração de energia elétrica.

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1	Variação do PIB e variação do consumo de energia no Brasil (1998-2007).....	12
Gráfico 2.2	Participação das diversas fontes de energia no consumo dos países da OCDE (1973 e 2006).....	12
Gráfico 2.3	Geração de energia elétrica no mundo por tipo de fonte energética (1973 e 2006).....	13
Gráfico 2.4	Consumo de energia elétrica por setor, no Brasil, em 2007.....	16
Gráfico 2.5	Custos de produção de energia elétrica no Brasil.....	17
Gráfico 2.6	Matriz de oferta de energia elétrica no Brasil em 2007.....	18
Gráfico 3.1	Florestas plantadas em 2007.....	22
Gráfico 3.2	Capacidade de produção sustentável das florestas brasileiras.....	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Consumo de energia elétrica por região em 2007.....	15
Figura 4.1	Rotas de conversão energética da biomassa.....	58
Figura 4.2	Tecnologias de produção de eletricidade a partir da biomassa.....	59
Figura 4.3	Rotas de gaseificação baseada no tipo de agente gaseificante.....	61
Figura 4.4	Processo simplificado de produção do biodiesel.....	63
Figura 4.5	Ciclo tradicional de co-geração topping a vapor em contrapressão.....	67
Figura 4.6	Ciclo a vapor de condensação e extração em co-geração topping.....	68
Figura 4.7	Ciclo BIG-CC em co-geração topping.....	69
Figura 4.8	Representação esquemática de uma célula combustível.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Produtores de bioenergia em 2005.....	18
Tabela 3.1	Densidades e poderes caloríficos inferiores.....	27
Tabela 3.2	Produção de lenha, carvão vegetal, licor negro, resíduos de madeira em 2008 e seus poderes caloríficos.....	28
Tabela 3.3	Poderes caloríficos inferiores de alguns resíduos agrícolas.....	40
Tabela 3.4	Produção de palha e bagaço de cana de açúcar, casca e palha de arroz, capim elefante, palhada do milho e palha da soja em 2008 e seus poderes caloríficos.....	44
Tabela 3.5	Composição média do biogás.....	48
Tabela 3.6	Equivalência entre o biogás e outros combustíveis.....	49
Tabela 3.7	Produção diária de resíduos líquidos e sólidos de alguns animais.....	51
Tabela 3.8	Quantidade de rejeitos necessários para a produção de 1m ³ de biogás.....	51
Tabela 3.9	Produção de rejeitos sólidos urbanos por habitante e suas características.....	52
Tabela 3.10	Produção de rejeitos urbanos sólidos e líquidos, industriais (exemplo de criadouro), potencial de geração de biogás, poderes caloríficos e equivalentes energéticos.....	54
Tabela 4.1	Tecnologias da pirólise.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

BBER – Brasil Biomassa e Energia Renovável

BEN – Balanço Energético Nacional

BP – BP Global

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel

CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas

FAO – *Food and Agriculture Organization*

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IEA – *International Energy Agency*

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

MAPA – Ministério da Agricultura e Pecuária

MME – Ministério de Minas e Energia

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

PCH – Pequena Central Hidrelétrica

PIB – Produto Interno Bruto

R\$ – Real

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SIN – Sistema Interligado Nacional

UnB – Universidade de Brasília

UNICA – União da Indústria de Cana de Açúcar

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

US\$ – Dólar Americano

WEA – *World Energy Assessment*

WWI – *Worldwatch Institute*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	MOTIVAÇÃO DO TRABALHO.....	1
1.2	OBJETIVO DO TRABALHO.....	3
1.3	ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO.....	3
2	ESTADO-DA-ARTE EM GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA.....	5
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	5
2.2	BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA.....	6
2.3	BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	11
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	19
3	FONTES DE BIOMASSA NO BRASIL.....	21
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	21
3.2	BIOMASSA ENERGÉTICA FLORESTAL.....	21
3.2.1	Lenha e carvão vegetal.....	22
3.2.2	Resíduos de madeira e licor negro.....	24
3.2.3	Análise energética.....	26
3.3	BIOMASSA ENERGÉTICA AGRÍCOLA.....	29
3.3.1	Cana-de-açúcar.....	31
3.3.2	Arroz.....	33
3.3.3	Capim elefante.....	34
3.3.4	Milho.....	36
3.3.5	Soja.....	38
3.3.6	Análise energética.....	39
3.4	BIOMASSA ENERGÉTICA DERIVADA DE REJEITOS URBANOS E INDUSTRIAIS.....	45
3.4.1	Rejeitos urbanos sólidos e líquidos.....	47
3.4.2	Rejeitos industriais sólidos e líquidos.....	50
3.4.3	Análise energética.....	52
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	55
4	ROTAS TECNOLÓGICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA.....	58
4.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	58
4.2	PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA.....	59

4.2.1	Conversão termoquímica.....	60
4.2.2	Conversão físico-química.....	62
4.2.3	Conversão bioquímica.....	63
4.3	TECNOLOGIAS APLICADAS À BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	65
4.3.1	Sistemas de geração de energia baseados em ciclos a vapor.....	65
4.3.2	Sistemas baseados em processos de gaseificação da biomassa e uso de turbinas a gás.....	68
4.3.3	Outras rotas tecnológicas para aproveitamento da biomassa na geração de energia elétrica.....	70
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	72
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	73
5.1	ASPECTOS GERAIS.....	73
5.2	CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES.....	74
5.3	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....	76
REFERÊNCIAS		77

1 INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO DO TRABALHO

No desenrolar do século XX, combustíveis fósseis como o petróleo e o carvão mineral proporcionaram um aumento contínuo na oferta de energia no mundo. A disponibilidade cada vez maior de energia permitiu um enorme crescimento nas economias dos países, influenciando em transformações nunca antes vistas em períodos de tempo tão curtos. Para que um país inicie e mantenha um ciclo de crescimento econômico, é fundamental que a oferta de energia, em todas as suas formas, seja compatível com o acentuado aumento do consumo. Essa energia será responsável por movimentar máquinas, veículos, indústrias, produzir calor, luz e também servirá de combustível para gerar energia elétrica. Durante o século XX, os combustíveis fósseis foram foco de exploração e utilização por vários motivos, como a descoberta de reservas em muitos locais no mundo, desenvolvimento de tecnologia para extração e refino do petróleo, alta produção e preços acessíveis, entre outros. Estas características tornaram os combustíveis fósseis a base da exploração primária de energia no mundo. Entretanto, ao mesmo tempo em que houve um aumento no consumo, houve também um aumento nos índices de poluição, decorrente do fato de os combustíveis fósseis emitirem um alto volume de gases, particularmente o dióxido de carbono (CO_2), liberado em larga escala nos processos de combustão para produção de calor, vapor ou energia elétrica.

Apesar de os combustíveis fósseis ainda serem base do consumo mundial de energia (ANEEL, 2009), as mudanças climáticas observadas nos últimos 50 anos estão colocando a humanidade em alerta devido à alta emissão de gases poluentes, entre eles o CO_2 , grande responsável pelo efeito do aquecimento da terra (efeito estufa). Somado a isso, estudos mostram a possibilidade de esgotamento, no médio prazo, das reservas e recursos naturais mais utilizados, o que provocou nos últimos anos uma alta volatilidade e tendência de alta nas cotações (que superaram US\$ 100 por barril em 1980 e, mais recentemente, em 2008), o que se revelou como um forte estímulo para as iniciativas de substituição por outras fontes. A substituição destes energéticos poluentes por outros de menor impacto ambiental, aderindo a práticas mais eficientes, está forçando a humanidade a mudar para uma nova realidade: a busca pelo desenvolvimento sustentável.

Outro tipo de energia que recebeu estímulos no século passado e atualmente é cada vez mais utilizada é a energia elétrica. A pesquisa e o desenvolvimento de novas tecnologias de geração, transmissão e distribuição, possibilitaram o aumento progressivo na oferta, assim como a diminuição nas perdas pelo transporte e o acesso massivo da população a este tipo de energia.

Cada país do mundo, com suas peculiaridades, desenvolveu tecnologias de geração que utilizassem os recursos naturais próprios, permitindo a exploração de variadas fontes. No Brasil, a água é a fonte de geração elétrica mais utilizada, principalmente devido à riqueza hídrica do país. O sucessivo aumento da exploração desta fonte natural proporcionou ao Brasil o oferecimento da energia elétrica necessária para o crescimento e desenvolvimento do país. A oferta de energia elétrica esteve fortemente ligada à capacidade de crescimento do Brasil e, em alguns períodos de crise ocorridas no país, observou-se a diminuição de investimentos na expansão do parque de geração elétrica. A mais recente crise do setor, ocorrida em 2001, afetou o fornecimento de energia elétrica no Brasil, forçando cortes no fornecimento e implicando severas perdas na economia do país. Desde então, os governos permitiram uma mudança no modelo do setor elétrico brasileiro para garantir a segurança no suprimento de energia, a modicidade tarifária, busca pela inserção social, entre outras, marcando a retomada da responsabilidade do planejamento do setor de energia elétrica pelo Estado.

O acompanhamento do crescimento econômico do país pelo parque de geração elétrico é, sem dúvidas, um desafio contínuo para o Estado brasileiro, pois implica pesquisa, desenvolvimento e investimento em novas tecnologias, em novos combustíveis e sistemas de transmissão. A atual situação de expansão econômica na qual o Brasil se encontra, crescendo de 2,5% a 5%, conforme divulgado pelos atuais presidente e ministro da Fazenda, obriga o país a também proporcionar um crescente aumento na oferta de energia elétrica. Entretanto, a expansão do parque hidrelétrico, além de requerer um tempo considerável para o projeto e construção das hidrelétricas, é altamente dependente da disponibilidade hídrica e, em alguns casos, dos índices pluviométricos. Esses fatores estão estimulando a busca pela diversificação da matriz energética brasileira, procurando soluções de aumento de eficiência e oferta de outras fontes de geração elétrica, entre elas a biomassa, a qual é tema de estudo no presente trabalho. Muito ainda precisa ser feito para estimar, contabilizar e analisar o potencial brasileiro para exploração da biomassa na geração de energia elétrica. Entretanto, iniciativas de aproveitamento desta fonte já existem e demonstram a viabilidade econômica da exploração de várias fontes de biomassa na geração de eletricidade. No ano de 2007, a biomassa assumiu o segundo lugar nas fontes de geração de energia elétrica no Brasil, respondendo por 3,7% do total de energia gerada, ficando atrás somente da geração hidrelétrica (ANEEL, 2009).

Em face de todos os desafios apresentados na busca constante por desenvolvimento, a humanidade tem desempenhado esforços significativos no desenvolvimento de tecnologias que possibilitem o uso de novas fontes energéticas, mais eficientes e sustentáveis. Além de busca por novas alternativas, há também esforços voltados ao aprimoramento do uso das fontes vigentes. Assim, é dentro deste contexto que a biomassa tem ganhado evidência como uma

alternativa energética com aplicações de curto, médio e longo prazo. No curto prazo, ela pode substituir, ou complementar, o uso de combustíveis fósseis em certas aplicações, com o mínimo de modificação tecnológica e com perdas aceitáveis de rendimento. Esse é o caso do uso da biomassa no segmento automotivo e no segmento da geração termelétrica tradicional. No médio e longo prazos, o uso da biomassa torna-se mais interessante, considerando que sejam tomadas as devidas ações: institucionais, de investimentos em pesquisa e de investimentos em tecnologias experimentais.

O uso da biomassa na geração de eletricidade possui diversas rotas tecnológicas. Todas envolvendo a transformação da biomassa, por intermédio de processos termoquímicos, bioquímicos e físico-químicos em um produto intermediário, que, por fim, é utilizado para geração de energia elétrica. Algumas dessas vias de tecnologia apresentam melhores quesitos de viabilidade técnica e econômica, tanto no momento presente, quanto em um momento futuro.

1.2 OBJETIVO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo apresentar as fontes de biomassa disponíveis no Brasil, dando destaque àquelas que oferecem significativos volumes de produção, o que justificaria estudos de investimento em infraestrutura para o seu aproveitamento na geração de energia elétrica. Foi feito um levantamento ilustrativo dos potenciais de produção, geração de resíduos, tipos de resíduos, potenciais energéticos e potencial de geração termelétrica utilizando estas fontes de biomassa, com o intuito de fomentar estudos e investimentos na sua utilização.

1.3 ESTRUTURAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho de conclusão de curso foi organizado em cinco capítulos, que buscam apresentar de uma forma geral o uso da biomassa como fonte energética para geração de eletricidade. Este primeiro capítulo faz a introdução ao trabalho, evidenciando fatos que motivaram a realização do mesmo e mostrando de forma geral como ele foi organizado na tentativa de se alcançar seu objetivo.

O capítulo 2 apresenta uma breve discussão do estado-da-arte em geração de energia elétrica utilizando biomassa e discursa brevemente acerca do uso da biomassa como fonte de energia no

mundo e no Brasil, descrevendo os tipos, os potenciais, as formas de utilização e demonstrando a importância desta fonte como combustível na geração de energia elétrica.

O capítulo 3 exemplifica os tipos de biomassa mais atraentes para a geração de eletricidade no Brasil, traz um demonstrativo do que já é utilizado na matriz de energia elétrica nacional e analisa o potencial de outras fontes economicamente viáveis.

O capítulo 4 traz uma visão do estado-da-arte para as rotas tecnológicas de geração de eletricidade por intermédio do uso da biomassa. Neste capítulo, tem-se o foco em rotas que possuem melhores perspectivas de aproveitamento na atualidade e futuramente bem como nos fatores de maturidade tecnológica e viabilidade econômica que foram considerados para a seleção das vias tecnológicas apresentadas.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões finais do trabalho e sugestões para o desenvolvimento de futuros trabalhos.

2 ESTADO-DA-ARTE EM GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Historicamente o processo de obtenção de energia pelo homem tem sido baseado em atividades puramente extrativistas. Desde o início da civilização humana, o homem tem buscado na natureza suas fontes de energia e, até muito recentemente, essa busca era desprovida de qualquer preocupação. A ausência de preocupação se justificava devido a consideração de que as fontes utilizadas eram abundantes, sendo assim, o consumo foi indiscriminado por muitos anos.

Esse modelo de consumo foi vigente até muito recentemente, sendo que, na segunda metade do século XX, a comunidade mundial voltou-se para questões relativas ao impacto do consumo irrefreado das fontes energéticas. Adicionalmente descobriu-se que a grande maioria dos insumos energéticos utilizados em ampla escala possuía reservas limitadas. Fontes energéticas como o petróleo e carvão mineral teriam uma margem de utilização de mais algumas décadas e por fim estariam esgotadas. Considerando o crescente consumo de energia primária, o qual no ano de 2008 esteve na faixa de 1,4% e foi o menor dos últimos 7 anos (BP, 2009), alavancado por economias em desenvolvimento como, por exemplo, os países formadores do grupo chamado BRIC¹, têm-se um horizonte de duração para as fontes energéticas predominantes atualmente cada vez menor.

Ainda somado ao fato da limitação de uso das fontes atuais, no final do século XX foi conferida a devida importância às questões ambientais relativas ao consumo de energia pelo homem. Assuntos como o aquecimento global, emissões de carbono na atmosfera, desmatamento florestal, entre outros, passaram a ser debatidos em larga escala e entraram na pauta de discussão de autoridades científicas, políticas, econômicas e culturais.

Por fim, nesse contexto mundial, foi dado início ao processo de busca por novas fontes energéticas, com quesitos de sustentabilidade, renovabilidade, eficiência e disponibilidade de longa duração. Diversas fontes foram apontadas como soluções definitivas para essa questão energética, entre as quais se podem citar a energia solar, a energia atômica, a energia eólica e a aquela que é foco deste trabalho, a biomassa. Todas as novas tecnologias propostas possuem vantagens e desvantagens em maior ou menor proporção, algumas dessas fontes necessitam de

¹ Grupo formado por Brasil, Rússia, Índia e China.

grandes investimentos financeiros para suas viabilizações, outras apresentam dificuldades tecnológicas para o seu aproveitamento. E todas elas atualmente são foco de diversos trabalhos e estudos, que buscam aprimorar as tecnologias e prover condições para o uso e aproveitamento eficiente de cada fonte.

Este capítulo tem o propósito de apresentar uma introdução do conceito de biomassa e uma visão geral das condições de sua utilização como fonte energética.

2.2 BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA

A biomassa, que pode ser caracterizada como qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia térmica, mecânica ou elétrica (ANEEL, 2009) é utilizada como fonte de energia desde os primórdios da civilização humana. Em sua forma mais simples e abundantemente encontrada na natureza, a madeira, a biomassa permitiu ao homem primitivo uma drástica evolução nos hábitos de vida. A descoberta do fogo possibilitou ao ser humano produzir luz e calor, o que permitia a transformação de materiais e, dentro desse contexto, a madeira (utilizada na forma de lenha) foi, durante milhares de anos, a fonte de energia que possibilitou ao homem evoluir as suas tecnologias. A descoberta dos metais e o desenvolvimento de técnicas de combustão da lenha permitiram a fabricação e a modelagem de armas e ferramentas que facilitaram diversos trabalhos.

A Revolução Industrial, iniciada na Inglaterra em meados do século XVIII e difundida no restante do mundo a partir do século XIX, permitiu um conjunto de mudanças tecnológicas com profundo impacto na maneira de produzir e processar materiais. Isso somente foi possível graças à capacidade de se obter grande quantidade de energia a partir de algumas substâncias. Uma dessas substâncias foi o carvão vegetal, que é obtido a partir da madeira no processo chamado pirólise ou carbonização, o mais antigo e simples dos processos de conversão de um material energético sólido (lenha) em outro de maior conteúdo energético (carvão). O processo de carbonização consiste em aquecer o material energético original até aproximadamente 500 °C na ausência total ou parcial de ar. O produto final é o carvão vegetal, cuja densidade energética é duas vezes superior ao material original utilizado no processo. A utilização do carvão vegetal possibilitou a obtenção de grande quantidade de energia que seria utilizada para aquecer a água, transformando-a em vapor e este sendo utilizado nas máquinas e motores a vapor que foram desenvolvidos durante o século XVIII.

Com o aprimoramento da máquina a vapor e a descoberta do motor de combustão interna, os rendimentos nas produções e nos processos aumentaram significativamente. Isso estimulou o homem a buscar cada vez mais substâncias e produtos energéticos que pudessem ser utilizados como fonte de energia para movimentar suas máquinas. No início do século XIX, foram descobertas técnicas de refinamento do petróleo que impulsionaram a procura por este energético. Logo, o petróleo passaria a ser a principal fonte individual de energia utilizada no mundo e os seus vários derivados serviriam como combustível para máquinas e matéria-prima para a produção de vários materiais, entre outras aplicações.

Apesar de sua expressão tão significativa como fonte energética, o petróleo possui reservas naturais com um horizonte de uso de somente mais algumas décadas e diversas questões ambientais relacionadas ao seu uso. Estes fatos têm levado a comunidade internacional a repensar o uso das fontes energéticas atuais e impulsionado a busca por outras fontes mais sustentáveis e eficientes. Assim, a diversificação das substâncias energéticas passou a ser fundamental para o desenvolvimento dos países, e os investimentos em tecnologia para obtenção de energia cresceram rapidamente. Muito recentemente, um acidente ocorrido em uma plataforma de petróleo da empresa multinacional Beyond Petroleum, que operava no Golfo do México, evidenciou as implicações ambientais do uso do petróleo como fonte energética. Estimativas feitas apontam que diariamente 25 a 40 mil barris de petróleo eram lançados ao mar, e este evento é considerado pelo governo dos Estados Unidos da América como o maior desastre ecológico da história daquele país.

É nesse contexto que a produção de energia utilizando a biomassa como energético tem ganhado significativo incentivo e tem recebido a adesão de diversos países e organizações privadas. A biomassa historicamente sempre esteve presente como energético, sendo na forma de lenha ou de carvão, porém outras formas de utilização da biomassa para gerar energia ganharam ênfase na segunda metade do século XX. O interesse por novas fontes de biomassa ganhou espaço devido a esta fonte energética ser considerada *limpa* e renovável. A energia disponível na biomassa tem sua origem na energia solar, tanto que os vegetais, por intermédio da fotossíntese, absorvem energia da radiação solar. O uso da biomassa como fonte energética oferece vantagens ambientais e econômicas, pois, além de ser renovável, a energia gerada advém de um insumo produzido pela natureza ou decorrente de processos que utilizam recursos naturais.

Nos últimos anos, a biomassa passou a ser considerada uma alternativa para a diversificação da matriz energética mundial e consequente redução da dependência de combustíveis fósseis. Mesmo ainda sendo pouco expressiva nesta matriz, com apenas 13% do consumo mundial de

energia primária² (IEA, 2007), a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Ainda hoje, muitas regiões do mundo³ utilizam a biomassa como fonte de grande parte da energia térmica e elétrica, utilizando principalmente a madeira (lenha e carvão) e resíduos agrícolas. A China é um exemplo deste tipo de consumo, no país cerca de 30 milhões de habitantes vivem sem acesso a energia elétrica e utilizam biomassa tradicional como lenha, resíduos agrícolas (286 milhões de toneladas por ano, em sua maioria queimados em fogões de baixa eficiência – 10% a 20%), e resíduos de animais (850 milhões de toneladas por ano) para cocção e aquecimento e velas e querosene para iluminação. (GUARDABASSI, 2006).

Além da biomassa de madeira, existem diversos outros tipos que podem ser usados como fonte energética para gerar energia mecânica, térmica e elétrica. Como recurso energético, a biomassa é classificada nas seguintes categorias: biomassa energética florestal, com seus produtos e subprodutos ou resíduos; biomassa energética agrícola, englobando as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e rejeitos urbanos (MME:EPE, 2007). Cada um desses grupos de origem pode fornecer vários energéticos que dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo) quanto da tecnologia de processamento utilizada para obtê-los.

Um grupo com uma vasta quantidade de produtos e subprodutos gerados pelo processamento da matéria-prima original é o de produtos e rejeitos agrícolas. Aqui, tem-se a cana-de-açúcar, que é uma fonte com enorme potencial de geração de energia no Brasil e no mundo. Da cana-de-açúcar é obtido, entre outros subprodutos, o etanol, a palha e o bagaço de cana. O etanol é um biocombustível que tem se tornado cada vez mais uma alternativa para complementar ou substituir a utilização de alguns combustíveis fósseis e vem sendo largamente utilizado em motores de combustão interna. O bagaço e a palha, que são rejeitos da produção de etanol, são utilizados como combustível em fornos e caldeiras, gerando energia térmica utilizada em processos internos das usinas e também utilizada para aquecer a água gerando vapor. O vapor pode ser utilizado diretamente ou então ser manipulado para movimentar turbinas que, acopladas a geradores elétricos, irão produzir energia elétrica (usina termelétrica).

Outro produto agrícola que tem despertado interesse nos últimos anos é o milho, principalmente nos Estados Unidos, que é o maior produtor mundial desse cereal. Do milho também se pode obter o biocombustível etanol (álcool etílico), produzido a partir da fermentação e destilação de

² Produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta, como petróleo, gás natural, carvão mineral, resíduos vegetais e animais, energia solar, eólica.

³ Regiões em sua maioria com baixo índice de desenvolvimento econômico.

açúcares. A vantagem da cana é o rendimento por área, pois em um hectare é possível produzir cerca de 90 toneladas de cana-de-açúcar, de onde é possível extrair em torno de 7 mil litros de etanol, enquanto em um hectare de milho se produz algo próximo de 20 toneladas de milho, que podem produzir cerca de 3.500 litros de etanol (UNICA, 2010) . Além do biocombustível o milho fornece rejeitos agrícolas como sabugo, colmo (caule), folha e palha. Esses rejeitos são utilizados para gerar energia térmica (calor), utilizado de diversas formas, entre elas fazendo uso de processos de combustão do material orgânico gerando calor que pode ser utilizado diretamente ou manipulado para gerar energia elétrica (usinas termelétricas).

Além do milho, os Estados Unidos produzem etanol a partir do trigo, do *Switchgrass* e do *Miscanthus*. O *Switchgrass* é uma espécie de planta nativa das pradarias⁴. Além de necessitar de pouco fertilizante para crescer, ela produz mais biomassa por área que a maioria das outras plantas. Recentemente está sendo estudada como uma fonte paralela ao milho na produção de bioetanol. Além dela, pesquisadores americanos descobriram uma outra fonte de biomassa capaz de produzir cerca de duas vezes e meia a quantidade de etanol que se pode produzir na mesma área com milho (ECODEBATE, 2008). O *Miscanthus* é uma gramínea perene de clima temperado, com rápido crescimento e alto potencial para produzir sacarose, em moldes muito similares aos da cana. Na União Européia a produção do etanol é baseada principalmente na beterraba (MME, 2009).

Utilizando biomassa, é possível produzir outro tipo de biocombustível com intenção comercial, o biodiesel. Vários produtos agrícolas servem como fonte de biomassa para gerar este tipo de combustível. Esses produtos possuem uma característica em comum que é a existência de substâncias oleosas em suas sementes, folhas e caule. As sementes, folhas e caule passam por um processo mecânico de pressão, onde são quebrados e esmagados. Depois, passam por um processo químico (transesterificação) utilizando algum tipo de álcool e solventes para que seja possível extrair o óleo. Os derivados obtidos são a glicerina e o biodiesel. Após o processo de extração, o óleo é refinado, desodorizado e classificado. Os resíduos do processo de extração do biodiesel também são usados como combustível, normalmente em fornos e caldeiras. Uma boa parte dessa biomassa é utilizada em usinas termelétricas para gerar energia elétrica. No mundo, a Alemanha é o país que mais produz e consome biodiesel. Lá, este é produzido quase totalmente a partir do óleo extraído da canola. Os rejeitos da canola são utilizados como ração animal. No Brasil, várias fontes de biomassa podem produzir o biodiesel, sendo as variedades de biomassa mais utilizadas para fins comerciais a palma e o babaçu (região Norte), a soja, o

⁴ Planície vasta e aberta normalmente sem árvores e arbustos, comumente encontrada na América do Norte. É similar ao pampa gaúcho brasileiro.

girassol e o amendoim (regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste) e a mamona (semi-árido Nordeste com possibilidade de ser utilizada em outras regiões do país) (BIODIESELBR, 2008).

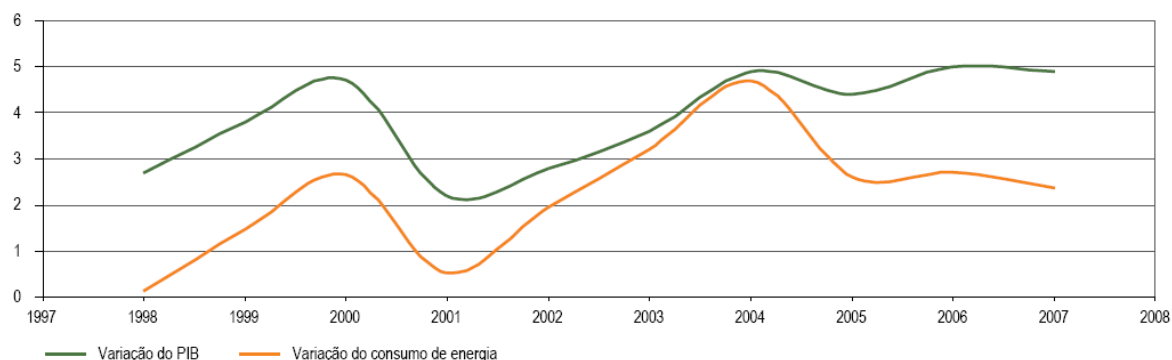
Um grupo que vem recebendo estímulos nos últimos anos é a biomassa proveniente de rejeitos urbanos e industriais, sólidos ou líquidos. Destilarias, abatedouros, fábrica de laticínios, esgotos domésticos (lodo), estações de tratamento de lixo urbano, entre outros vários tipos de atividades geram um grande volume de resíduos que, na maioria dos casos, são descartados ou são levemente manipulados para então serem jogados fora. A carga poluente assim produzida é muito elevada e impõe a necessidade de criação de soluções que permitam diminuir os danos provocados por essa poluição. Uma solução que vem se mostrando economicamente viável e atrativa é a utilização dessa biomassa para a geração de energia térmica, usada de várias formas, entre elas, para geração de energia elétrica. Essa biomassa pode ser aproveitada de duas formas, ou por meio da conversão termoquímica ou através da conversão biológica. Na conversão termoquímica, chamada de gaseificação, esses resíduos sólidos e líquidos são transformados em combustível no estado gasoso (composto por dióxido de carbono, hidrogênio, metano, nitrogênio e monóxido de carbono), utilizando vapor d'água e oxigênio. Este gás pode ser utilizado em motores de combustão interna acoplados a geradores elétricos ou como combustível para gerar vapor e movimentar turbinas para geração de energia elétrica. Além disso, é possível remover os componentes químicos que prejudicam o meio ambiente e a saúde humana, o que torna a gaseificação um processo limpo. Na conversão biológica, essa biomassa é transformada por intermédio da fermentação (biodigestão) anaeróbica, na qual os resíduos são decompostos na presença de bactérias que não necessitam de oxigênio (anaeróbicas). O produto dessa fermentação é o biogás, composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2). O biogás pode ser utilizado de diversas maneiras como, por exemplo, para alimentar fogões a gás, para aquecer água e em motores térmicos. Caso exista uma grande quantidade de rejeitos concentrada em um lugar (lixões ou locais de despejo), poderá ser instalada uma usina termoeletrica que produzirá o biogás a partir desses resíduos e o utilizará para aquecer água, gerar vapor e movimentar turbinas que irão gerar energia elétrica. Os subprodutos obtidos do processo de biodigestão anaeróbica (hidrogênio, nitrogênio, ácido sulfídrico, fósforo e potássio) podem ser processados e utilizados como fertilizantes, o que torna a conversão biológica um processo ambientalmente sustentável.

A biomassa de origem animal, que é obtida de excrementos e resíduos vindos diretamente de animais, não tem recebido o mesmo interesse comparativamente às várias fontes de origem vegetal. Isso acontece pela dificuldade no armazenamento desses componentes, pela dificuldade na obtenção de uma quantidade considerável de biomassa para que o investimento necessário na infra-estrutura de geração de energia se torne viável economicamente, entre outras. Porém, essa

fonte de biomassa tem demonstrado utilidade em empreendimentos rurais de pequeno e médio porte, pois possibilita a implantação de sistemas isolados de obtenção de energia que utilizam como combustível um produto que antes era descartado ou aproveitado de outras formas, como por exemplo, a distribuição dos excrementos na lavoura. Os dejetos bovinos (esterco), os dejetos suínos e os dejetos provenientes de criações de frango podem ser utilizados para se obter o biogás por meio da implantação de estruturas que realizem a biodigestão anaeróbica. Estas estruturas de pequeno e médio porte não necessitam de um investimento muito alto, ou seja, podem ser uma opção viável economicamente no longo prazo. Além da energia obtida (térmica ou elétrica) os resíduos do processo de biodigestão ainda podem ser utilizados como fertilizantes. As poucas usinas de geração de energia térmica e elétrica que geram em quantidade considerável estão localizadas próximo a regiões que concentram grandes criações de aves e suínos. Estas usinas utilizam os resíduos e dejetos produzidos pelas granjas de frango e criadouros de suínos como combustíveis, queimando-os diretamente em caldeiras, ou então os utilizando para obter o biogás pela biodigestão anaeróbica da biomassa.

2.3 BIOMASSA PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

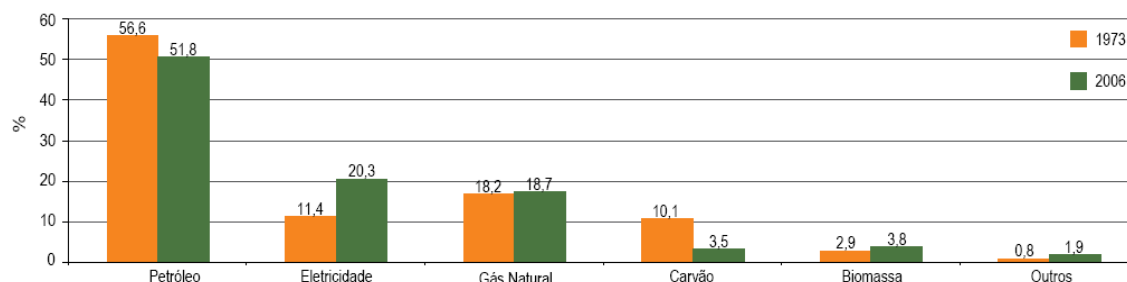
O consumo de energia é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. Ele se reflete tanto no ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto na capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados. Essa relação foi o principal motivo do acentuado crescimento do consumo mundial de energia nos últimos anos. O Gráfico 2.1 mostra a variação no Brasil do PIB em comparação à variação do consumo de energia, nos anos de 1998 a 2007. Entre 2003 e 2007, a economia mundial viveu um ciclo de vigorosa expansão, refletida pela variação crescente do PIB: 3,6% em 2003; 4,9% em 2004; 4,4% em 2005; 5% em 2006 e 4,9% em 2007 (IPEA, 2008). Nesse mesmo período, a variação acumulada do consumo de energia foi de 13%, passando de 9.828 milhões de tep em 2003, para 11.099 milhões de tep em 2007 (BP, 2008). Comparando os anos de 1973 a 2006, o aumento do consumo mundial de energia foi de 73%, passando de 4.672 milhões de tep para 8.084 milhões de tep (IEA, 2008).



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2009.

Gráfico 2.1 *Variação do PIB e variação do consumo de energia (1998-2007).*

Como mostra o Gráfico 2.2, entre 1973 e 2006, a participação do carvão nos países da OCDE⁵ recuou de 10,1% para 3,5% do total de energia consumida. No petróleo, a queda foi de 56,6% para 51,8%. Ao mesmo tempo, o consumo de energia elétrica quase dobrou (11,4% para 20,3%), com um total de 18.930 TWh, enquanto a posição das fontes renováveis e do grupo “Outras Fontes” (eólica e solar, entre outras) também apresentou um salto significativo, embora sua posição no *ranking* total continuasse pouco expressiva. As fontes renováveis (lideradas pela biomassa) apresentaram variação de 2,9% para 3,8% no período e o grupo “Outras Fontes”, de 0,8% para 1,9%.



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2009.

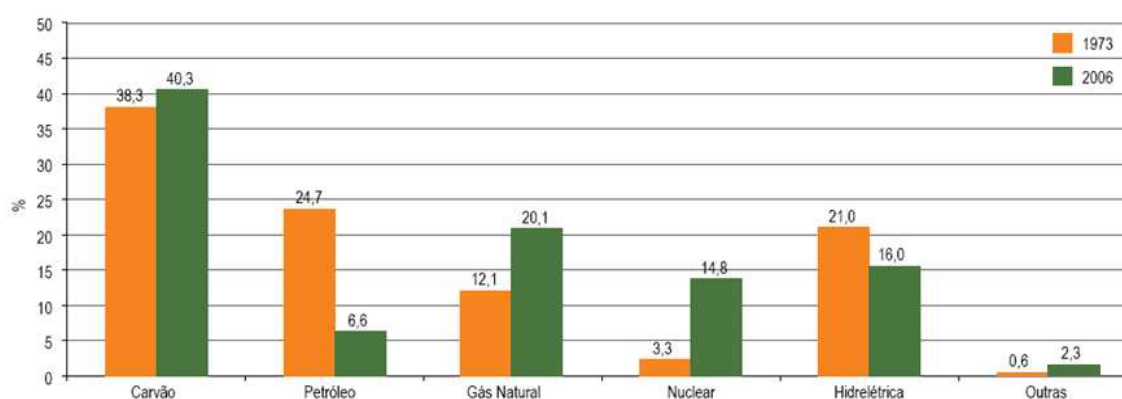
Gráfico 2.2 *Participação das diversas fontes de energia no consumo dos países da OCDE (1973 e 2006).*

O contínuo aumento do consumo de energia elétrica, que em 1973 era de 11,4% do total de energia consumida nos países da OCDE e que, em 2006, saltou para 20,3% do total, forçou os

⁵ Os países da OCDE relacionados pela IEA são: Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, República Tcheca, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Itália, Japão, Coreia, Luxemburgo, México, Países Baixos, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, República Eslovaca, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos.

países a procurar e aperfeiçoar técnicas de geração desse tipo de energia. A energia produzida a partir de fonte hidrelétrica e termonuclear ganhou estímulo, pois frente às usinas termelétricas (que utilizam carvão, gás natural e derivados de petróleo) elas se mostraram uma forma *limpa* de gerar energia elétrica. Porém, poucos países no mundo detinham recursos naturais que viabilizassem a implantação de um grande campo hidrelétrico e somente alguns detinham tecnologia e insumos para gerar energia elétrica a partir de usinas termonucleares. Com isso, a pesquisa por novas tecnologias e combustíveis para gerar energia elétrica voltou a ser foco em vários países.

O aumento no consumo de energia elétrica demonstra o desenvolvimento dos países e a facilidade ao acesso a rede de energia elétrica. Porém, a geração de energia elétrica depende do tipo de combustível utilizado e cada país do mundo possui características particulares que os fazem utilizar um ou outro tipo de combustível. O gráfico 2.3 mostra a geração de energia elétrica no mundo por tipo de combustível nos anos de 1973 e 2006.



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2009.

Gráfico 2.3 *Geração de energia elétrica no mundo por tipo de fonte energética (1973 e 2006).*

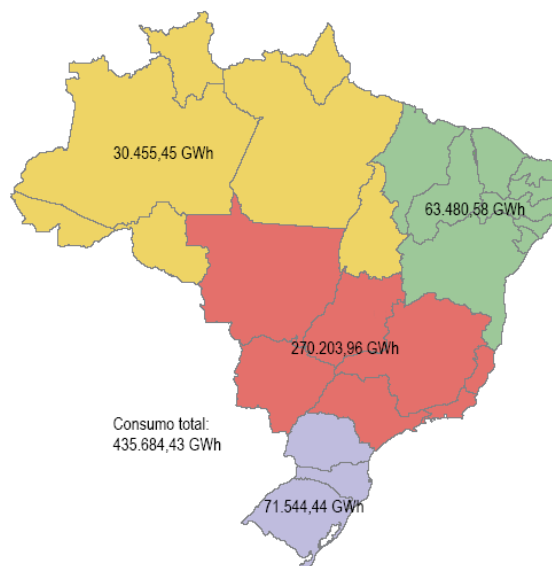
O carvão mineral se manteve como o principal combustível na geração de energia elétrica respondendo por 40,3% do total em 2006 (7.761,3 TWh). Isso ocorreu devido à facilidade de obtenção desse combustível em várias regiões do mundo e devido à relação custo do combustível *versus* energia elétrica gerada, o que fornece um baixo preço por MWh em relação à maioria dos outros combustíveis. O petróleo teve uma forte queda nesses 33 anos, de 24,7% para apenas 6,6% (1.097,94 TWh). Isso é consequência da oscilação do preço dos seus derivados, que após duas grandes crises seguem em tendência de alta com diminuição das reservas internacionais. O gás natural e a energia termonuclear tiveram acentuado aumento nesse período. O gás natural saltou de 12,1% para 20,1% (3.804,93 TWh). Esse crescimento

ocorreu principalmente pelos investimentos em tecnologia que aumentaram o rendimento de energia elétrica obtida a partir desse combustível. A geração de energia elétrica por fonte nuclear saltou de 3,3% para incríveis 14,8% (2.801,64 TWh). Isso é resultado da descoberta de abundantes reservas de urânio no planeta, o que garante o suprimento desse minério no médio prazo. Além disso, a energia nuclear é considerada uma energia limpa, com baixa emissão de gás carbônico, principal responsável pelo aquecimento global. Já a energia hidrelétrica sofreu queda no mesmo período, recuando de 21% para 16% (3.028,8 TWh). Isso é decorrência da exploração quase total do potencial hidráulico de muitos países do mundo, principalmente dos desenvolvidos. Duas exceções são Ásia (China) e América Latina (Brasil) que apresentam crescimento na geração hidrelétrica devido ao potencial ainda não explorado. O grupo “outras” corresponde às energias: eólica, solar, biomassa, entre outras. Essas fontes “alternativas” de energia tiveram um crescimento de quase quatro vezes, saindo de 0,6% para 2,3% (435,39 TWh). Isso ocorreu principalmente pela descoberta de tecnologias que aumentaram o rendimento na produção de energia elétrica e pelo estímulo dos governos para o aumento da geração de energia elétrica utilizando fontes limpas, o que conseqüentemente diversifica a matriz energética. O total de energia elétrica gerada no mundo em 2006, somando todas as fontes, foi de 18.930 TWh (IEA, 2008).

O Brasil é um país com dimensão territorial comparável a alguns continentes do mundo. Isso torna um desafio quando se pretende levar energia elétrica a mais de 61 milhões de unidades consumidoras, espalhadas nos vários cantos do território. No ano de 2007, o Brasil superou a marca de 100 mil megawatts (MW) em potência instalada, sendo 75% de fonte hídrica e 25% de fonte térmica. Se for levado em consideração que o país explorou somente 30% do seu potencial hidroelétrico, o Brasil pode ser considerado um dos países do mundo com maior potencial hidrelétrico a ser aproveitado para gerar energia elétrica. No ano de 2008 realizou-se o primeiro leilão de energia elétrica produzida a partir da biomassa (bagaço de cana-de-açúcar), o que mostra o interesse do país em diversificar sua matriz energética incluindo fontes limpas de geração. Mesmo em uma escala ainda reduzida, o Brasil tem criado incentivos à produção de energia pela queima do lixo urbano e pelo biogás. Isso aponta no caminho da correta sustentabilidade ambiental, ao unir geração de energia elétrica com maneiras limpas de gerá-la.

A energia elétrica foi a modalidade mais consumida no país em 2007, considerando que os derivados de petróleo, em vez de somados, são desmembrados em óleo diesel, gasolina e GLP (MME:EPE, 2009). O volume absorvido, 35,44 milhões de tep, correspondeu a uma participação de 17,6% no volume total de energia consumida e a um aumento de 5,7% sobre o ano anterior. Com este desempenho, a tendência à expansão contínua e acentuada do consumo de energia elétrica, iniciada em 2003, manteve-se inalterada. Segundo o Operador Nacional do

Sistema Elétrico (ONS, 2008), no ano de 2007 o Brasil consumiu um total de 435.684,43 GWh, sendo que 270.203,96 GWh foi consumido na região Centro-Oeste e Sudeste, conforme Figura 2.1. A região Sul foi a segunda a consumir mais energia elétrica no país.

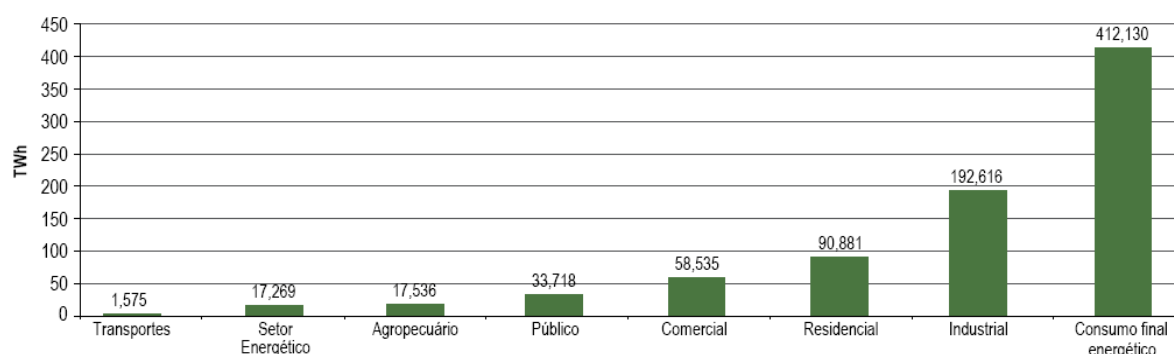


Fonte: ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3 ed. Brasília: ANEEL, 2009.

Figura 2.1 *Consumo de energia elétrica por região em 2007.*

Por setores, dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2008) indicam que o industrial, como ocorre tradicionalmente, continuou a liderar o *ranking* dos maiores consumidores de energia elétrica, com o consumo de 192.616 GWh em 2007. Este setor se caracteriza também por ser o maior responsável por uma tendência que tem evoluído nos últimos anos: a autoprodução de energia, ou seja, investimentos realizados por consumidores de grande porte em usinas geradoras de energia elétrica para suprimento próprio e venda do excedente em mercado. Conforme estudos realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2009), em 1992 essa atividade foi responsável pela produção e consumo de 13.020 GWh. Em 2007, por consideráveis 47.138 GWh. Em 15 anos, a variação acumulada foi, portanto, de 262%. Esse aumento significativo reflete, além do desenvolvimento econômico das grandes empresas, a preocupação em suprir o próprio consumo de energia elétrica com segurança e sem interrupções. A isso pode ser somada a diminuição do custo da energia elétrica para a empresa e a possibilidade de implantação de um campo gerador que utilize como combustível subprodutos gerados pela própria empresa.

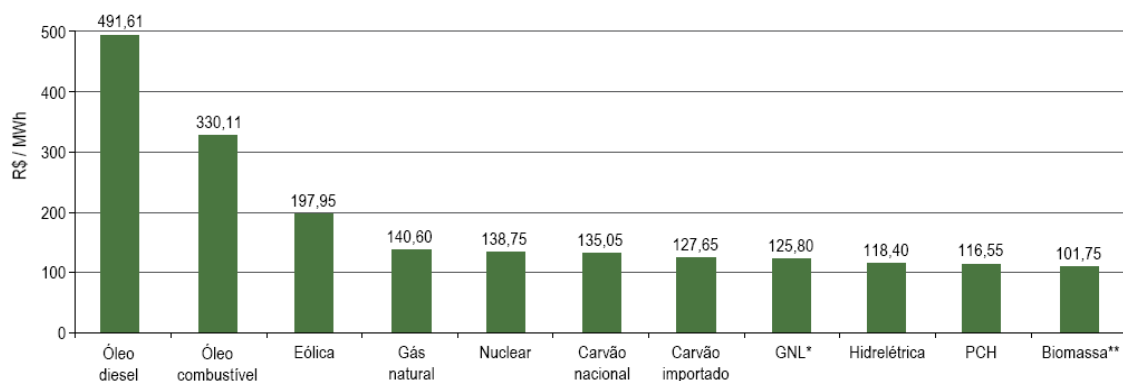
Outro setor que se destaca pelo volume absorvido e pelo acentuado crescimento é o residencial. Em 2007 ele absorveu 90.881 GWh, quantidade muito inferior à registrada pela indústria, mas, ainda assim, o segundo maior do país. No setor comercial o consumo foi de 58.535 GWh, no público, de 33.718 GWh, agropecuário, 17.536 GWh, e transportes, 1.575 GWh, como mostra o Gráfico 2.4.



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2009.

Gráfico 2.4 *Consumo de energia elétrica por setor, no Brasil, em 2007.*

O Gráfico 2.5 mostra os custos de produção de energia elétrica utilizando vários tipos de combustível. É interessante notar que a biomassa (bagaço de cana-de-açúcar) possui o custo mais baixo por MWh. Seguida por PCH e usinas hidrelétricas, que representam mais de 70% da energia elétrica gerada no país, a biomassa representa uma fonte de geração de energia elétrica barata quando comparada aos outros combustíveis, mesmo sendo aplicada em escala menor. Isso é uma grande vantagem, pois além do baixo preço essa energia emite baixos volumes de gás carbônico (CO₂) no meio ambiente. O óleo diesel e o óleo combustível possuem o maior custo por MWh. Esses combustíveis abastecem usinas termelétricas que, de uma maneira geral, são acionadas para dar reforço em momentos de pico de demanda (momentos em que o consumo sobre abruptamente) ou em períodos que seja necessário preservar o nível de água dos reservatórios (estocar energia).



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2009.

Gráfico 2.5 Custos de produção de energia elétrica no Brasil.

(*) Gás Natural Liquefeito

(**) Bagaço de cana

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no Brasil quanto no restante do mundo, ela é considerada uma das principais alternativas para diversificação da matriz energética e a conseqüente redução da dependência dos combustíveis fósseis. A quantidade estimada de biomassa existente na Terra é da ordem de 1,8 trilhão de toneladas (ANEEL, 2009). Considerando este volume e o grau de eficiência das usinas em operação no mundo, a capacidade de geração de energia elétrica é de aproximadamente 11 mil TWh por ano no longo prazo, ou seja, mais da metade da energia elétrica produzida em 2007, que foi de 19,89 mil TWh (BP, 2009). Devido à necessidade de produção de biomassa em grande escala para produção de biocombustíveis e energia elétrica, os maiores fornecedores potenciais de matéria-prima são os países com agroindústria forte e grandes dimensões de terras cultiváveis. Portanto, países com solo e condições climáticas adequadas para o cultivo de produtos agrícolas levam grande vantagem na utilização da biomassa como fonte de energia em relação aos países que possuem pouca extensão de terras, ou que possuem regiões desérticas, com clima desfavorável, entre outras.

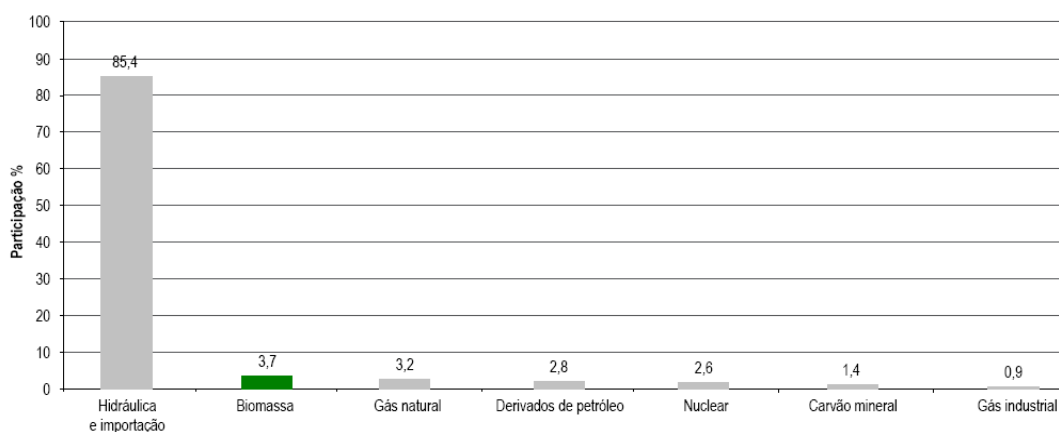
Ao contrário do que ocorre com outras fontes, não existe um *ranking* mundial dos maiores produtores de biomassa, apenas estatísticas sobre os principais derivados. Em 2007, os Estados Unidos eram os principais produtores de energia elétrica utilizando como fonte a biomassa (ANEEL, 2009), seguidos por Alemanha e Brasil (Tabela 2.1)

Tabela 2.1 *Produtores de Bioenergia em 2005.*

País	TWh	%
Estados Unidos	56,3	30,7
Alemanha	13,4	7,3
Brasil	13,4	7,3
Japão	9,4	5,1
Finlândia	8,9	4,9
Reino Unido	8,5	4,7
Canadá	8,5	4,6
Espanha	7,8	4,3
Outros países	57,1	31,1
Total	183,3	100,0

Fonte: ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3 ed. Brasília: ANEEL, 2009.

No Brasil, a utilização da biomassa como fonte de energia elétrica vem crescendo nos últimos anos, principalmente em sistemas de co-geração⁶ de energia. Em 2007, a biomassa foi responsável pela geração de 18 TWh, volume 21% superior ao de 2006. Isso correspondeu a 3,7% do total de energia elétrica ofertada no país, quantidade que a colocou em segunda posição na matriz da eletricidade nacional (MME:EPE, 2009). A terceira posição é ocupada pelo gás natural que, mesmo próximo à biomassa (3,2% do total de eletricidade ofertada), ficou atrás desta, apesar de ser uma fonte de energia conhecida há muitos anos e utilizada largamente na geração de energia elétrica no restante mundo. A fonte hidráulica ocupou a primeira posição, respondendo por 85,4% da energia elétrica gerada no país (Gráfico 2.6).



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2009.

Gráfico 2.6 *Matriz de oferta de energia elétrica no Brasil em 2007.*

⁶ Processo operado numa instalação específica para fins do aproveitamento combinado das utilidades calor e energia mecânica, esta geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária.

Atualmente existem em operação 378 usinas termelétricas movidas a biomassa no Brasil, totalizando 7.425 MW de potência instalada, respondendo por 6,26% do total de energia elétrica gerada no país (ANEEL, 2010). Do total de usinas que despacham essa potência, 14 são abastecidas por licor negro (lixívia), com 1.240 MW de potência total; 38 são abastecidas por madeira (lenha ou carvão), com 327,7 MW de potência instalada; 9 utilizam o biogás (48,5 MW); 7 usam casca de arroz (31,4 MW) e 308 usinas são abastecidas por bagaço de cana, com potência total de aproximadamente 5.623 MW. Uma vantagem dessas usinas é o pequeno porte que, com potências instaladas de até 60 MW, favorece a instalação nas proximidades dos centros de consumo e das regiões onde existe capacidade de fornecimento destes combustíveis.

Em maio de 2010, existiam 56 empreendimentos termelétricos em construção (ANEEL, 2010). Desses, 37 são movidos a biomassa, sendo 1 a biogás, 1 por casca de arroz, 5 por resíduos de madeira e 30 por bagaço de cana-de-açúcar. Além disso, existiam 163 unidades já outorgadas, com construção ainda não iniciada, sendo que 45 serão movidas a biomassa, e, destas, a maioria abastecida por bagaço de cana-de-açúcar. Segundo estimativas da União das Indústrias de cana-de-açúcar de São Paulo (UNICA, 2008), em 2020 a eletricidade produzida pelo setor poderá representar 15% da matriz brasileira, com a produção média de 14,4 mil MW. A UNICA também prevê que, até 2012, 86 unidades sejam construídas, com investimentos da ordem de US\$ 17 bilhões. Uma grande vantagem da utilização da palha e do bagaço de cana é que a safra coincide com o período de estiagem na região Sudeste/Centro-Oeste, onde está concentrada a maior potência instalada em hidrelétricas do país. Portanto, a eletricidade fornecida por esse tipo de usina geradora auxilia a preservação dos níveis dos reservatórios das UHEs.

Essas atitudes mostram a preocupação do governo e das agências competentes com o contínuo aumento no consumo de energia elétrica, que acompanha o desenvolvimento e crescimento do país. As evoluções da regulamentação, da legislação e dos programas oficiais também estimulam os empreendimentos e melhoram as condições de acesso ao Sistema Interligado Nacional (SIN), o que abre espaço para a conexão principalmente das termelétricas localizadas em usinas de açúcar e álcool mais distantes dos centros de consumo. Além disso, demonstra o interesse na diversificação da matriz de eletricidade nacional, estimulando investimentos em sistemas de geração que utilizem como combustíveis fontes *limpas*.

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente projeto final de graduação tem a proposta de avaliar de forma qualitativa e quantitativa a iniciativa de geração de energia elétrica por intermédio do uso da biomassa. Este

capítulo apresentou uma perspectiva histórica do uso da biomassa pelo homem, mostrando resumidamente a evolução das fontes energética ao longo da história recente do homem. Explicitou os indicadores do potencial energético e do consumo desta fonte em escala global e em nível de Brasil. Por final, foi dado foco no uso desta fonte para geração de eletricidade, apresentando uma visão geral da geração de energia elétrica no Brasil e de forma breve os indicadores de consumo e potencial de geração de energia elétrica advinda da biomassa.

Portanto, pode-se inferir que o processo atual de obtenção de energia por intermédio da biomassa não se trata da inserção no cenário mundial de uma nova fonte de energia. Trata-se, sim, de uma adaptação do uso de uma fonte de energia há muito tempo em uso e consolidada pelo homem. O que é novo neste processo são os métodos e os parâmetros, toda a tecnologia atual para o uso da biomassa como fonte energética é margeada pela sustentabilidade, busca pelo máximo de eficiência e respeito aos procedimentos considerados ecologicamente corretos. E considerando todas as fontes energéticas suficientemente maduras para serem empregadas comercialmente, somente a biomassa possui a flexibilidade de suprir energéticos tanto para a produção de energia elétrica quanto para mover o setor de transportes (CORTEZ et al., 2008). Por isso a importância do estudo e aprimoramento no uso desta estratégica fonte de energia.

3 FONTES DE BIOMASSA NO BRASIL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No Brasil a biomassa vem ganhando espaço entre as várias fontes de produção de energia elétrica. Além de ser fundamental para a diversificação da matriz energética, ela é uma fonte renovável e é considerada uma forma *limpa* de geração. A produção de energia elétrica a partir da biomassa, atualmente, é muito defendida como uma alternativa importante para países em desenvolvimento e também para outros países. Programas nacionais começaram a ser desenvolvidos visando o incremento da eficiência de sistemas para a combustão, gaseificação e pirólise da biomassa.

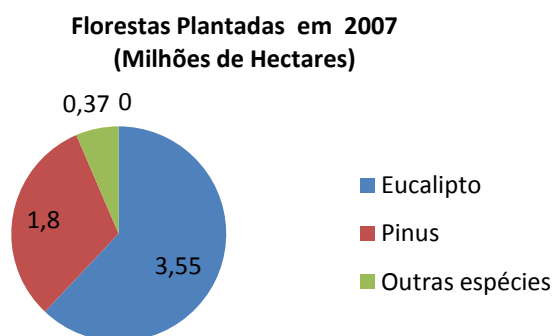
Dentre os vários tipos de biomassa utilizáveis para geração de energia elétrica, somente alguns são economicamente viáveis atualmente e podem ser produzidos em escala comercial. São justamente esses que estão sendo explorados e estão recebendo cada vez mais investimentos no desenvolvimento de tecnologias para sua utilização. Dos vários tipos existentes os mais utilizados no Brasil para geração de energia elétrica são: a lenha, carvão vegetal, resíduos de madeira e lixo negro (biomassa de origem florestal - madeira); Palha e bagaço de cana-de-açúcar, palha e casca de arroz, capim-elefante, palhada do milho, palha da soja etc (biomassa derivada de culturas agrícolas); lixo sólido e líquido (rejeitos urbanos e industriais). Essas são as fontes de biomassa que já são utilizadas em várias usinas termelétricas no Brasil e que serão utilizadas também em novas plantas que já estão em construção e em processo de outorga. Portanto, no presente trabalho serão detalhados potenciais de geração e aproveitamento dos resíduos e rejeitos gerados por estas fontes.

3.2 BIOMASSA ENERGÉTICA FLORESTAL

As florestas existentes no mundo somam cerca de 4 bilhões de hectares, cobrindo aproximadamente 30% da superfície terrestre (FAO, 2006). Cinco países concentram mais da metade da área florestal total: Rússia, Brasil, Canadá, Estados Unidos e China.

A biomassa florestal (madeira e seus derivados) é uma fonte promissora no Brasil, pois além de ser uma fonte alternativa de combustível para geração de energia elétrica, é renovável e pode ser disponibilizada localmente em vários municípios do país, podendo reduzir gastos com linhas de transmissão do local de geração até os consumidores finais. A utilização dessa fonte de energia na geração e co-geração de energia (elétrica e térmica) é conveniente e necessária para o segmento das serrarias e para a sociedade como um todo, pois contribui para a diminuição da

concentração de CO₂ na atmosfera, se baseada em um sistema de produção florestal sustentada. Além disso, utilizando seus resíduos é possível reduzir a emissão de gás metano, pois o consumo dos resíduos de madeira evita a deposição em pilhas, que proporciona a digestão anaeróbica e conseqüente emissão de metano. No Brasil, cuja área territorial é de 851,5 milhões de hectares, há 477,7 milhões de cobertura florestal, e aproximadamente 0,67% (5,74 milhões de há) do total é ocupado por plantações florestais. Do total de plantações florestais, 3,55 milhões de hectares são de eucalipto, 1,82 milhões de ha são de pinus e 370,5 mil ha são de outras espécies como Acácia negra, Seringueira, Araucária etc (BBER, 2007). Minas Gerais e São Paulo são os estados com maior área de florestas plantadas, com 1,23 milhões ha e 963,3 mil ha respectivamente. O setor de base florestal brasileiro tem participação significativa no PIB, respondendo por 3,5% do total, ou seja, US\$ 37,3 bilhões.



Fonte: Brasil Biomassa e Energia Renovável, BBER S.A, 2007.

Gráfico 3.1 *Florestas Plantadas em 2007.*

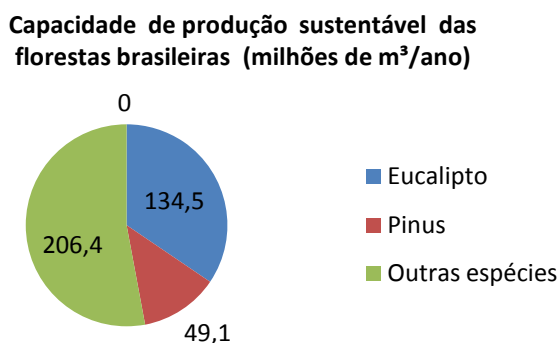
3.2.1 Lenha e carvão vegetal

Segundo a empresa Brasil Biomassa e Energia Renovável S.A. (BBER, 2007), a produção de madeira em tora de florestas plantadas para uso industrial cresceu cerca de 13,8% ao ano entre 1980 e 2008 . Estima-se que em 2007 a produção de madeira em toras foi da ordem de 156,2 milhões de m³, sendo que 103,3 milhões de m³ foram de eucalipto e 52,9 milhões de m³ de pinus. A produção de lenha no Brasil alcançou 91,9 milhões de toneladas, significando um crescimento de 31,5% nos últimos dez anos. A totalidade dessa produção é consumida internamente, principalmente para a produção do carvão vegetal e no uso direto para cocção de alimento nas residências e geração de calor nas indústrias. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME:EPE, 2008), 42% do total de lenha produzido (florestas plantadas e nativas) foram utilizados em carvoarias, 29% em uso residencial, 20% nas indústrias, 8% na agropecuária e 1% em outras aplicações. Além disso, em 2006, a produção nacional de carvão

vegetal foi de aproximadamente 35,1 milhões de mdc⁷, sendo 17,9 milhões originados de florestas plantadas e 17,2 milhões de florestas nativas.

Segundo a Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente (ABIMCI, 2007), em 2006, a produção de madeira serrada atingiu 23,8 milhões m³, predominando a madeira tropical⁸ com 14,7 milhões m³, seguida pela madeira de pinus (9,1 milhões m³). No mesmo ano, o consumo totalizou 21 milhões m³ (88,4% da produção nacional) e as exportações brasileiras totalizaram cerca de 2,9 milhões m³. Em média, 70% da madeira maciça utilizada pela indústria moveleira é proveniente de plantios florestais.

De acordo com a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas (ABRAF, 2008) a capacidade de produção sustentável das florestas brasileiras é estimada em cerca de 390 milhões de m³/ano, dos quais aproximadamente 134,5 milhões m³ (34,4%) são de florestas plantadas com pinus e 49,1 milhões de m³ (12,58%) são com eucalipto. A produção de madeira de pinus em toras concentra-se nas regiões Sul e Sudeste do país, as quais correspondem por mais de 90% da produção sustentável nacional. Já a produção de madeira de eucalipto, também em toras, concentra-se nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil, e representam mais de 70 % da produção sustentável nacional de eucalipto. O principal segmento consumidor de madeira em tora de floresta plantada é a indústria de papel e celulose, seguida pela siderurgia e pela indústria de madeira serrada.



Fonte: Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Brasília: ABRAF, 2008.

Gráfico 3.2 Capacidade de produção sustentável das florestas brasileiras.

⁷ Unidade de medida para o carvão vegetal que equivale à quantidade de carvão que cabe em um metro cúbico.

⁸ Madeira não-conífera, latifólia e dura oriunda de países tropicais (FAO).

3.2.2 Resíduos de madeira e licor negro

Um fator muito importante que torna o Brasil um país de destaque na utilização da madeira para geração de energia elétrica é o fato do alto potencial florestal, com grandes extensões de terra que possibilitam um alto volume de produção de madeira. Essa madeira é utilizada de várias formas, entre elas, a construção civil, a indústria de papel e celulose e a indústria moveleira representam uma grande parte do total consumido. A cadeia produtiva da madeira gera uma alta quantidade de resíduos se considerarmos os processos de transformação primário, secundário e terciário, que acabam se tornando um problema ambiental a ser adequadamente solucionado. Esses resíduos são constituídos pelo material florestal orgânico que sobra na floresta após sua colheita, sobras de madeira, com ou sem casca, galhos grossos, galhos finos, fuste, casca, copa, touça e raízes.

O processamento primário é composto pela extração da madeira da floresta (nativa ou reflorestamento) transformando-a em “toras” e representa uma perda considerável de madeira na forma de resíduos. Em plantios de Pinus, cerca de 28% do peso total da árvore fica na floresta na forma de resíduos. Em plantios de Eucalipto, 22% se tornam resíduos. O setor de base florestal (processamento secundário) se baseia na transformação das “toras” de madeira em placas, barras, laminados, painéis, compensados etc. Aqui é gerada a maior quantidade dos resíduos, pois para cada 1 tonelada de madeira bruta beneficiada, é gerado algo entorno de 35% a 50% de resíduos. Finalmente essa madeira processada é utilizada na montagem de móveis, construção civil, entre outras, o que também gera perdas nas operações de corte e acabamento (BBER, 2007).

Um exemplo disso é a indústria de móveis, que pode ser segmentada em função da matéria-prima utilizada ou do uso final dos móveis que produz. Como existem diferentes tipos de matéria-prima à base de madeira utilizada na fabricação de diferentes tipos de móveis, as empresas moveleiras apresentam diferentes características e produzem diferentes resíduos de madeira e de seus derivados. Em geral esses resíduos se apresentam na forma de serragem, retalhos, cavacos, costaneiras, refilos, maravalha etc. Segundo a *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2006), para a fabricação de 1 m³ de lâminas é necessário 1,9 m³ de toras de madeira, resultando em um aproveitamento de 52,6%. Para cada 1 m³ de compensado, necessita-se de 2,3 m³ de toras de madeira, o que representa um aproveitamento de 43,5%. Esses rendimentos são obtidos considerando toda a cadeia produtiva, desde a extração da madeira da floresta até a conclusão do produto final, nestes casos as lâminas e o compensado. O volume de geração de resíduos pelas indústrias está relacionado ao processo produtivo como um todo, às características dos equipamentos utilizados, e à qualidade da mão de obra. A utilização desses

resíduos de madeira além de evitar o descarte inadequado, apresenta uma série de vantagens: Baixo custo de aquisição; Não emite dióxido de enxofre; As cinzas são menos agressivas ao meio ambiente que as provenientes de combustíveis fósseis; Menor risco ambiental; É um Recurso renovável; Emissões não contribuem para o efeito estufa.

Outro derivado da madeira que é bastante utilizado como combustível para geração de energia elétrica é o licor negro (lixívia negra). A indústria de papel e celulose utiliza a polpa da madeira, principalmente de árvores da espécie pinus (pelo preço e resistência devido ao maior comprimento da fibra) e eucalipto (pelo seu rápido crescimento, para extrair a celulose utilizada na fabricação do papel) para transformar a madeira bruta em polpa, que é a matéria prima da produção do papel, e é necessário separar a lignina, a celulose e a hemicelulose (componentes da madeira) através de processos mecânicos e químicos. Os processos mecânicos basicamente trituram a madeira, separando apenas a hemicelulose, uma polpa de menor qualidade, de fibras curtas e com uma cor amarelada. O processo químico para produção de celulose mais difundido no Brasil é o processo *Kraft*, que emprega uma solução de hidróxido de sódio/sulfito de sódio, o licor branco, para separar a celulose da matéria prima lenhosa, na etapa denominada digestão. Nesta operação mais da metade da madeira se solubiliza, saindo junto com os produtos químicos na forma de uma lixívia escura, o licor negro. Este efluente, após ser concentrado até um teor de sólidos de aproximadamente 60% é queimado em uma caldeira de recuperação química, liberando calor e produzindo um fundido de sais inorgânicos, que misturado em água fornece o licor verde, que posteriormente é caustificado para transformar-se no licor branco novamente, fechando o ciclo (FAO, 2006).

As indústrias de celulose e as integradas (papel e celulose) utilizam como combustível nas caldeiras, para a geração de vapor, lenha e óleo combustível, além dos subprodutos do processo (lixívia e resíduos de madeira). Este vapor, além de ser necessário ao processo de fabricação de papel e celulose, é também utilizado para produção de energia elétrica, por meio da co-geração. Com a utilização mais eficiente da biomassa e da lixívia, surge uma possibilidade interessante para o segmento, em vista das vantagens econômicas e ambientais, e havendo excedente de eletricidade gerado, este pode ser vendido às concessionárias ou a terceiros. Além disso, estudos apontam a possibilidade de utilizar o licor negro como componente para correção de acidez do solo.

Mesmo reconhecendo que existem variações entre as várias plantas de fabricação de celulose, observa-se aqui maior homogeneidade, comparativamente ao setor sucro-alcooleiro. De acordo com as características da matéria prima e as particularidades do processo, são produzidas de 1,0 a 1,4 kg de licor concentrado por kg de celulose fabricada (FAO, 2006), com um poder

calorífico da ordem de 2860 kcal/kg de licor (MME:EPE, 2009). A energia disponível no licor, somada a dos resíduos de biomassa, basicamente cascas de árvores e cavacos, que também inevitavelmente são produzidos e podem ser queimados, gera uma quantidade de vapor suficiente para atender a todas as necessidades de calor de processo, com excedentes. Considerando que a demanda média específica de energia elétrica é de 850 kWh por tonelada de celulose, tem-se que a geração de vapor a partir de 65 bar e 400 °C já praticamente assegura a auto-suficiência destas indústrias (FAO, 2006). Em geral as indústrias de celulose brasileiras inclusive as mais modernas, tem sido configuradas para a auto-suficiência, sendo comuns plantas com potências instaladas de co-geração superiores a 100 MW. Para uma idéia do potencial desta tecnologia de geração elétrica para as condições brasileiras, basta verificar que adotando uma disponibilidade de 1.000 kWh por tonelada de celulose produzida, conservadora e factível para o atual estado de desenvolvimento tecnológico, associada à produção nacional de 12.850 mil toneladas em 2008 (BRACELPA, 2009), tem-se 12.850 GWh, correspondendo, para um fator de capacidade de 80%, a 1.833,6 MW instalados. O Brasil é líder mundial na produção de celulose de eucalipto e é considerado referência internacional pelas suas práticas sustentáveis. Além disso, 100% do Eucalipto e do Pinus utilizado pelo setor de celulose são originários de florestas plantadas (BRACELPA, 2009).

3.2.3 Análise energética

As espécies de pinus que mais se destacam no Brasil são a *Pinus elliottii* e *Pinus taeda*, ambas mais adequadas às regiões Sul e Sudeste, que se destacam na produção nacional de madeira derivada destas espécies (EMBRAPA, 2008). Por outro lado, dentre as centenas de espécies de eucalipto que existem, as florestas plantadas se restringem a poucas espécies, pois estas possuem características que as tornam mais viáveis economicamente, como por exemplo, rápido crescimento, maior rendimento volumétrico e madeira mais densa. São elas, *Eucalyptus grandis*, *E. saligna* e *E. dunnii*.

As densidades e poderes caloríficos inferiores da lenha catada, lenha comercial, do carvão vegetal e da lixívia negra são mostrados na tabela 3.1 (MME:EPE, 2009). Além disso, constam nessa tabela, os valores referentes às densidades e poderes caloríficos dos resíduos mistos de eucalipto e pinus, compostos por cavaco, serragem, casca etc, ambos calculados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2009). As características dos resíduos de pinus e eucalipto dependem do teor de umidade, da espécie de planta, entre outras, portanto, os valores calculados pelo IPT demonstram valores médios para os resíduos mistos, com teor de umidade em torno de 25%, que para fins de avaliação econômica e energética, podem ser considerados aceitáveis.

Tabela 3.1 *Densidades e Poderes Caloríficos Inferiores.*

	Densidade (kg/m³)	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)
Lenha Catada	300	3100
Lenha Comercial	390	3100
Carvão Vegetal	250	6460
Lixívia Negra	-	2860
Resíduos de Eucalipto	374	4024
Resíduos de Pinus	350	4174

Fonte: Ministério de Minas e Energia: Empresa de Pesquisas Energéticas.

Balanco Energético Nacional 2009. Brasília: MME:EPE, 2009.

No ano de 2008, a produção nacional de lenha foi de 94,279 milhões de toneladas, sendo que 38,892 milhões de toneladas foram transformadas em carvão vegetal, resultando em 54,385 milhões de toneladas consumidas diretamente (MME:EPE, 2009). Considerando o poder calorífico inferior de 3.100 kcal/kg, essa produção equivale a 16,859 milhões de tep (toneladas equivalentes de petróleo), conforme mostra a tabela 3.2. A transformação dessa quantidade de lenha em energia elétrica, considerando a base teórica térmica 1 kWh = 3132 kcal correspondente ao óleo combustível queimado numa usina térmica com rendimento de 27,5% (MME:EPE, 2009), produziria um equivalente a 53,82 TWh. Porém, em 2008 apenas 1,002 milhões de toneladas de lenha, equivalentes a 0,310 milhões de tep, foram transformadas diretamente (combustão direta) em energia elétrica, gerando o equivalente a 0,99 TWh. O restante dessa produção foi utilizado pelos setores residencial, industrial, agropecuário, entre outros, na produção de calor.

Para o carvão vegetal, a produção nacional em 2008 foi de 9,892 milhões de toneladas e considerando seu poder calorífico inferior de 6.460 kcal/kg foi produzido um equivalente a 6,390 milhões de tep (Tabela 3.2). O equivalente em TWh para o carvão vegetal (considerando a base térmica 0,3132 tep/MWh) é de 20,4 TWh. Em maio de 2010 a potência instalada no Brasil, para este tipo de combustível, era de aproximadamente 25,2 MW (ANEEL, 2010). Esta capacidade de geração de energia elétrica somente contabiliza a energia elétrica comercializada, ficando excluída a parcela de autoprodução. O restante da produção de carvão vegetal foi utilizado principalmente em indústrias, residências etc, para geração de calor.

O setor de celulose brasileiro produziu 12,85 milhões de toneladas de celulose em 2008. Esta produção foi responsável pela geração de 18,141 milhões de toneladas de lixívia negra (licor negro) (ANEEL, 2009). Considerando seu poder calorífico inferior de 2.860 kcal/kg foi

produzido um equivalente a 5,188 milhões de tep, conforme é mostrado na Tabela 3.2. O equivalente em TWh para a lixívia negra é de 16,56 TWh (adotando a base térmica 0,3132 tep/MWh). Em 2008 apenas 3,9 milhões de toneladas de licor negro (1,117 milhões de tep) foram utilizados para gerar energia elétrica (MME:EPE, 2009) excedente, sendo esta, comercializada. Isso equivale a geração de 3,56 TWh. Em maio de 2010 a potência instalada no Brasil, para este tipo de combustível, era de 1.240 MW (ANEEL, 2010), respondendo por 17,6 % do total de geração de energia elétrica utilizando biomassa como combustível.

Tabela 3.2 *Produção de Lenha, Carvão Vegetal, Licor Negro e Resíduos de Madeira em 2008 e seus Poderes Caloríficos.*

	Produção em 2008 (milhões de ton) ¹	Produção em 2008 (milhões de m³)	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	Equivalente em milhões de tep ²	Equivalente em TWh ³	Comparação com o consumo total no ano de 2008 (%)
Lenha (Total)	94,279	241,741	3100	29,227	93,31	20,14
Lenha consumida diretamente	54,385	139,449	3100	16,859	53,82	11,62
Carvão Vegetal	9,892	39,568	6460	6,390	20,40	4,40
Lixívia Negra	18,141	-	2860	5,188	16,56	3,57
Resíduos de Eucalipto	25,15	67,25	4024	10,11	32,28	6,97
Resíduos de Pinus	8,59	24,55	4174	3,58	11,43	2,46

Fonte: Ministério de Minas e Energia: Empresa de Pesquisas Energéticas. *Balanço Energético Nacional 2009*. Brasília: MME:EPE, 2009.

Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília: ANEEL: BIG, 2010.

Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Brasília: ABRAF, 2008.

¹ Considerada a densidade do produto comercial.

² Petróleo de referência: 10000 kcal/kg.

³ Critério de equivalência: base teórica térmica 1 kWh = 3132 kcal (0,3132 tep/MWh), correspondente ao óleo combustível queimado numa usina térmica com rendimento de 27,5%.

Considerando que as perdas no processamento primário da madeira variam aproximadamente de 22% a 28%, no processamento secundário de 35% a 50% e no processamento terciário (que compreende a produção de móveis e demais usos finais da madeira) as perdas são pequenas, podemos considerar uma perda de aproximadamente 50% do total da madeira bruta processada, desde sua extração até a confecção do produto ou uso final. Entretanto, desse total de perdas, devemos considerar as perdas das perdas que correspondem à parte considerada inútil na utilização como combustível em termelétricas ou centrais de geração térmica. Considerando, para fins de cálculos, 50% de perdas e a capacidade de produção sustentável das florestas brasileiras (390 milhões de m³/ano), a produção de resíduos florestais é de aproximadamente 67,25 milhões de m³/ano para o eucalipto, 24,55 milhões de m³/ano para o pinus e 103,2 milhões de m³/ano para demais espécies. Considerando o poder calorífico do eucalipto (4.024 kcal/kg) e do pinus (4.174 kcal/kg), obtemos um equivalente de 10,11 milhões de tep para resíduos de eucalipto e 3,58 milhões de tep para resíduos de pinus, como mostra a tabela 3.2. O equivalente em TWh (adotando a base térmica 0,3132 tep/MWh) para estes dois tipos de resíduos é de 32,28 TWh para o eucalipto e 11,43 TWh para o pinus. Segundo o Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2010), em maio de 2010 a potência instalada no Brasil era de 302,567 MW utilizando como combustível resíduos de madeira, respondendo por 4,29% do total de energia elétrica gerada utilizando biomassa como combustível.

A última coluna mostra a comparação da energia elétrica que seria gerada utilizando o total de cada fonte, em porcentagem, com o total de energia elétrica gerada no ano de 2008, no Brasil, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2009), que foi de 463,1 TWh. Convém observar que se o total de licor negro, resíduos de eucalipto e resíduos de pinus fossem utilizados para gerar energia elétrica, teríamos mais de 10% do consumo total de energia elétrica no ano de 2008.

3.3 BIOMASSA ENERGÉTICA AGRÍCOLA

O Brasil sempre foi um país de destaque devido à sua dimensão territorial, comparável a alguns continentes. Desde sua descoberta o país mostrava que com esta vasta área, seu clima favorável e solo fértil, seria um grande produtor de alimentos. Nos dias de hoje, o Brasil pode ser considerado um “celeiro” de várias culturas. A produção de grãos bateu recordes nos últimos anos devido a investimentos em tecnologia, aumento de produtividade e área plantada. O setor de agronegócios vem atraindo cada vez mais investimentos, tanto internos quanto externos, e gerando sucessivos saldos positivos na balança comercial o que leva o setor a ser um dos mais importantes para o crescimento do Brasil. Porém, essa enorme produção agrícola gera uma

grande quantidade de resíduos que em sua maior parte é descartada sem qualquer estudo de impacto ambiental. São exatamente esses resíduos agrícolas que receberam estímulos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologia para seu aproveitamento, nos últimos anos. O que antes era resto não aproveitável do beneficiamento de grãos, sementes, óleo etc, passou a ser visto como possível combustível para geração de energia. Além de ser um dos maiores produtores agrícolas, o Brasil começa a ser tornar um dos líderes da agricultura de energia.

O Brasil é o país do mundo que reúne o maior quantitativo de vantagens comparativas para liderar a agricultura de energia. A primeira vantagem comparativa que se destaca é a perspectiva de incorporação de áreas à agricultura de energia, sem competição com a agricultura de alimentos, e com impactos ambientais circunscritos ao socialmente aceito. O segundo aspecto a considerar é a possibilidade de múltiplos cultivos dentro do ano calendário. Por situar-se, predominantemente, na faixa tropical e subtropical do planeta, o Brasil recebe intensa radiação solar, ao longo do ano. Em decorrência de sua extensão e localização geográfica, o Brasil apresenta diversidade de clima, exuberância de biodiversidade e detém um quarto das reservas superficiais e sub-superficiais de água doce. No curto prazo, a principal força propulsora do crescimento da demanda por agroenergia será a pressão social pela substituição de combustíveis fósseis (MME:EPE, 2009).

A escolha dos cultivos para o aproveitamento energético dos resíduos, resultantes da colheita e beneficiamento do produto tem como base o volume da safra, a concentração e o tipo do resíduo produzido. É importante ressaltar que algumas culturas, mesmo tendo uma produção elevada, não geram resíduos suficientes que viabilizem economicamente o aproveitamento energético. Atualmente no Brasil, as culturas mais favoráveis ao fornecimento de biomassa para utilização como combustível na geração de energia são a cana-de-açúcar, o milho, o arroz, a soja, o amendoim, a mamona, o babaçu, a palma, o girassol, e o capim-elefante. A cana-de-açúcar é sem dúvida, o principal deles, pois além de produzir o etanol, o bagaço, palha e colmo podem ser utilizados na geração de energia elétrica. O milho, de onde também se pode extrair o etanol, é pouco utilizado para este fim no país, mas a sua palha e colmo também são utilizáveis como combustível em usinas termelétricas. Além destes, a casca do arroz vem despertando interesse nos últimos anos devido ao seu potencial energético e volume de produção, o que a torna um potencial combustível na geração de energia elétrica. Recentemente, o capim-elefante recebeu investimentos em pesquisa e desenvolvimento de tecnologia para seu aproveitamento, pois seu potencial energético, maior que o da cana e da casca do arroz, é um atrativo na sua utilização. Entretanto, a soja, o amendoim, a mamona, o babaçu, a palma e o girassol, entre outras, são culturas que estão sendo pesquisadas e utilizadas principalmente para a produção do biodiesel, sendo os seus resíduos possíveis combustíveis para sistemas de co-geração, com pouca possibilidade de produção de excedente de energia elétrica, pois o volume de produção de

resíduos ainda não é alto o suficiente para viabilizar uma planta geradora termelétrica. A quantificação dos resíduos agrícolas é feita com base nos “índices de colheita”, que expressam a relação percentual entre a quantidade total de biomassa gerada por hectare plantado de uma determinada cultura e a quantidade de produto economicamente aproveitável. Além disso, esses resíduos são bastante procurados para produção de ração animal. Portanto, para fins de geração de energia elétrica, em sistemas de co-geração e possível produção de excedente, as culturas atualmente economicamente viáveis são a cana-de-açúcar, o arroz, o milho, a soja e o capim-elefante.

3.3.1 Cana-de-Açúcar

A consolidação da cana-de-açúcar como energético no Brasil já é um fato, representando em 2008, 19% do total de energia primária produzida no país (ANEEL, 2009). O Brasil se tornou o maior produtor mundial de etanol, um combustível considerado limpo se comparado à gasolina e que despertou interesse de muitos outros países, o colocando como uma fonte lucrativa de exportação. A alta produtividade alcançada pela lavoura canavieira, acrescida de ganhos sucessivos nos processos de transformação da biomassa sucroalcooleira, tem disponibilizado enorme quantidade de matéria orgânica sob a forma de bagaço e palha, nas usinas e destilarias de cana-de-açúcar, interligadas aos principais sistemas elétricos que atendem a grandes centros de consumo, principalmente nos estados das regiões Sul e Sudeste, com destaque para o Estado de São Paulo. Além disso, o período de colheita da cana-de-açúcar coincide com o de estiagem das principais bacias hidrográficas do parque hidrelétrico brasileiro, tornando a opção de utilização do bagaço e da palha ainda mais vantajosa. Essa grande quantidade de resíduos pode ser aproveitada para geração de energia elétrica, parte consumida pela própria usina e parte excedente sendo comercializada.

Na produção do etanol, cerca de 28% da cana *in natura* já colhida é transformada em bagaço (MME:EPE, 2009). A energia contida em uma tonelada de bagaço, com 50% de umidade, corresponde a $2,13 \times 10^6$ kcal (0,213 tep). A umidade interfere diretamente no poder calorífico dos resíduos, diminuindo a eficiência da combustão devido à parte do calor ser absorvido na evaporação da água. Para valores inferiores a 30% de umidade, o rendimento da combustão é considerado ótimo. A porcentagem de 50%, normalmente obtida sem utilização de sistemas de secagem específicos, é considerada o limite para se obter um rendimento de combustão satisfatório (CEPEL, 2002). Pelo conceito de bagaço entende-se apenas o caule macerado, não incluindo a palhada e os ponteiros, que representam 55% da energia acumulada no canavial. Este potencial fabuloso é pouco aproveitado, sendo, na maioria dos casos, queimado no campo. As pontas e folhas da cana-de-açúcar que costumam ser deixadas no campo podem representar

até 30% da biomassa total (FAO, 2006), considerando o volume total de biomassa produzida por unidade de área plantada. A quantidade de resíduos decorrente da colheita da cana-de-açúcar depende de variados fatores, entre os quais: o sistema com ou sem queima da cana na pré-colheita, a altura dos ponteiros, a variedade plantada, a idade da cultura e seu estágio de corte, o clima, o solo, o uso ou não de vinhoto na fertirrigação do campo, entre outros, que exercem influência importante nas características, quantidade e qualidade da palha. Segundo HASSUANI (2005), o valor médio da produção de matéria seca que estima os resíduos secos potenciais da cana-de-açúcar, denominados palha, é de 140 kg por tonelada de cana colhida, com 50% de umidade, considerando as diversas variedades de cana-de-açúcar plantadas.

Em termos energéticos, do total de cana colhida, o bagaço equivale a 49,5% do total, o etanol a 43,2% e o vinhoto a 7,3%. No segmento sucro-alcooleiro, os resíduos que podem ser utilizados na produção de eletricidade são o bagaço, as pontas e folhas, e o vinhoto. O vinhoto é um resíduo da produção de álcool, sendo gerado somente nas destilarias. O seu aproveitamento energético é possível através da biodigestão anaeróbica, com obtenção de biogás. Atualmente, o principal destino do vinhoto é a fertirrigação na lavoura de cana-de-açúcar. O bagaço da cana é usado principalmente como combustível em sistemas de co-geração de energia nas plantas termelétricas instaladas nas usinas de cana-de-açúcar. O bagaço é queimado diretamente em fornos e caldeiras que produzem o vapor de processo, utilizado em processos de beneficiamento da cana (aquecimento do caldo de cana, melaço etc) e também em sistemas de geração de energia elétrica. Parte da energia elétrica gerada é consumida pela própria usina, mas no estágio atual de tecnologia, é comum a produção de energia elétrica excedente, sendo esta comercializada. Alternativamente à co-geração dentro das próprias usinas e destilarias, o bagaço pode ter uso energético fora destes ambientes, como insumo para volumoso de ração animal, fabricação de papel de bagaço, fabricação de elementos estruturais e hidrólise para produção de álcool. Tecnologias de produção de etanol a partir da hidrólise do bagaço estão em desenvolvimento e poderão atingir estágio comercial em 10-15 anos. Com viabilização da tecnologia, passa a ser muito importante o custo de oportunidade de aproveitamento do bagaço, pelas múltiplas alternativas para seu aproveitamento econômico.

De acordo com o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA, 2009), a produção de cana-de-açúcar no Brasil, em 2008, alcançou 552,8 milhões de toneladas, com uma produtividade média de 74 toneladas por hectare ao ano. Este montante foi 11,57% superior ao registrado no ano anterior, quando a safra foi de 495,5 milhões de toneladas. De acordo com estimativas da UNICA (2008), em 2020 a eletricidade produzida pelo setor poderá representar 15% da matriz brasileira, com a produção de 14.400 MW médios ao longo de um ano,

considerando-se tanto o potencial energético da palha e do bagaço quanto a estimativa de produção da cana, que deverá dobrar em relação a 2008, e atingir 1 bilhão de toneladas.

O maior potencial de produção de eletricidade encontra-se na região Sudeste, particularmente no Estado de São Paulo, e é estimado em 169,23 milhões de MWh por ano (MME:EPE, 2007). Na sequência estão Paraná (18,16 milhões de MWh anuais) e Minas Gerais (17,55 milhões de MWh anuais). O conteúdo calórico da cana-de-açúcar, considerando todos os seus componentes (sacarose, fibras, água e outros), é de, aproximadamente, 1060 kcal/kg. Para o bagaço de cana o poder calorífico inferior é de 2130 kcal/kg, considerando o bagaço com 50% de umidade (MME:EPE, 2009). O poder calorífico inferior das pontas e folhas (palha) da cana-de-açúcar é de 3105 kcal/kg, também considerando 50% de umidade.

3.3.2 Arroz

Outra cultura que é bastante cultivada no Brasil e que vem despertando forte interesse no aproveitamento dos seus resíduos é o arroz. O arroz se desenvolve sob diversas condições climáticas sendo, contudo, muito exigente em umidade do solo. O sucesso de sua cultura depende de água em abundância, para manter a temperatura ambiente dentro de intervalos adequados, e, nos sistemas tradicionais, de mão-de-obra intensiva. Com uma produção nacional de 12,114 milhões de toneladas na safra de 2008, 9,7% superior à de 2007, a área total plantada no Brasil foi de aproximadamente 2,9 milhões de hectares, sendo a 3ª cultura a ocupar a maior área plantada. O Estado com a maior produção de arroz em casca é o Rio Grande do Sul, com aproximadamente 7,37 milhões de toneladas, representando cerca de 60% da produção nacional com uma produtividade média de 5,85 ton/ha. Na segunda posição está o Mato Grosso com produção de 0,682 milhões de toneladas, representando 6% (IBGE, 2008). No Brasil há centenas de usinas de beneficiamento de arroz, sendo que cerca de 300 delas estão localizadas no Rio Grande do Sul. O beneficiamento do arroz não ocorre, necessariamente, próximo ao local da produção, uma vez que o transporte do arroz bruto – ou arroz em casca – para seu beneficiamento próximo do mercado consumidor, é economicamente justificável. Assim, o Estado de São Paulo, que não é um grande produtor, tem razoável capacidade de beneficiamento (BIODIESELBR, 2009).

O arroz vem da lavoura com 25-30% de umidade, índice que varia com as condições de plantio e com a época do ano. A umidade precisa ser reduzida para 12-15% para que o arroz seja beneficiado e, no máximo a 13%, para que seja armazenado (IRGA, 2006). A secagem é feita com queima de parte das cascas e os gases de combustão são empregados como meio de aquecimento. Uma usina exclusivamente produtora de arroz branco não tem consumo de vapor de processo, enquanto que as produtoras de arroz parboilizado necessitam de vapor nos

processos de beneficiamento. Uma usina de beneficiamento de arroz recebe o arroz colhido, que é transportado com casca para a usina. Ao longo de um ano, aproximadamente 15% da casca produzida é destinada à secagem do arroz, atividade que ocorre principalmente no período de colheita (janeiro a abril) (CEPEL, 2002). Além dos 15% destinados à secagem, outra parte está disponível em pequenas indústrias, espacialmente dispersas, inviabilizando o transporte por médias e longas distâncias, pois a casca é um material de densidade muito baixa.

A cadeia de produção do arroz, que consiste no plantio do grão nas lavouras, armazenamento dos grãos após a colheita, transporte até a usina, e beneficiamento do arroz com casca, resultando no arroz beneficiado pronto para ser embalado, gera uma quantidade fabulosa de resíduos, sendo a maior parte gerada na lavoura no período de colheita e na usina de beneficiamento. A etapa de colheita do arroz gera uma grande quantidade de resíduos que permanecem no campo, chamados de palha. Segundo o Centro de Pesquisa de Energia Elétrica (CEPEL, 2002), essa quantidade de resíduos produzida é de aproximadamente 0,38 tonelada por tonelada de arroz colhido, com umidade de 15%. O poder calorífico inferior da palha de arroz é de 3821 kcal/kg (MME:EPE, 2007). No processamento industrial do arroz, onde ocorre a retirada de sua casca, este resíduo corresponde a aproximadamente 22% do peso total do arroz com casca (CEPEL, 2002). Essas cascas, quando não são queimadas, são deixadas no meio ambiente, criando problemas ambientais, que se agravam quando levadas pelo vento para outras áreas, mas se reaproveitadas podem passar de empecilho para fonte energética, através da queima já na própria unidade beneficiadora. O poder calorífico inferior da casca de arroz é de 3200 kcal/kg (MME:EPE, 2007).

Além da combustão direta da palha e cascas do arroz, outro processo de conversão energética da biomassa que pode ser utilizado para o aproveitamento desses resíduos é a pirólise. Nesse caso, é necessário que se faça a compactação dos resíduos, transformando-os em briquetes, que são pequenos blocos cilíndricos de alta densidade. Com a pirólise, os briquetes adquirem maiores teores de carbono e poder calorífico, podendo ser usados com maior eficiência na geração de calor e energia elétrica. A casca do arroz tem baixa densidade e peso específico, além de lenta biodegradação, permanecendo em sua forma original por longo período de tempo. Apresenta um alto poder energético, já que contém quase 80% de seu peso em carbono. Suas cinzas são compostas basicamente de sílica e, portanto, bastante alcalinas, sendo uma boa opção para a utilização como substrato nas lavouras. Tanto nas cascas de arroz como em suas cinzas, não existem compostos tóxicos (Fonseca, 2000).

3.3.3 Capim-elefante

Além da cana-de-açúcar e do arroz, que são culturas tradicionais no Brasil, estão sendo pesquisadas e desenvolvidas novas culturas com fins energéticos, que ainda estão em fase de avaliação de produção, produtividade e de viabilidade econômica. Uma dessas culturas energéticas que já está sendo utilizada para gerar energia, mas está no seu período de adaptação é o capim-elefante. Existem muitas variedades de capim que são vulgarmente chamadas de capim-elefante e que só despertaram interesse energético de consumidores e empresários nos últimos 5-10 anos. Justamente por esse interesse recente, os dados e avaliações energéticas, de produção, de produtividade, entre outras, ainda estão sendo realizadas por entidades como: a Embrapa Agroenergia, Empresa de Pesquisa Energética, Instituto de Pesquisas Tecnológicas, entre outras. Portanto, para fins de avaliação no presente trabalho, serão utilizados dados e estudos realizados pelos órgãos citados.

O capim-elefante é bastante conhecido pelos agricultores e pecuaristas brasileiros. A planta é uma gramínea perene com altura entre 3 e 5 metros, que foi trazida da África para servir de pastagem e é utilizada principalmente na criação de gado de corte e leiteiro. Três vantagens do capim-elefante animaram os cientistas: ele cresce muito rapidamente; tolera solos mais pobres em nutrientes do que a cana-de-açúcar e o eucalipto – espécies já usadas como fontes de energia; e gera uma quantidade maior de biomassa por área. Segundo Vicente Mazzarella, pesquisador, diretor do IPT e autor de vários estudos sobre o potencial energético do capim-elefante, cada hectare plantado com a gramínea gera, em média, 45 toneladas de biomassa seca que podem virar energia. Com o mesmo hectare plantado de cana-de-açúcar, obtêm-se entre 15 e 20 toneladas de biomassa. Da mesma área plantada com eucalipto derivam entre dez e 15 toneladas de massa seca. Isso acontece, pois o capim-elefante pode ser colhido seis meses após o seu plantio e permite de 2 a 4 colheitas por ano, o que possibilita fornecimento de biomassa durante o ano todo, enquanto a cana-de-açúcar precisa de pelo menos um ano para sua colheita, e o eucalipto cerca de sete anos (IPT, 2007). Além disso, a cultura do capim é altamente eficiente na fixação de CO₂ atmosférico durante o processo de fotossíntese para a produção da biomassa vegetal, contribuindo na redução do efeito estufa. Entretanto, no atual estágio de aproveitamento energético, o capim-elefante ainda é uma expectativa para o futuro, pois é fundamental que haja um mercado comprador interessado em transformar a planta em algum tipo de energia.

O mecanismo de transformação do capim-elefante em energia é simples. Após a colheita mecanizada, ele é colocado para secar. Segue, então, para uma esteira, depois passa por uma máquina que pica as folhas em pequenos pedaços e retira o restante da umidade. Em seguida, os

pedaços são depositados numa caldeira, onde serão queimados e transformados em energia térmica que aquecerá a água, gerando vapor sob pressão que movimentará turbinas acopladas a geradores elétricos. Caso o capim precise ser armazenado por mais tempo antes da queima ou então transportado, ele pode ser compactado em péletes (tubos ocos feitos do capim macerado) ou nos chamados briquetes (tubos em forma de cilindro compacto). A compactação em briquetes permite ainda a transformação do capim em carvão vegetal, através da pirólise dos briquetes. Além disso, é possível utilizar o capim-elefante no processo de gaseificação e hidrólise da biomassa para produção do álcool. Segundo Mazzarella (2007), a produtividade do capim-elefante é de aproximadamente 45 toneladas de biomassa (15% de umidade) por hectare, anual. O poder calorífico inferior do capim é de 4200 kcal/kg, devido ao seu alto teor de fibras. Na biomassa vegetal do capim-elefante o teor de carbono é de aproximadamente 42%, na base de matéria seca. Assim, uma produção média de biomassa seca de capim de 45 ton/ha/ano, acumularia um total de 18,9 toneladas de carbono por hectare ao ano. Pode-se estimar que uma empresa com 100 ha de capim-elefante sequestraria o equivalente a 1.890 toneladas de CO₂/ano e poderia captar recursos advindos dos créditos de carbono (Mazzarella, 2007).

No Brasil, as estatísticas de produção anual de capim-elefante ainda são imprecisas e esparsas. Frente a isso, a possibilidade de avaliação econômica e energética do capim-elefante no Brasil ainda se encontra em fase de pesquisa. Apesar da grande expectativa em relação à produção de biomassa energética com capim-elefante, existem alguns pontos que precisam entrar na avaliação: alta necessidade de chuvas, pois o capim-elefante não é tolerante a períodos prolongados de seca; dificuldade da secagem ao ar livre, pois o capim-elefante verde contém cerca de 80% de água e não pode ser amontoado porque pode apodrecer; dificuldade e custos de compactação para o armazenamento e transporte do capim, diante do grande volume de matéria seca (EMBRAPA, 2008). Entretanto, mesmo com essas dificuldades, já existem usinas termelétricas que utilizam o capim-elefante como combustível na geração de energia elétrica. Outro setor que tem grande interesse é o de siderurgia, pois essa fonte pode apontar a possibilidade de substituição do carvão mineral pelo carvão vegetal de biomassa cultivada. Através de uma parceria com a Mineradora Samarco, controlada pela Companhia Vale do Rio Doce, a Embrapa Agrobiologia desenvolve estudos para produzir capim-elefante em grande escala para a indústria siderúrgica. A empresa necessita de 200 mil toneladas de carvão mineral/ano para produzir 15 milhões de toneladas de pelotas de ferro. Para substituir todo este carvão mineral, serão necessários pelo menos 13 mil hectares de capim-elefante plantados. Do ponto de vista do agronegócio, isto pode significar a possibilidade de geração de empregos e melhoria de renda para o agricultor. Isso mostra que a crescente preocupação com o meio ambiente e a busca incessante por fontes renováveis de energia fazem com que o futuro do capim-elefante pareça bastante promissor.

3.3.4 Milho

Duas culturas das quais os resíduos não são utilizados em grande escala para geração de energia elétrica, mas são importantes no Brasil por apresentarem uma produção muito elevada, são milho e a soja. O milho é uma gramínea que pode ser cultivada em qualquer clima, solo ou altura no mundo. Sua produtividade varia muito com relação à fertilidade do solo e à gerência das colheitas, sendo a produção média para colheitas no Brasil de 2,87 t/ha. A geração de resíduos agrícolas derivados da cultura do milho pode ser dividida em sabugo e colmo (caule), folhas e palha, esta última sendo a cobertura da espiga. Estudos de KOOPMANS e KOPPEJAN (1997) indicam que a geração de resíduos na cultura do milho é de aproximadamente 2,3 t/t de milho colhido, com 15% de umidade. Em termos de poder calorífico inferior dos resíduos na forma de sabugo, colmo, folha e palha do milho, o trabalho de KOOPMANS e KOPPEJAN (1997) apresenta o valor de 4227 kcal/kg. No ano de 2008 o cultivo do milho ocupou 14,4 milhões de hectares, representando a 2ª cultura mais plantada no país. Com uma produção nacional de 58,7 milhões de toneladas, a safra de 2008 foi considerada recorde (IBGE, 2009). Mesmo com essa gigantesca produção, a utilização dos resíduos do milho para produção de energia elétrica ainda não é atrativa economicamente.

Alguns pontos devem ser citados, pois a possibilidade da utilização desses resíduos existe, mas comparativamente a outras culturas, esses resíduos apresentam algumas desvantagens. No processo de colheita do milho a utilização de máquinas (colheitadeiras) é fundamental e utilizado praticamente na totalidade da produção. O milho é colhido e a própria colheitadeira faz o beneficiamento do grão, retirando o caule, folhas, palha e sabugo, resultando no grão de milho limpo. Os grãos de milho vão para um depósito na máquina e os resíduos são despejados na lavoura, pela parte de trás da máquina. Diferentemente do arroz, que possui casca e da cana que possui o bagaço, o milho em grão já está limpo e pronto para ser totalmente utilizado. Os resíduos do milho que são o caule, folhas, sabugo e palha, chamados de palhada, são totalmente descartados na lavoura e isso ocorre em toda a produção a granel de milho no Brasil. Essa é uma grande desvantagem, pois esses resíduos estão distribuídos em toda a área plantada, ou seja, totalmente dispersos no ambiente. A utilização da palhada do milho para geração de energia torna-se pouco viável, visto que seria necessário o recolhimento desses resíduos deixados na lavoura. Além disso, seria necessário o armazenamento e possivelmente a compactação desses resíduos para facilitar o transporte até a usina geradora. Esse trabalho acarreta em custos que acabam tornando a utilização da palha pouco viável economicamente. O milho pode vir a ser importante, porque os volumes expressivos de produção têm levado, no exterior, ao desenvolvimento de sistemas de colheita prevendo a recuperação dos resíduos. Entretanto deve-se avaliar economicamente o processo para o Brasil (adequação da tecnologia de colheita,

parcela recuperável, impactos no solo, custos envolvidos, valor da energia gerada). Uma exceção a isso é a colheita do milho em espiga para a utilização em indústrias de processamento do milho verde. Nesse caso, a colheitadeira beneficia a espiga do milho fechada, com palha e sabugo, descartando na lavoura somente o caule, talos e folhas. A retirada da palha e do sabugo do milho é feita na indústria que fabrica o milho em conserva (enlatado). Nesse caso, na planta da indústria de beneficiamento do milho verde poderia ser implantada uma central geradora termelétrica para aproveitamento dessa palha e sabugo. Aqui a utilização pode ser viável do ponto de vista econômico, pois os resíduos estão concentrados na indústria, diferentemente da colheita a granel, que estão na lavoura. Entretanto, a colheita do milho verde em espiga é irrisória se comparada ao montante colhido a granel. Portanto, a utilização dos resíduos do milho para geração de energia elétrica em escala comercial ainda não são atrativos economicamente. A viabilização econômica do seu uso, em sistemas de co-geração ou para geração de energia elétrica, é atrativa em casos específicos, com, por exemplo, a indústria de milho verde enlatado.

3.3.5 Soja

A soja merece destaque na análise energética principalmente devido a sua alta produção no país. O Brasil apresenta um grande potencial de crescimento para sua produção visto que cerca de 30% do valor total da produção agrícola deriva da produção de soja, que vem apresentando grande crescimento desde a década de 80, sendo hoje a cultura com maior área plantada do Brasil (IBGE, 2009). As exigências térmicas e hídricas da cultura da soja são altas, sobretudo nas fases mais críticas que são a da floração e a do enchimento dos grãos, semelhantes às do milho. Apesar disso, a soja suporta melhor a escassez de água na fase vegetativa, bem como tolera excesso de umidade no estágio de maturação e colheita. Os avanços da produção de soja nas últimas décadas estão diretamente relacionados ao desenvolvimento de novas tecnologias, que tornaram a soja brasileira cada vez mais competitiva. Além disso, a expansão da área de soja que vem ocorrendo nos últimos anos nas áreas consideradas fronteiras agrícolas, localizadas, de maneira geral, no cerrado brasileiro também contribuiu para o avanço na produção. No Brasil, os grãos da soja são utilizados para muitos fins, porém, a maior importância ainda é para a produção de grandes volumes de farelo para as rações animais e de óleo para a alimentação humana. Grande parte da soja produzida no país é destinada ao mercado externo e o Brasil é o país que possui as melhores condições para atender o crescimento da demanda mundial de soja, porém, o futuro dependerá da sua competitividade no mercado global, sendo o empenho do produtor e a abertura e integração de vias de escoamento da produção os pontos fundamentais deste processo. Em 2008, o país foi o segundo maior produtor mundial de soja, com aproximadamente 59,9 milhões de toneladas desse grão, com uma

produtividade média de 2,21 toneladas por hectare. Nesse ano a soja ocupou uma área plantada de 21,3 milhões de hectares, sendo a cultura com maior área plantada no país (IBGE, 2009).

Os resíduos provenientes da cultura da soja são derivados do processo de colheita, ou seja, os grãos são colhidos e as folhas, caule, talos e cascas são retirados e descartados na lavoura, semelhante à colheita do milho. O processamento dos grãos de soja ocorre principalmente para a produção de farelo utilizado em rações animais e para produção de óleo de soja. Na produção de ração animal, o grão é aproveitado totalmente, gerando uma quantidade nula de resíduos. Na produção de óleo, após o grão ser triturado e esmagado, é gerada uma “massa” de soja, que também é vastamente utilizada para ração animal. Portanto, os resíduos da cultura da soja, considerando a possibilidade de aproveitamento energético, são obtidos somente no processo de colheita e são chamados de palha. Segundo estudos de KOOPMANS e KOPPEJAN (1997) os resíduos agrícolas da soja que permanecem no campo, tratados como palha, apresentam uma produção de 2,5 toneladas de biomassa (15% de umidade) por tonelada de soja colhida. Em termos de poder calorífico inferior da palha de soja, os mesmos estudos indicam um valor de 3487 kcal/kg. Entretanto, semelhante ao caso do milho, os resíduos da cultura da soja que permanecem no campo precisam ser recuperados e concentrados para a utilização em uma planta geradora termelétrica. Isso acarreta em custos de colheita de resíduos, compactação e transporte até a unidade geradora, o que torna o aproveitamento ainda pouco viável economicamente. Além disso, a soja apresenta uma pequena desvantagem pois, os resíduos deixados na lavoura apresentam efeitos positivos no solo além de apresentarem uma alta impureza mineral.

Apesar da necessidade de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias para aproveitamento dos resíduos da soja em plantas de geração elétrica, a soja já é utilizada como uma fonte de energia na forma de biocombustível, o biodiesel. O biodiesel é um combustível que pode ser produzido a partir de uma série de matérias-primas (óleos vegetais diversos, gordura animal, óleo de fritura) através dos processos de transesterificação e craqueamento. O Brasil está entre os maiores produtores e consumidores de biodiesel do mundo, com uma produção anual, em 2008, de 1,2 bilhões de litros e uma capacidade instalada, em janeiro de 2009, para 3,7 bilhões de litros (ANP, 2009). Devido à sua característica oleaginosa, a soja em grão possui cerca de 20% de óleo (CEPEL, 2002). Comparativamente a outras culturas como dendê (26%), babaçu (66%), girassol (38-48%), mamona (43-45%), amendoim (40-50%) e caroço de algodão (15%) a soja apresenta uma baixa porcentagem de óleo, mas a sua vantagem está na possibilidade de produção em escala e na qualidade do óleo extraído (MME:EPE, 2007). Portanto, mesmo ainda apresentando um baixo aproveitamento dos resíduos para geração de energia elétrica, a soja e o milho possibilitam um grande aproveitamento energético, visto que os resíduos são cerca de

vinte vezes maiores que os de arroz, e sua utilização na geração termelétrica precisa ser buscada.

3.3.6 Análise energética

A tabela 3.3 reúne informações sobre os poderes caloríficos inferiores dos resíduos de algumas das culturas mais cultivadas no Brasil (MME:EPE, 2007). O poder calorífico inferior é função do teor de umidade contida na amostra do resíduo. Para o bagaço de cana foi considerado o teor de 50% de umidade, referindo-se ao bagaço resultante do processo de moagem da cana *in natura*, sem qualquer tipo de secagem adicional. Para a palha da cana também foi considerado o teor de 50%, correspondendo às pontas e folhas naturalmente secas. Para se obter um teor de umidade abaixo de 50% é necessário utilizar equipamentos de secagem. O arroz vem da lavoura com 25-30% de umidade e precisa passar por um processo de secagem para que sua casca seja retirada. O arroz com casca é secado até atingir 15% de umidade. Portanto, para a casca do arroz foi considerado o teor de 15%. A palha do arroz também passou por processo de secagem, até atingir 15% de umidade, para se obter o poder calorífico. As amostras de capim-elefante, palhada do milho e palha da soja também passaram por processo de secagem para que fossem obtidos seus poderes caloríficos inferiores, com 15% de umidade. É conveniente ressaltar que estas amostras vêm do campo com uma porcentagem de umidade mais alta, em torno de 50%.

Tabela 3.3 *Poderes Caloríficos Inferiores de alguns resíduos agrícolas.*

RESÍDUOS DAS CULTURAS	PODERES CALORÍFICOS INFERIORES (kcal/kg)
Bagaço de Cana-de-Açúcar	2130 ¹
Palha de Cana-de-Açúcar	3105 ¹
Casca do Arroz	3200
Palha do Arroz	3821
Capim-Elefante	4200
Palhada do milho	4227
Palha da Soja	3487

Fonte: Ministério de Minas e Energia: Empresa de Pesquisas Energéticas. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília: MME:EPE, 2007.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: CEPEL, 2002.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas. São Paulo: IPT, 2008.

¹ Considerado o bagaço e a palha da cana colhida *in natura*, com 50% de umidade.

No ano de 2008, a produção nacional de cana-de-açúcar foi de 552,8 milhões de toneladas, com uma produtividade média de 74 toneladas por hectare, ao ano (MAPA, 2009). Considerando que 28% do total de cana-de-açúcar que entra no sistema de moagem é transformada em bagaço (MME:EPE, 2009), foi produzido um total de 154,78 milhões de toneladas de bagaço de cana no ano de 2008, conforme mostra a tabela 3.4. O bagaço de cana possui um poder calorífico inferior de 2130 kcal/kg, portanto, essa produção total de bagaço equivale à 32,97 milhões de tep (tabela 3.4). A transformação dessa quantidade de bagaço em energia elétrica, considerando a base teórica térmica $1 \text{ kWh} = 3132 \text{ kcal}$, correspondente ao óleo combustível queimado numa usina térmica com rendimento de 27,5% (MME:EPE, 2009), produziria um equivalente a 105,26 TWh. Outro resíduo da cana que também pode ser utilizado para geração de eletricidade é a palha, composta pelas folhas e pontas. O valor médio da produção de palha por tonelada de cana colhida, no Brasil, é 140 kg/ton (50% de umidade). Isso significa que foram gerados 77,39 milhões de toneladas de palha de cana no ano de 2008 (tabela 3.4). A palha da cana-de-açúcar possui um poder calorífico inferior de 3105 kcal/kg. O total de palha gerada equivale a 24,02 milhões de tep. A transformação dessa quantidade de palha em energia elétrica, considerando a base teórica térmica, produziria um total de 76,69 TWh.

Segundo o Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2010), existem atualmente 307 usinas termelétricas que utilizam o bagaço de cana-de-açúcar como combustível, com uma potência instalada de 5.616,12 MW. Esta potência representa 77,3% do campo brasileiro de geração de energia elétrica que utiliza biomassa como combustível. Além destas usinas, existem 21 que estão em construção, com uma estimativa de potência instalada de 1.236 MW. Isso demonstra a importância do bagaço de cana-de-açúcar como uma fonte de geração de energia elétrica. Também mostra a importância da avaliação econômica e aproveitamento da palha da cana que hoje é pouco utilizada para este fim, sendo comumente queimada no campo.

O arroz com casca foi a 3ª cultura mais cultivada no ano de 2008 e apresentou uma produção nacional de 12,114 milhões de toneladas. Os dois principais resíduos gerados na cadeia de produção do arroz são a casca e a palha do arroz. O arroz vem da lavoura com 25-30% de umidade que precisa ser reduzida para 12-15% para que este seja beneficiado. A secagem é feita com queima de parte das cascas e os gases de combustão são empregados como meio de aquecimento. Ao longo de um ano, aproximadamente 15% da casca produzida é destinada à secagem do arroz. Além disso, consideramos uma indisponibilidade de outros 15%, referente à casca disponível em pequenas indústrias, especialmente dispersas, inviabilizando o transporte. No processamento industrial do arroz, onde ocorre a retirada de sua casca, este resíduo corresponde a aproximadamente 22% do peso total do arroz com casca (CEPEL, 2002). Portanto, considerando as perdas e a safra de arroz no ano de 2008, foram geradas 1,865

milhões de toneladas de casca de arroz. A casca do arroz possui um poder calorífico inferior de 3200 kcal/kg. O total de casca de arroz, considerando seu poder calorífico, equivale a 0,60 milhões de tep (tabela 3.4). A transformação dessa quantidade de casca em energia elétrica, considerando a base teórica térmica ($1 \text{ kWh} = 3132 \text{ kcal}$), produziria um equivalente a 1,91 TWh. Além da casca, outro resíduo é gerado na etapa de colheita do arroz, a palha. A quantidade de palha produzida é de aproximadamente 0,38 tonelada por tonelada de arroz colhido, com umidade de 15%. Isso significa uma produção de 4,6 milhões de toneladas de palha de arroz. Esta palha possui um poder calorífico inferior de 3821 kcal/kg. O total de palha equivale a 1,75 milhões de tep (tabela 3.4). A transformação dessa quantidade de palha em energia elétrica, considerando a base teórica térmica, produziria um equivalente a 5,58 TWh.

Segundo o Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2010), existem atualmente 7 usinas termelétricas que utilizam a casca do arroz como combustível, com uma potência instalada de 31,4 MW. Além destas, 1 nova usina está em construção, com potência instalada estimada em 3,82 MW. A casca do arroz ainda é pouco utilizada na geração de energia elétrica se for olhada a quantidade gerada por ano no país. Isso evidencia a importância de estudos e pesquisas para a viabilização do aproveitamento dessa fonte de biomassa como combustível na geração de energia. A palha do arroz é uma fonte potencial mas necessita de pesquisa e adaptação no sistema atual de colheita, que descarta toda a palha na lavoura. Esse novo sistema, além da colheita do grão, disponibilizaria a palha em carreiras, montes ou até mesmo em um depósito na máquina, tornando mais fácil a reunião de grandes volumes de palha. Isto demonstra a importância dos resíduos do arroz como fonte de biomassa para geração e energia elétrica.

O capim-elefante não possui dados contabilizados como safra, produção por estado etc, pois, diferentemente de culturas tradicionais como cana-de-açúcar, arroz, milho e soja, esta cultura está em fase de avaliação de produção, produtividade e de viabilidade econômica. Vários órgãos e entidades estão estudando o capim-elefante como fonte de geração de energia elétrica então, dados apresentados por estes órgãos serão levados em conta na avaliação desse trabalho. Segundo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas, cada hectare plantado com capim-elefante gera, em média, 45 toneladas de biomassa seca que podem virar energia. Isso acontece pois o capim-elefante pode ser colhido seis meses após o seu plantio e permite de 2 a 4 colheitas por ano. Como exemplo de produção e utilização do capim-elefante na geração de energia elétrica em larga escala, cita-se a empresa Sykué Bioenergía localizada na Bahia. Em operação desde novembro de 2008, a empresa possui uma área de 11 mil hectares cultivada com capim-elefante. A usina tem capacidade instalada de 30 MW e está conectada ao sistema interligado nacional através da concessionária de energia do estado da Bahia, a COELBA. Os planos da empresa são de construir mais 10 usinas até 2011, com capacidade instalada de 300 MW, todas utilizando

capim-elefante como combustível. Considerando para avaliação de geração elétrica no presente trabalho, o citado exemplo, e considerando a produção de biomassa seca de capim-elefante por área, os 11 mil hectares da empresa Sykué produzem anualmente 495 mil toneladas de biomassa seca. Utilizando o poder calorífico inferior do capim-elefante, que é de 4200 kcal/kg, esse total de biomassa seca equivale à 0,20 milhões de tep (tabela 3.4). A transformação dessa quantidade de capim em energia elétrica, considerando a base teórica térmica, produziria um total de 0,63 TWh.

Segundo o Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2010), existe atualmente 1 usina termelétrica utilizando capim-elefante como combustível. Além desta, 2 novas usinas estão em construção, com potência instalada estimada em 64 MW. Analisando o atual momento, a geração de eletricidade utilizando capim-elefante como combustível é muito baixa. Porém, deve-se levar em conta que o interesse na utilização desse combustível é recente. Portanto, mesmo com essa pequena geração atual, o capim-elefante vem se mostrando como uma fonte com grande potencial de aproveitamento energético. Muitos fatores precisam ser avaliados, como por exemplo, a existência de um mercado consumidor, comprador e fornecedor dessa biomassa para que existam comercialização e interesse de empresas na sua utilização em plantas geradoras. Isso mostra que com o estímulo dos governos para geração de energia limpa, o capim-elefante é uma das fontes de biomassa mais promissoras para que, num futuro próximo, venha ser utilizado para gerar energia elétrica.

As produções nacionais de milho e soja, no ano de 2008, foram de 58,7 milhões e 59,9 milhões de toneladas, respectivamente. Os resíduos gerados por estas duas culturas se concentram quase totalmente na etapa de colheita dos grãos. Os resíduos do milho que podem ser aproveitados para fins energéticos são o caule, folhas, sabugo e palha, chamados de palhada, e os da soja são folhas, caule, talos e cascas, chamados de palha. A geração de resíduos na cultura do milho é de aproximadamente 2,3 t/t de milho colhido, com 15% de umidade. Em termos de poder calorífico inferior dos resíduos na forma de sabugo, colmo, folha e palha do milho, têm-se o valor de 4227 kcal/kg. Os resíduos agrícolas da soja que permanecem no campo, tratados como palha, apresentam uma produção de 2,5 toneladas de biomassa (15% de umidade) por tonelada de soja colhida. Em termos de poder calorífico inferior da palha de soja, os mesmos estudos indicam um valor de 3487 kcal/kg. Portanto, considerando as produções de milho e soja no ano de 2008, foram gerados 135 milhões de toneladas de resíduos do milho e 149,75 milhões de toneladas de resíduos da soja. O total de resíduos do milho, considerando seu poder calorífico, equivale a 57,06 milhões de tep (tabela 3.4). Para a soja, o total de resíduos equivale a 52,21 milhões de tep (tabela 3.4). A transformação dessas quantidades de resíduos em energia elétrica, considerando a base teórica térmica (1 kWh = 3132 kcal), produziria um equivalente a 182,18 TWh para o milho e 166,69 TWh para a soja.

Tabela 3.4 *Produção de palha e bagaço de cana-de-açúcar, casca e palha de arroz, capim-elefante, palhada do milho e palha da soja em 2008 e seus Poderes Caloríficos.*

	SAFRA da Cultura em 2008 (milhões de ton)	Geração de Resíduos (t_{bio}/t_{produto})	Produção Total de Resíduos (milhões de ton)	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	Equivalente em milhões de tep ²	Equivalente em TWh ³	Comparação com o consumo total no ano de 2008 (%)
Bagaço de Cana-de- Açúcar	552,80	0,28	154,78	2130 ¹	32,97	105,26	22,72
Palha de Cana-de- Açúcar	552,80	0,14	77,39	3105 ¹	24,02	76,69	16,56
Casca do Arroz	12,11	0,22	1,86 ⁴	3200	0,60	1,91	0,41
Palha do Arroz	12,11	0,38	4,60	3821	1,75	5,58	1,2
Capim- Elefante	-	-	0,49 ⁵	4200	0,20 ⁵	0,63	0,13
Palhada do Milho	58,70	2,30	135,00	4227	57,06	182,18	39,33
Palha da Soja	59,90	2,50	149,75	3487	52,21	166,69	35,99

¹ Considerado o bagaço e a palha da cana colhida *in natura*, com 50% de umidade.

² Petróleo de referência: 10000 kcal/kg.

³ Critério de equivalência: base teórica térmica 1 kWh = 3132 kcal (0,3132 tep/MWh), correspondente ao óleo combustível queimado numa usina térmica com rendimento de 27,5%.

⁴ Descontada a perda de 30% (15% utilizado na secagem do arroz e 15% em indústrias distantes).

⁵ Produção de biomassa seca de capim-elefante cultivado numa área de 11 mil hectares.

Os resíduos provenientes da cultura do milho e da soja são derivados do processo de colheita, ou seja, os grãos são colhidos e as folhas, caule, talos e cascas são retirados e descartados na lavoura. Atualmente não existem empreendimentos que utilizam esses resíduos para geração de energia elétrica e o motivo principal é devido aos resíduos estarem dispersos por toda a área de plantio. Este é o maior empecilho para o atual aproveitamento energético destes resíduos, pois o

recolhimento destes após a colheita inviabiliza economicamente a sua utilização energética. Comparativamente a outras fontes para geração de eletricidade, estes resíduos acabam se tornando combustíveis mais caros. Porém, com uma adaptação do atual sistema de colheita dos grãos, estes resíduos podem passar de biomassa descartada para biomassa energética. Basta que as empresas desenvolvam e ofereçam colheitadeiras que beneficiem o grão e descartem os resíduos em montes, carreiras, ou até mesmo armazenem temporariamente em depósitos na máquina. Isso já ocorre em alguns lugares da Europa e pode ser utilizado no Brasil no futuro. Essa tecnologia deve ser pesquisada e desenvolvida, pois com esse fabuloso volume de resíduos, a soja e o milho são fontes de biomassa com alto potencial para servir como combustível na geração de energia elétrica.

A última coluna mostra a comparação da energia elétrica que seria gerada utilizando o total de cada fonte, em porcentagem, com o total de energia elétrica gerada no ano de 2008, no Brasil, segundo dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2009), que foi de 463,1 TWh. Convém observar que se o total de bagaço de cana fosse utilizado, poderia ser gerado mais que 22% do total de energia elétrica gerada no ano de 2008, o que mostra que o setor sucro-alcooleiro é um setor bastante importante na matriz de energia elétrica no Brasil e que serve como estímulo na busca da utilização de outras fontes. Outras duas culturas que geram resíduos em alta escala e que se fossem utilizados gerariam uma quantidade considerável de energia elétrica é a soja e o milho. Seus resíduos juntos possibilitariam gerar mais de 75% do total de energia elétrica gerada no Brasil em 2008. Mesmo que este montante não seja atingido, a utilização destes resíduos deve ser buscada, pois mostra a existência da utilização de um potencial ainda não explorado.

3.4 BIOMASSA ENERGÉTICA DERIVADA DE REJEITOS URBANOS E INDUSTRIAIS

Além da biomassa energética florestal e biomassa energética agrícola, outro grupo explorado e detalhado no presente trabalho é o da biomassa energética derivada de rejeitos urbanos e industriais. Alguns autores definem este grupo apenas como rejeitos urbanos, sólidos e líquidos. A parte de rejeitos agroindustriais é inserida no grupo de biomassa energética agrícola, pois a produção em escala desses rejeitos normalmente é obtida de culturas agrícolas, sendo assim, agrupadas. Porém, nesse trabalho, os resíduos decorrentes de agroindústrias, usinas de beneficiamento de grãos, entre outras, foram agrupados no capítulo de biomassa energética agrícola. Nesta parte serão detalhadas fontes de biomassa advindas de rejeitos urbanos e industriais, líquidos ou sólidos, sendo os industriais compostos por dejetos de animais em

criadouros, abatedouros, destilarias, fábricas de laticínios etc, contemplando assim, a biomassa de origem animal.

A biomassa energética apresenta rotas significativamente diversificadas, com extensa variedade de fontes, que vão desde os resíduos agrícolas, agroindustriais, industriais e urbanos até as culturas dedicadas à exploração energética, com grande quantidade de tecnologia para os processos de conversão. Esses processos podem ser simples como a combustão direta para obtenção da energia térmica e/ou elétrica, ou então com certo nível de complexidade, como processos físico-químicos e bioquímicos para a obtenção de combustíveis líquidos e gasosos, que variam desde pequena até a larga escala, com diferentes tecnologias de utilização. As rotas tecnológicas são detalhadas no capítulo 4 deste trabalho, portanto, serão brevemente comentadas neste capítulo. A biomassa energética derivada de rejeitos urbanos, sólidos ou líquidos, é composta pelos diferentes tipos de lixo gerado nos meios urbanos, e pelos efluentes domésticos e comerciais captados pelas estações de tratamento de água e esgoto. Os rejeitos industriais considerados neste grupo são compostos pelos rejeitos provenientes de criadouros, abatedouros, destilarias, fábricas de laticínios, indústrias de processamento de carnes etc, de frangos, suínos e bovinos, entre outros, capazes de gerar uma quantidade considerável de biomassa animal que justifique estudos, pesquisas e investimentos em sua utilização como fontes para geração de energia elétrica, para consumo próprio ou comercialização. As principais rotas tecnológicas para aproveitamento desses rejeitos são a combustão direta, a gaseificação e a biodigestão (ANEEL, 2009). Na combustão direta, é fornecida uma quantidade suficiente de oxigênio para se conseguir a combustão completa do combustível, nesse caso o lixo. Os produtos principais são o gás de combustão a elevada temperatura e calor. Este calor pode ser utilizado para aquecer água, gerar vapor e mover turbinas que, acopladas a geradores elétricos, produzirá energia elétrica. Na gaseificação é fornecida uma quantidade de oxigênio insuficiente para se conseguir a combustão completa do combustível. O produto principal é um gás combustível que pode ser queimado em caldeiras, em motores ou em turbinas a gás. A biodigestão anaeróbica é um processo que utiliza resíduos orgânicos diversos para produzir o metano (CH_4) como gás combustível, em biodigestores. Esta é uma tecnologia madura e bem estabelecida onde a degradação natural da matéria orgânica, nesse caso o lixo, esgoto ou rejeitos animais, mas podendo ser qualquer tipo de biomassa, acontece por ação de populações bacterianas na ausência de oxigênio, produzindo o biogás, uma mistura de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2).

Existe uma grande variedade de biomassa sólida combustível empregável como fonte de geração termelétrica, seja na forma de madeira, na de resíduos sólidos de processamento agrícola ou agroindustrial, ou rejeitos urbanos, sendo seu principal emprego em sistemas de

geração de vapor industrial ou de co-geração. Embora a utilização de biomassa sólida combustível para geração termelétrica seja comum, sua viabilidade econômica é altamente influenciada pela proximidade à fonte de produção, custos de transporte e manuseio, teores de umidade e sistemas de processamento e preparação para tecnologias mais eficientes. A queima direta de combustíveis sólidos ocorre em câmaras de combustão específicas, pois as características do processo de combustão de sólidos são bastante diversas das dos combustíveis líquidos e dos gasosos. Para a conversão de seu potencial energético em energia útil na geração de energia elétrica em média e grande escala, uma das principais tecnologias aplicáveis é o ciclo *Rankine*, composto por caldeiras e turbinas a vapor em variadas composições. A biodigestão anaeróbica ocorre na matéria orgânica depositada em gaseificadores, gerando o biogás, e empregando os ciclos *Brayton* (turbinas a gás) e ciclo combinado, podem gerar energia elétrica. Outra forma de utilizar a energia do combustível sólido é gaseificá-lo. Cada rota tecnológica de conversão possui um rendimento no seu processo, sendo este detalhado no capítulo seguinte. Portanto, o objetivo deste capítulo é detalhar e avaliar o potencial energético contido nos rejeitos urbanos sólidos e líquidos, e industriais utilizados nos diversos processos de conversão, que resultam em calor, gás combustível e biogás.

3.4.1 Rejeitos urbanos sólidos e líquidos

A biomassa contida nos rejeitos urbanos é composta por resíduos sólidos e líquidos. Os resíduos sólidos, vulgarmente chamados de lixo, é uma mistura heterogênea de plásticos, metais, vidros, madeiras, papéis e matéria orgânica. No Brasil, o lixo é comumente coletado por empresas contratadas para prestar tal serviço e são transportados até grandes áreas abertas para serem despejados, os chamados lixões. Esses resíduos são descartados nessas grandes áreas e em determinados intervalos de tempo são revolvidos e cobertos com camadas de terra. Porém, essas áreas muitas vezes recebem o lixo descartado por residências e comércios sem qualquer tipo de pré-seleção de materiais que poderiam ser reciclados. No Brasil, a coleta seletiva de lixo, com intuito de estimular a reciclagem de materiais como metais, vidros e plásticos, é pouco difundida, sendo utilizada em poucas cidades. Estes rejeitos, quando acumulados em área aberta durante algum tempo, se tornam um grave problema ambiental, trazendo mau cheiro, doenças e dando origem a um líquido altamente tóxico, o chorume⁹. A decomposição dos rejeitos contidos nos lixões dá origem a um líquido com elevada carga orgânica e alto poder contaminante que, com a ação da água da chuva, é carregado para mananciais, rios, córregos, podendo atingir lençóis freáticos, poluindo estes recursos naturais. O impacto ambiental da poluição de águas

⁹ Chorume: Líquido poluente, de cor escura, altamente tóxico e com forte odor desagradável, originado de processos biológicos, químicos e físicos da decomposição de resíduos orgânicos.

por este líquido é evitável, mas requer investimentos em estrutura para reciclagem de alguns componentes presentes no lixo e aproveitamento do restante que não é passível de reciclagem.

Os rejeitos urbanos sólidos e líquidos oriundos dos setores comerciais e residenciais poderiam, após recolhidos, passar por um sistema de gerenciamento e seleção que identificaria sua destinação, em função de algumas características. Esta destinação poderia ser para a reciclagem, para a compostagem ou fabricação de adubos e fertilizantes, para descarte em um aterro sanitário ou para a geração de energia elétrica – a partir da queima direta, da gaseificação ou através do biogás gerado em um aterro energético. Comparativamente ao grande volume de resíduos provenientes das explorações agrícolas, pecuárias e agroindustriais, assim como aqueles produzidos por matadouros, abatedouros destilarias, fábricas de laticínios, esgotos domésticos e estações de tratamento de lixos urbanos (a partir dos quais é possível obter biogás), estes apresentam uma carga poluente mais elevada que impõe a criação de soluções que permitam diminuir os danos provocados por essa poluição, gastando o mínimo de energia possível em todo o processo. Dentre as 3 rotas tecnológicas mais aceitáveis para o processamento dessa biomassa, a biodigestão anaeróbica é a que apresenta maior comparativo de vantagens, pois além de ser um processo com maior rendimento energético, possui considerável capacidade de despoluir, permite valorizar um produto energético (biogás) e ainda obter um fertilizante, cuja disponibilidade contribui para uma rápida amortização dos custos da tecnologia instalada.

A proporção em cada tipo de biogás gerado depende de vários parâmetros, como o tipo de digestor e o substrato a digerir. Entre os tipos de substratos urbanos é possível citar o lixo proveniente de residências e comércios e o lodo de estações de tratamento de esgoto urbano. De qualquer forma, esta mistura é essencialmente constituída por metano (CH_4), com valores médios na ordem de 60 a 65%, e por dióxido de carbono (CO_2), com aproximadamente 35 a 45% de sua composição (MME:EPE, 2007). A Tabela 3.5 apresenta a composição média do biogás.

Tabela 3.5 *Composição média do biogás.*

Componentes	Composição do biogás em %
Metano (CH ₄)	60 a 70
Gás carbônico (CO ₂)	30 a 40
Nitrogênio (N)	Traços
Hidrogênio (H)	Traços
Gás sulfídrico (H ₂ S)	Traços

Fonte: Ministério de Minas e Energia: Empresa de Pesquisas Energéticas. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília: MME:EPE, 2007.

O poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa, e varia de 5.000 a 7.000 kcal/m³. Se submetido a processos de purificação, pode gerar um índice de até 12.000 kcal/m³. O metano é um gás incolor e altamente combustível. Não produz fuligem e seu índice de poluição atmosférico é inferior ao do butano, presente no gás de cozinha (MME:EPE, 2007). Atualmente, existem duas destinações possíveis para o aproveitamento do biogás. O primeiro caso consiste na queima direta (aquecedores, esquentadores, fogões, caldeiras). O segundo caso diz respeito à conversão de biogás em eletricidade. Assim, os sistemas que produzem o biogás podem tornar a sua exploração benéfica em termos energéticos, bem como contribuir para a resolução de problemas de poluição de rejeitos e efluentes. Em alguns países, o biogás produzido em aterros sanitários já é utilizado como fonte energética na geração de energia elétrica que é utilizada em processos sanitários e em alguns casos existe a comercialização para uso em indústrias (MME:EPE, 2007). Os aterros sanitários em todo o mundo produzem cerca de 20 a 60 milhões de toneladas de metano por ano, resultado direto da decomposição orgânica dos componentes do lixo. O Brasil é responsável por uma parcela de 0,7 a 2,2 milhões de toneladas anuais. Como o metano tem potencial de aquecimento global (GWP) para 100 anos, definido pelo IPCC, 21 vezes maior que o dióxido de carbono, a simples queima do metano, mesmo sem o aproveitamento do calor gerado, reduz o seu impacto – em termos de aquecimento global (MME:EPE, 2007). Se o metano for utilizado para a geração de energia elétrica em substituição a combustíveis fósseis, esta redução de impacto será mais significativa, sendo possível a cada unidade elétrica gerada com rejeitos (dependendo da rota escolhida) compensar a emissão decorrente de três a quinze unidades energéticas geradas com gás natural em ciclo combinado (OLIVEIRA e ROSA, 2003). A Tabela 3.6 apresenta a comparação do biogás com outras fontes energéticas.

Tabela 3.6 *Equivalência entre o biogás e outros combustíveis.*

Combustível	1 m ³ de biogás equivale a:
Gasolina	0,613 L
Óleo Diesel	0,553 L
GLP	0,454 kg
Lenha	1,536 kg
Álcool Hidratado	0,790 L
Eletricidade	1,428 kWh

Fonte: Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisas Energéticas. *Plano Nacional de Energia 2030*.
Brasília: MME:EPE, 2007.

Estimativas apontam que, durante o período de vida útil do aterro, a produção de biogás pode variar de 150 a 300 m³ por tonelada de rejeito, sendo que a proporção de metano varia entre 50 e 60 %, por volume. Logo, o potencial de energia de um aterro sanitário pode variar de 573,21 x 10³ kcal a 1146,43 x 10³ kcal (2.400 MJ a 4.800 MJ) por tonelada de rejeito. Em instalações modernas, como no aterro dos Bandeirantes em São Paulo, há uma potência instalada de 20 MW, utilizando grupos moto-gerador (ANEEL, 2009). Portanto, para a elaboração de projetos de recuperação do gás metano para geração de energia elétrica é necessária a execução de um estudo de viabilidade técnico-econômica, no qual deve ser verificado o projeto de construção do aterro sanitário (ou transformação dos lixões em aterros), a quantidade e os tipos de resíduos depositados diariamente, o tempo de operação do aterro, tempo de vida útil do aterro, determinação da quantidade, composição química e poder calorífico do gás de aterro gerado, entre outros. A partir destes dados, poderá ser dimensionada a planta de geração de energia, levando-se em consideração se há gás suficiente para a operação da mesma.

Além dos rejeitos urbanos sólidos têm-se os rejeitos urbanos líquidos, que são os efluentes líquidos, domésticos e comerciais. Na maioria das cidades estes efluentes são descartados nas redes de esgoto, seguindo para estações de tratamento, quando não são despejados em rios, riachos etc, poluindo este recurso natural. Nas estações, estes efluentes são tratados, e a parte reaproveitada é destinada a reservatórios, lagos, rios, entre outros, sendo considerada apta a voltar para a natureza. O esgoto urbano é composto quase totalmente de matéria orgânica residual diluída, cujo tratamento é uma imposição sanitária. Após o tratamento, uma massa orgânica é produzida, vulgarmente chamada de lodo. O lodo proveniente de estações de tratamento de esgoto está sendo alvo de pesquisas energéticas para viabilizar o seu aproveitamento na geração de energia elétrica através da rota tecnológica de digestão

anaeróbica. Seu conteúdo energético não é grande, mas em cidades populosas o elevado volume em que são produzidos justifica sua utilização, além de reduzir a poluição ambiental. O poder calorífico do lodo depende de vários fatores, mas estudos variados estimam um valor médio de 900 kcal/kg (UNIFEI, 2007). Ao final da produção do biogás, o resíduo presente no gaseificador ainda pode ser utilizado como fertilizante em florestas plantadas de eucalipto, fechando o ciclo de aproveitamento do lodo destas estações. Portanto, a viabilização do aproveitamento energético do lodo resultante de estações de tratamento de esgoto deve ser buscada, pois além da produção de energia elétrica, essa massa com elevada carga orgânica terá uma destinação mais apropriada.

3.4.2 Rejeitos Industriais sólidos e líquidos

Além dos rejeitos sólidos e líquidos urbanos, outros rejeitos podem ser utilizados para gerar o biogás, como rejeitos de criadouros, abatedouros, destilarias, fábricas de laticínios, indústrias de processamento de carnes, entre outros. Os rejeitos urbanos sólidos, localizados em aterros sanitários e os rejeitos urbanos líquidos, localizados nas estações de tratamento de esgoto, levam vantagem no quesito de produção do biogás em grande escala. Certamente esses locais possuem alta capacidade de fornecimento de biomassa, possibilitando a instalação de plantas geradoras do biogás e posteriormente de energia elétrica, com foco na comercialização dessa energia. Porém, os demais rejeitos, comumente são produzidos em baixa escala e em locais dispersos. Mesmo considerando uma pequena geração de biomassa anual nesses locais, estes rejeitos podem e devem ser utilizados para produzir o biogás e gerar energia elétrica. Esta energia produzida será utilizada pela própria indústria, criadouro, destilaria, abatedouro, fábrica de laticínio etc, nos seus processos e, se possível, o excedente será comercializado. Estes sistemas de co-geração distribuídos apresentam várias vantagens que tornam o aproveitamento desses rejeitos interessante. Além de gerar energia elétrica para o próprio consumo, as indústrias ficam menos dependentes da energia fornecida pela concessionária local, proporcionam soluções para aproveitamento dos rejeitos produzidos em seus processos, que muitas vezes não são destinados a locais corretos, diminuem os investimentos e os impactos ambientais produzidos pelo descarte desses rejeitos etc.

A biomassa colocada dentro do biodigestor influi diretamente na quantidade de biogás gerada. A tabela 3.7 apresenta, aproximadamente, quanto de excremento alguns animais podem produzir por dia.

Tabela 3.7 *Produção diária de resíduos líquidos e sólidos de alguns animais.*

Rejeito	Unidade	Suínos	Frango de Corte	Gado de Corte	Gado de Leite
Líquidos	% Próprio Volume / Dia	5,1	6,6	4,6	9,4
Sólidos	kg/animal/dia	2,3 – 2,5	0,12 – 0,18	10 – 15	10 – 15

Fonte: KONZEN, E.A., *Avaliação quantitativa e qualitativa dos dejetos de suínos em crescimento e terminação, manejados em forma líquida*, 1980. 56p. Dissertação de Mestrado, Universidade federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

A tabela 3.8 apresenta, aproximadamente, a quantidade de rejeitos necessários para a produção de 1 m³ de biogás.

Tabela 3.8 *Quantidade de rejeitos necessários para a produção de 1m³ de biogás.*

Matéria Prima	Quantidade
Esterco fresco de Bovino	25 kg
Esterco seco de Frango	2,3kg
Esterco seco de Suínos	2,86 kg

Fonte: CASTANÓN, N.J.B., *Biogás originado a partir dos rejeitos rurais*. Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia, Conversão e utilização. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

3.4.3 Análise energética

O biogás gerado em aterros sanitários, apesar de ser um dos subprodutos indesejáveis dos aterros e lixões e ser um dos mais potentes gases do efeito estufa (MME:EPE, 2007), é um gás combustível de alto poder energético, devido à alta concentração do metano na sua constituição. Como forma de exemplificar a produção de biogás e estimar o seu aproveitamento para geração de energia elétrica, considerou-se dados obtidos pela CETESB (2006), Companhia Ambiental do Estado de São Paulo.

Tabela 3.9 *Produção de rejeitos sólidos urbanos por habitante e suas características.*

Produção por habitante	0,6 – 0,8 kg/dia
Umidade	45% – 55%
Densidade média	250 – 300 kg/m ³
Poder Calorífico Médio do lixo	2750 – 3200 kcal/kg
Poder Calorífico do biogás	5000 – 7000 kcal/m ³
Produção Média de Biogás	0,15 – 0,3 m ³ /kg

Fonte: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. CETESB, 2006.

Considerando-se que a população brasileira no ano de 2008 era de 189,6 milhões de habitantes (IBGE, 2009), foi produzido um total aproximado de 113.760 toneladas de rejeitos sólidos por dia no Brasil. O total de rejeitos urbanos sólidos gerados no ano de 2008 no Brasil foi de 41,52 milhões de toneladas. Porém, grande parte destes resíduos está em locais dispersos ou em pequenos aterros, onde a implantação de uma planta geradora se torna pouco viável economicamente. Portanto, adotou-se no presente trabalho um fator de aproveitamento de 40% (16,60 milhões de toneladas). Considerando-se o poder calorífico médio destes resíduos como 2750 kcal/kg e o fator de aproveitamento de 40% do total, o potencial energético gerado equivale a 4,56 milhões de tep. Adotando-se uma produção média de biogás de 0,15 m³/kg de rejeito, foi produzido um total de 2.491 milhões de m³ de biogás no ano de 2008. Tomando-se o valor do poder calorífico do biogás como 5000 kcal/m³, o potencial energético gerado equivale a 1,24 milhões de tep (tabela 3.10). A transformação desta quantidade de biogás em energia elétrica, considerando o critério de equivalência listado na tabela 3.6, onde 1 m³ de biogás equivale a 1,428 kWh, produziria um equivalente a 3,55 TWh.

Como exemplo de avaliação energética do lodo produzido em estações de tratamento de esgoto, cita-se dados de levantamentos feitos pela SABESP (2008), companhia de água e esgoto do estado de São Paulo. As estações de tratamento de esgoto de Barueri, ABC, Parque Novo Mundo, São Miguel e Suzano, processaram em 2007 um total de 12.810 litros de esgoto por segundo. A produção de lodo neste ano foi de 485 toneladas por dia, produzindo um total anual de 177,025 mil toneladas de lodo. Considerando-se o poder calorífico do lodo como 900 kcal/kg, o total de lodo produzido pela SABESP em 2007 equivale a 15,93 mil tep. Adotando-se uma produção média de biogás de 0,15 m³/kg de lodo, foi produzido um total de 26,55 milhões de m³ de biogás pela SABESP no ano de 2007. Tomando-se o valor do poder calorífico do biogás como 5000 kcal/m³, o potencial energético gerado equivale a 0,013 milhões de tep

(tabela 3.10). A transformação desta quantidade de biogás em energia elétrica, considerando o critério de equivalência onde 1 m³ de biogás é igual a 1,428 kWh, produziria um equivalente a 0,042 TWh.

Como exemplo de estímulo à utilização de rejeitos industriais para produção de biogás e geração de energia elétrica, pode-se citar a COPEL, Companhia Paranaense de Energia Elétrica. Em 2008, a ANEEL autorizou a COPEL a implantar um projeto-piloto para a compra da energia elétrica excedente produzida em pequenas propriedades rurais do Paraná a partir de dejetos de animais. Chamado Programa de Geração Distribuída com Saneamento Ambiental, ele permitirá a utilização do material orgânico resultante da criação de suínos, evitando o seu lançamento em rios e em reservatórios como o da usina hidrelétrica de Itaipu. Os resíduos serão transformados, por meio de biodigestores, em biogás, que será utilizado como combustível na produção de energia elétrica (ANEEL, 2009). Além disso, a fiscalização ambiental cada vez mais restritiva, para controle de odor e poluição de águas por rejeitos animais está forçando os fazendeiros a investir em biodigestores como forma de gerenciamento de dejetos. Isto poderá tornar estas fazendas auto-suficientes em energia elétrica, promovendo a geração distribuída de forma eficiente. Para simular a produção de biogás e geração de energia elétrica utilizando rejeitos de criadouros, adotou-se uma quantidade exemplo de 5000 cabeças de suínos em uma fazenda. De acordo com a tabela 3.7, a produção diária de rejeitos sólidos de suínos é de 2,3 kg/animal. A quantidade de rejeitos sólidos produzida pelas 5000 cabeças durante 1 ano seria de 4.198 toneladas. Considerando que para produzir 1 m³ de biogás seriam necessários 2,86 kg de rejeitos secos de suínos, em um ano seria produzido um total de 1,47 milhões de m³ de biogás. Tomando-se o valor do poder calorífico do biogás como 5000 kcal/m³, o potencial energético gerado equivale a 0,735 mil tep (tabela 3.10). A transformação desta quantidade de biogás em energia elétrica, considerando o critério de equivalência onde 1 m³ de biogás é igual a 1,428 kWh, produziria um equivalente a 0,002 TWh.

A tabela 3.10 reúne as informações e as análises dos potenciais energéticos dos resíduos urbanos sólidos e líquidos e industriais.

Tabela 3.10 *Produção de rejeitos urbanos sólidos e líquidos, industriais (exemplo de criadouro), potencial de geração de biogás, poderes caloríficos e equivalentes energéticos.*

	Produção Total de Rejeitos (mil ton)	Quantidade necessária para produzir 1 m³ de biogás	Volume total de biogás gerado (milhões de m³)	Poder calorífico do biogás	Equivalente em milhões de tep ²	Equivalente em TWh ³	Comparação com o consumo total no ano de 2008 (%)
Rejeitos Urbanos Sólidos (lixo)	16600 ¹	6,66 kg	2.491	5000 kcal/kg	1,24	3,55	0,76
Rejeitos Urbanos Líquidos (lodo)	177,025 ⁴	6,66 kg	26,55	5000 kcal/kg	0,013	0,042	-
Rejeitos industriais (criadouro de suínos)	4198 ⁵	2,86 kg	1,47	5000 kcal/kg	0,00074	0,002	-

Fonte: Ministério de Minas e Energia: Empresa de Pesquisas Energéticas. *Plano Nacional de Energia 2030*. Brasília: MME:EPE, 2007.

Agência Nacional de Energia Elétrica. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3 ed.

Brasília: ANEEL, 2009.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. CETESB, 2006.

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica. Rio de Janeiro: CEPEL, 2002.

Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. SABESP, 2008.

¹ Considerado um fator de 40% devido a pequenos aterros e rejeitos dispersos.

² Petróleo de referência: 10000 kcal/kg.

³ Critério de equivalência: base teórica térmica 1 m³ = 1,428 kWh. Rendimento da usina térmica = 25%.

⁴ Considerado apenas as estações controladas pela SABESP.

⁵ Produção de rejeitos em uma criação de 5000 cabeças de suíno.

Este aproveitamento também pode ser aplicado em fazendas onde existem sistemas de criação intensiva de gado bovino e criação de aves. Os dejetos produzidos por estes animais são os mais comuns no Brasil. Outra opção para extração de energia dos dejetos animais é a queima direta dos resíduos. Desta forma, os dejetos da avicultura, suinocultura e criação de bovinos podem ser

utilizados para este fim. Maiores estudos precisam ser realizados para dimensionar a capacidade de geração de energia elétrica a partir dos rejeitos destas criações no Brasil, que é um dos maiores criadores mundiais.

Segundo o Banco de Informações de Geração (ANEEL, 2010), existem atualmente 9 usinas termelétricas que utilizam biogás como combustível, com uma potência instalada de 48,52 MW. Entre estas usinas, têm-se instalações que utilizam o lodo de estações de tratamento de esgoto – ETE Ouro Verde, cuja proprietária é a Companhia de Saneamento do Estado do Paraná –, usinas que utilizam biogás gerado em aterros – Usina Bandeirante, que extrai o biogás do aterro dos Bandeirantes em SP – e usinas que utilizam rejeitos industriais de criatórios de frangos – Cooperativa Agroindustrial Lar. Além destas, 1 nova usina está em construção, com potência instalada estimada em 19,73 MW e 4 estão em processo de outorga, com potência aproximada de 10,41 MW.

Os exemplos de rejeitos urbanos e industriais, sólidos e líquidos, utilizados para análise de potencial de produção, potencial energético e potencial de geração de energia elétrica não devem ser comparados entre si, mas sim, tomados como estimativas de aproveitamento em grande, média e pequena escala, pois possuem dimensões de produção bastante diferentes. A intenção é demonstrar a possibilidade de aproveitamento nas três escalas e não instigar a comparação entre as três fontes para avaliar as vantagens de uma sobre a outra.

O aproveitamento energético de rejeitos urbanos e industriais, sólidos e líquidos, existe e deve ser buscado, pois além da possibilidade de produção do biogás para geração de energia elétrica, haverá uma destinação mais correta para estes rejeitos o que tende a diminuir o impacto ambiental provocado pelo descarte inadequado. O que deve ser observado e analisado é a capacidade de geração de biogás, capacidade de fornecimento de rejeitos, custos de implantação da planta geradora do biogás e da planta geradora termelétrica, entre outros, tudo contemplado por um estudo de viabilidade econômica. Isto também ajuda a tornar a matriz de energia elétrica mais limpa e menos impactante ao meio ambiente.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise econômica de custos de insumos, custos de produção, custos da biomassa, custos de transporte, análise dos custos de implementação das plantas geradoras termelétricas, retorno dos investimentos, entre vários outros, não é foco deste trabalho. Considerando que é necessária uma análise criteriosa para saber a rentabilidade do aproveitamento energético destas fontes de

biomassa, sendo necessário um estudo caso a caso, não foram desenvolvidos estudos e pesquisas para estimar e comparar os custos médios para cada uma das fontes de biomassa detalhadas no presente trabalho. Portanto, foram tomados como base, custos médios por kWh fornecidos por órgãos e empresas nacionais, somente como parâmetro de referência para mostrar a competitividade do aproveitamento energético da biomassa quando comparado a outros tipos de fontes. Os custos médios de investimento para produção de energia elétrica no Brasil são de: R\$ 118,40/kWh para fonte hidrelétrica; R\$ 138,75/kWh para fonte nuclear; R\$ 135,05/kWh utilizando o carvão mineral nacional; R\$ 140,60/kWh utilizando gás natural; R\$ 101,75/kWh utilizando biomassa (bagaço de cana-de-açúcar) como fonte (ANEEL, 2009). Apesar do custo utilizando biomassa ser obtido a partir da utilização do bagaço de cana, estes valores demonstram que a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologia para aproveitamento da biomassa como fonte de geração de eletricidade já é competitiva com outros tipos de combustíveis e fontes.

Ao longo deste capítulo se verifica quão variada e expressiva é a oferta de biomassa como recurso energético no Brasil. A disponibilidade desta biomassa está essencialmente vinculada a sistemas integrados de produção agrícola, agroindustrial e silvicultural. O Brasil é um país que já apresenta uma produção de biomassa com enorme potencial de aproveitamento energético. As condições naturais e geográficas favoráveis, aliadas à grande quantidade de terra agricultável com características adequadas de solo e condições climáticas, fazem do Brasil um dos países que reúne o maior quantitativo de vantagens comparativas para liderar a agricultura de energia. A pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias voltadas para a biomassa energética é fundamental para a expansão do aproveitamento deste potencial. O setor de florestas plantadas (silvicultural) possui perspectivas de expansão vinculadas à produção de produtos de alto valor agregado, como a madeira serrada, painéis de madeira, móveis, celulose e papel, cujas previsões indicam uma expansão na demanda mundial, exigindo que plantios dedicados ao aproveitamento energético sejam implantados independentemente das expansões previstas, com valorização do aproveitamento dos resíduos gerados na extração, beneficiamento e processamento da madeira (MME:EPE, 2007).

O aproveitamento da biomassa residual gerada no setor agroindustrial, representada pelo setor sulcralcooleiro, apresenta-se bastante avançado em termos das opções economicamente viáveis de desenvolvimento de rotas tecnológicas de recuperação e transporte da biomassa residual da cultura da cana-de-açúcar, podendo servir como estímulo para a consolidação de um mercado de recuperação de resíduos de várias culturas agrícolas, como soja, milho, arroz, entre muitas outras e culturas dedicadas à geração de energia elétrica, como capim-elefante. No Brasil, há perspectivas de curto prazo para o aumento da produção de energia elétrica a partir da biomassa

em agroindústrias onde existe uma grande quantidade de resíduos energéticos aproveitáveis. A viabilidade do aproveitamento de resíduos agrícolas está diretamente relacionada à implementação de um sistema logístico que seja capaz de integrar de forma racional as operações de colheita, transporte e armazenagem destes subprodutos. Cada tipo de biomassa apresenta características próprias como tamanho, forma e densidade e com base nestas características é que serão definidas as opções tecnológicas a serem utilizadas na estrutura de aproveitamento energético desta biomassa. Além disso, para que seja possível o aproveitamento energético dos resíduos há a necessidade de se manter um estoque temporário próximo à unidade de geração.

Os rejeitos urbanos e industriais, sólidos e líquidos, compostos por lixo urbano, lodo de estações de tratamento de esgoto, rejeitos animais produzidos por criadouros, abatedouros, granjas, fábricas de laticínios, indústrias de processamento de carnes, alimentos etc, além de serem produzidos em altas quantidades, apresentam uma carga poluente que impõe a criação de soluções que permitam diminuir os impactos ambientais e os danos provocados por esta poluição. Uma solução que já é utilizada em vários países do mundo, inclusive no Brasil, é a produção do biogás, por meio da biodigestão anaeróbica dos rejeitos, dentro de biodigestores. O biogás produzido é utilizado como combustível em plantas geradoras termelétricas que utilizam a energia elétrica gerada para consumo nos processos internos ou para comercialização. O aproveitamento energético, além de proporcionar um destino correto para estes rejeitos, possibilita a diversificação e ampliação, mesmo que pequena, da matriz de energia elétrica brasileira. Ao final do processo, o resíduo resultante nos biodigestores pode ser utilizado como fertilizante em vários tipos de cultivos, fechando o ciclo da reciclagem destes rejeitos.

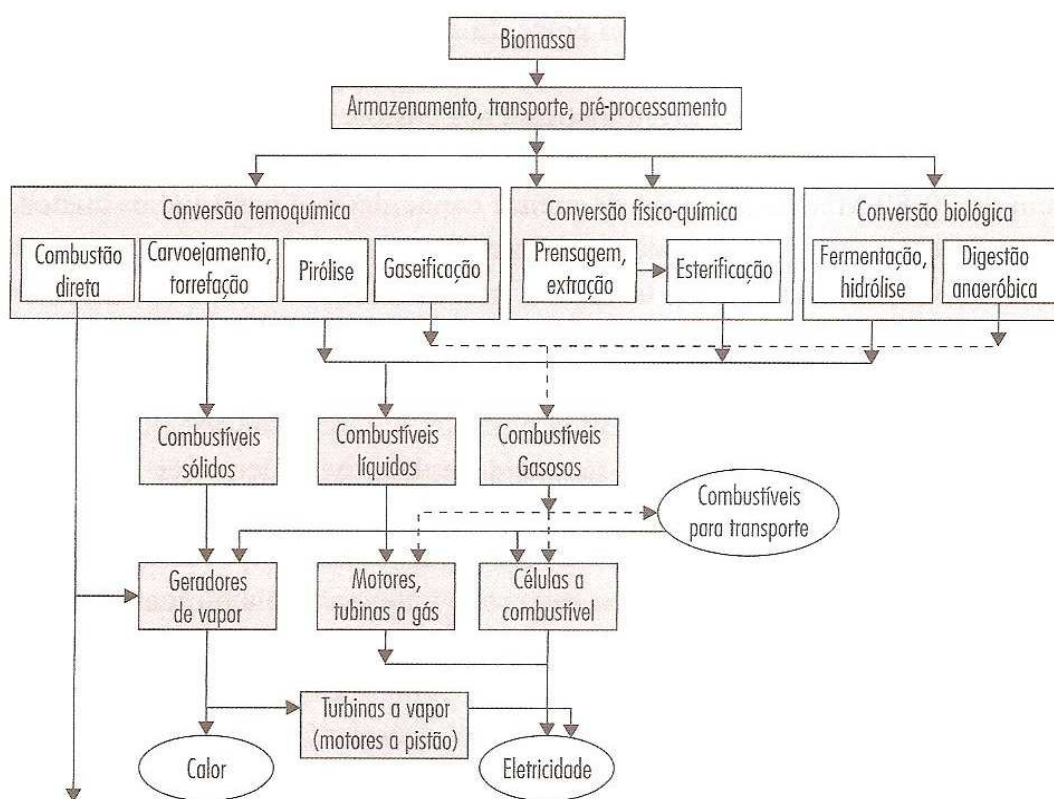
A exploração da biomassa como insumo energético traria benefícios para o meio ambiente e poderia contribuir para a consolidação do modelo competitivo do setor elétrico, além de agregar ao sistema uma energia cujo custo é pouco influenciado pelas mudanças internacionais do preço do petróleo e variações cambiais, e que pode ser disponibilizada em prazos relativamente curtos. Pesquisas e desenvolvimento de tecnologias para utilização e aumento da eficiência devem ser buscados, pois o contínuo aumento na demanda por energia elétrica no Brasil obriga o país a buscar cada vez mais, soluções economicamente viáveis para suprir a necessidade deste tipo de energia.

4 ROTAS TECNOLÓGICAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme visto nos capítulos anteriores, várias são as fontes de biomassa que podem ser usadas para o atendimento das demandas energéticas da humanidade. Porém, apesar desta variedade de fontes, as formas de aproveitamento da energia da biomassa para geração de eletricidade ainda são limitadas, tanto por fatores de viabilidade econômica dos processos empregados, quando por fatores de maturidade das tecnologias.

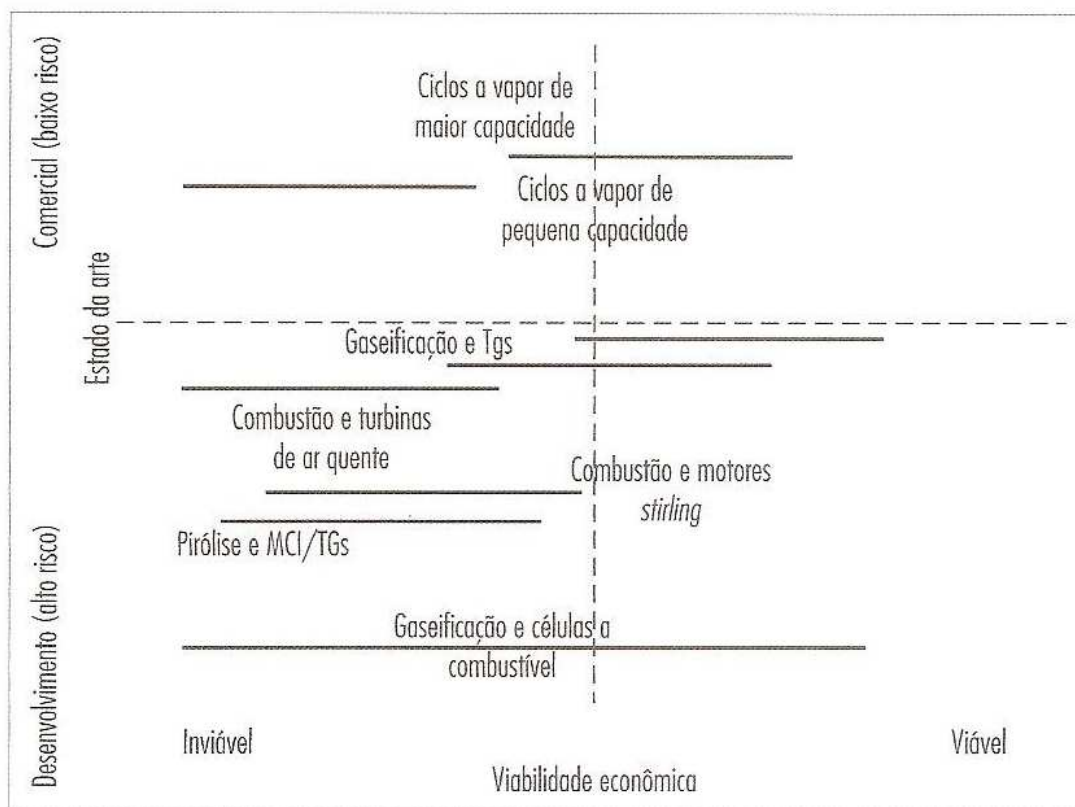
Em termos de rotas tecnológicas para a geração termelétrica a partir da biomassa, há um bom número de possibilidades. Sendo que em todas elas estão envolvidos processos de conversão energética da biomassa em um produto intermediário, que posteriormente é utilizado para geração de eletricidade, (MME:EPE, 2007). Algumas rotas possíveis são explicitadas na Figura 4.1.



Fonte: CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva, GÓMES, Eduardo Olivares. *BIOMASSA para energia*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

Figura 4.1 Rotas de conversão energética da biomassa.

Considerando a totalidade de vias tecnológicas para geração de eletricidade a partir da biomassa, algumas rotas se destacam, por apresentarem boas condições de utilização na atualidade ou por terem boas perspectivas de utilização no médio e longo prazo. A Figura 4.2, traz uma visão geral das condições de viabilidade econômica e estado da arte destas tecnologias, feitas para o cenário europeu no final do século XX (CORTEZ et al., 2007).



Fonte: CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva, GÓMES, Eduardo Olivares. *BIOMASSA para energia*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

Figura 4.2 *Tecnologias de produção de eletricidade a partir da biomassa.*

Assim, este capítulo tem com o propósito de apresentar o estado da arte em tecnologias de geração de energia elétrica a partir biomassa. Focando nas tecnologias que apresentam melhores possibilidades de aproveitamento, no Brasil e no mundo, no curto, médio e longo prazo.

4.2 PROCESSOS DE CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA

Atualmente a conversão energética da biomassa é efetuada de formas diversas e em vários níveis de complexidade, havendo processos tão simples como a mais elementar queima do

composto orgânico, chegando a processos que utilizam elaborados procedimentos industriais com diversos níveis de controle.

Os processos de conversão podem ser caracterizados quanto ao tipo de transformação imprimida à fonte energética, sendo divididos em: processo de conversão termoquímica, neste grupo estão inclusos os procedimentos de combustão direta, gaseificação e pirólise; processo de conversão físico-química, incluindo a prensagem, extração e esterificação; processo de conversão bioquímica ou biológica, incluindo procedimentos de digestão anaeróbica, fermentação e hidrólise.

4.2.1 Conversão termoquímica

A conversão termoquímica da biomassa é caracterizada por reações endotérmicas¹⁰ e exotérmicas¹¹, tendo como resultado final a geração de calor por intermédio da combustão de um energético. Os métodos para esta conversão são variados, podendo ser diferenciados quanto à quantidade de oxigênio que é fornecida às reações. De forma breve, os processos são divididos em duas etapas, sendo a primeira composta pela decomposição térmica da carga combustível primária e a segunda pela combustão dos produtos resultantes da decomposição, (MME:EPE, 2007).

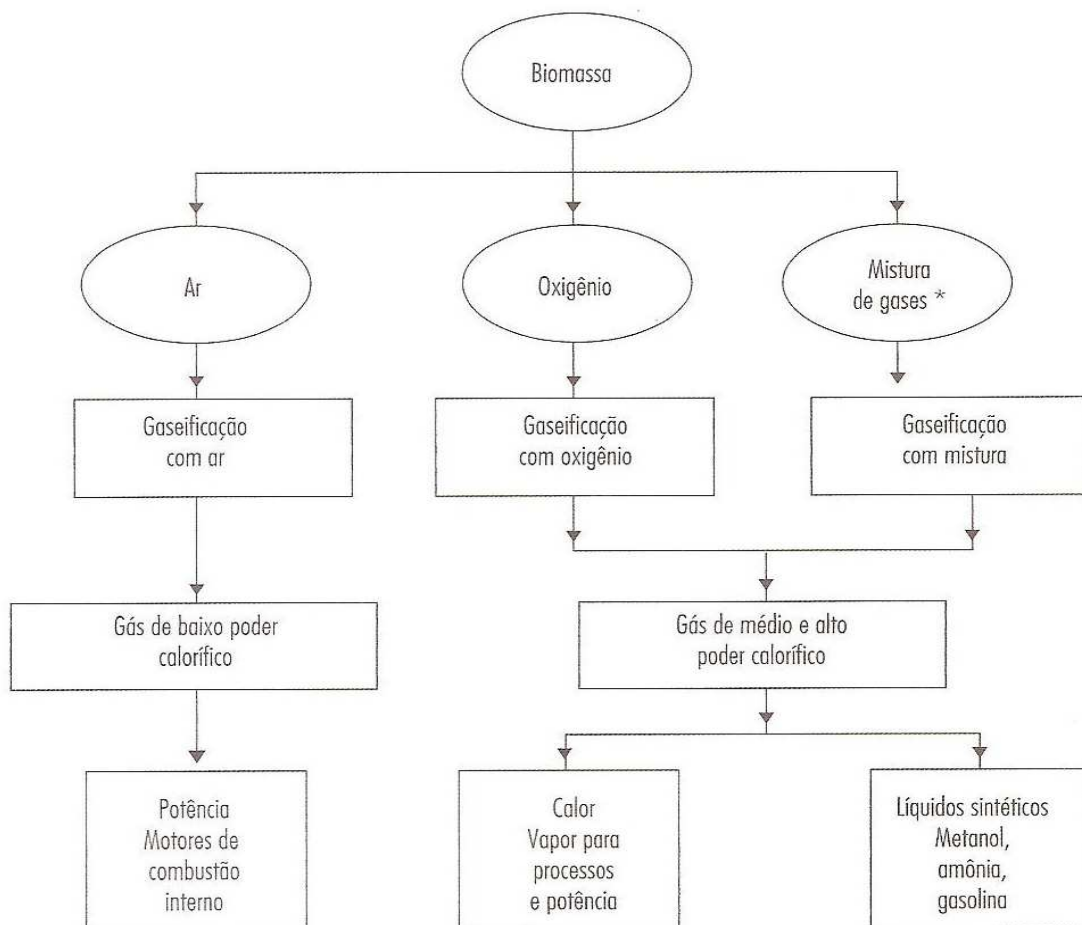
Para o caso específico da combustão direta da biomassa, caracterizada pela decomposição térmica do combustível e sua combustão, ocorrendo em um mesmo ambiente físico (fornalha ou reator semelhante). Todo o energético, seja ele o combustível primário ou um subproduto deste, é consumindo no processo, sendo que a queima total está condicionada ao fornecimento em quantidade suficiente de oxigênio ao processo. Neste método tem-se como produto final um gás de combustão, a elevada temperatura, composto principalmente de dióxido de carbono (CO_2), nitrogênio (N_2) e água (H_2O), (MME:EPE, 2007).

Por outro lado, o procedimento de conversão energética adotado na gaseificação converte um insumo líquido ou sólido em um gás combustível, por intermédio da oxidação parcial deste insumo a temperaturas intermediárias, ou seja, temperaturas acima das adotadas no processo de pirólise e abaixo das temperaturas praticadas no processo de combustão direta (CORTEZ et al., 2008). O consumo de oxigênio na reação é da mesma forma, intermediário e o produto principal desta reação é um gás composto principalmente de monóxido de carbono combustível (CO), hidrogênio (H_2) e metano (CH_4). Sendo este gás aproveitado tanto, na queima em

¹⁰ Reação que ocorre com absorção de calor.

¹¹ Reação que ocorre com liberação de calor.

caldeiras, em motores de combustão interna ou em turbinas a gás (MME:EPE, 2007), quanto em geração direta de calor, ou ainda como matéria-prima para fabricação de combustíveis líquidos (CORTEZ et al., 2008). A qualidade, limpeza e poder calorífico do gás, produto da gaseificação, dependem do procedimento utilizado na oxidação da biomassa ou insumo primário, que pode ocorrer na presença de oxigênio puro, ar ou mistura de gases conforme ilustra a Figura 4.3.



*Mistura basicamente de oxigênio e vapor de água ou ar enriquecido com oxigênio e vapor de água.

Fonte: CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva, GÓMES, Eduardo Olivares.

BIOMASSA para energia. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

Figura 4.3 Rotas de gaseificação baseada no tipo de agente gaseificante.

Já o processo da pirólise ocorre em temperaturas relativamente baixas (500°C - 1000°C) e em atmosfera não oxidante, ou seja, com ausência de oxigênio ou em níveis muito baixos de sua presença. Desta forma, com o gradativo aumento da temperatura há a degradação do insumo energético submetido ao procedimento, resultando em combustíveis: sólidos, como o carvão vegetal; líquidos, como o óleo pirolítico; e gasosos, como o gás pirolítico. (MME:EPE, 2007). Os produtos da pirólise dependem muito do tipo de matéria-prima submetida à reação termoquímica, exemplificando, em casos que o produto requerido deva ser em sua maioria formado por frações voláteis, a matéria-prima deve ter altas concentrações de celulose e

hemicelulose¹², já para quando é pretendido a obtenção de percentuais de 50% carbono fixo na parcela sólida é o insumo deve conter porção significativa de lignina¹³ (CORTEZ et al., 2008). Dentre as tecnologias empregadas à pirólise há métodos antigos, como a carbonização, que utiliza baixas taxas de aquecimento maximizando a formação de carvão vegetal. Há ainda, métodos modernos que utilizam altas velocidades de aquecimento e curtos períodos de residência, esses processos maximizam a produção de compostos orgânicos líquidos e/ou gasosos e são chamados de pirólise rápida e ultra-rápida (CORTEZ et al, 2008). A Tabela 4.1 explicita alguns processos de pirólise, com suas características e produtos principais.

Tabela 4.1 *Tecnologias da pirólise.*

Processo de pirólise	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temperatura máxima (C)	Produtos principais
Carbonização	horas-dias	muito pequena	400	Carvão vegetal
Convencional	5-30 min	pequena	600	Bioóleo, carvão e gás
Rápida	0.5-5s	intermédia	650	Bioóleo
Flash pirólise	<1s	alta	<650	Bioóleo, gás
Ultra-rápida	<0.5s	muito alta	1000	Produtos químicos e gás combustível
Vácuo	2-30s	intermédia	400	Bioóleo
Hidropirólise	<10s	alta	<500	Bioóleo e produtos químicos
Metanopirólise	<10s	alta	>700	Produtos químicos

Fonte: CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva, GÓMES, Eduardo Olivares. *BIOMASSA para energia*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008. (modificada).

4.2.2 Conversão físico-química

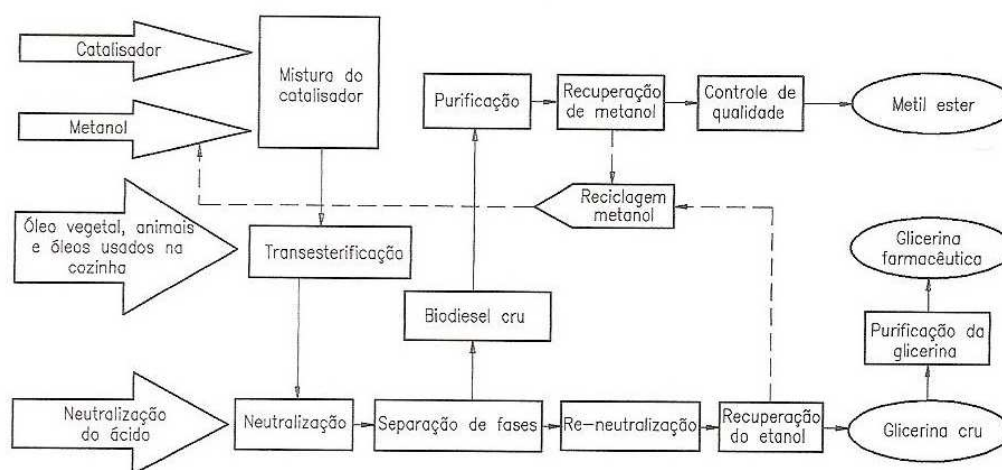
A conversão físico-química da biomassa, em especial de vegetais oleaginosos, consiste em um processo de prensagem ou compressão, seguido pela extração de óleos vegetais, para posterior modificação química em procedimentos chamados esterificação e transesterificação. (MME:EPE, 2007). A esterificação é uma reação química onde os óleos vegetais ou gordura animal, reagem com um álcool na presença de um catalisador, geralmente um ácido *Brönsted*¹⁴, tendo como produto final um biodiesel. Já o processo da transesterificação, consiste em uma

¹² Polissacarídeo que entrelaça microfibrilas de celulose em paredes de células vegetais.

¹³ Polímero, que dá à parede celular, em geral a parede secundária, rigidez e impermeabilidade à água.

¹⁴ Johannes Nicolaus Brönsted (1879-1947), químico holandês, que em conjunto com também químico e compatriota, Martin Lowry, desenvolveu a chamada teoria de Brönsted-Lowry. Segundo a teoria de Brönsted-Lowry, ácido é toda a espécie que cede íons H⁺, isto é, prótons. E por outro lado, base é toda espécie que recebe estes íons.

reação química dos óleos ou gorduras vegetais ou animais com o álcool comum (etanol) ou metanol, na presença de um catalisador (base ou ácido de *Brönsted*). O produto deste processo, da mesma forma que na esterificação, é um biodiesel (BRITO, 2008). A Figura 4.4 mostra de forma simplificada o processo de produção do biodiesel.



Fonte: CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva, GÓMES, Eduardo Olivares. *BIOMASSA para energia*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

Figura 4.4 *Processo simplificado de produção do biodiesel.*

Desta forma, o biodiesel obtido no processo de conversão físico-química da biomassa, pode ser empregado em motores de ciclo diesel. A aplicação predominante para este combustível é na cadeia produtiva do transporte, entretanto, o biodiesel pode ser fonte energética para máquinas térmicas de ciclos termelétricos. (MME:EPE, 2007).

4.2.3 Conversão bioquímica

A conversão bioquímica da biomassa é caracterizada pelo uso de processos biológicos e bioquímicos de transformação da matéria-prima orgânica. Esses processos incluem a fermentação alcoólica da biomassa, a destilação, a hidrólise e por fim com maior destaque o procedimento de digestão anaeróbica da biomassa, quando a finalidade for a geração de energia elétrica (MME:EPE, 2007).

A fermentação alcoólica é um procedimento antigo e acompanha a história da humanidade a milhares de anos, podendo ser definida, de forma simplificada, como sendo a transformação biológica de um açúcar em etanol e gás carbônico. Essa transformação é possível graças à ação metabólica de organismos biológicos, sendo as leveduras um bom exemplo destes organismos. Atualmente a fermentação alcoólica é um processo maduro, comercialmente e

tecnologicamente, situação que dificulta consideravelmente ganhos significativos de eficiência ao processo. Ganhos incrementais podem advir de investimentos mais robustos em pesquisa e desenvolvimento, ou por substituição dos procedimentos atuais por métodos mais sofisticados, mas infelizmente nenhuma das duas tendências é verificada na atualidade (CORTEZ et al., 2008).

Já destilação é um processo complementar a fermentação alcoólica, sendo usado para alcançar padrões de qualidade e concentração de etanol, exigidos pela legislação do setor sucroalcooleiro. Ainda, é com a destilação do mosto açucarado da cana-de-açúcar, após a fermentação, que são eliminados diversos contaminantes desta mistura e são separados seus dois mais importantes componentes, o álcool etílico anidro combustível o álcool etílico hidratado combustível (CORTEZ et al., 2008).

Visando aumentar a eficiência dos processos de conversão bioquímica da biomassa, há atualmente, significativos esforços para viabilizar o uso de material lignocelulósico hidrolisado, na produção de etanol e outros bioprodutos de alto valor agregado. No estado tecnológico vigente há dois processos de hidrólise¹⁵ que podem ser aplicados: a hidrólise ácida, que possui baixos custos, mas que por outro lado tem como subproduto resíduos poluentes, que inibem a fermentação posterior; e a hidrólise enzimática, que é menos poluente, mas tem custos mais elevados. A hidrólise de biomassa no Brasil tem grande potencial para o seu aproveitamento, pois além de o país possuir grande disponibilidade de matéria-prima, ainda há a possibilidade da sua integração complementar aos processos usados em usinas de açúcar, destilarias e plantas de co-geração (CORTEZ et al., 2008).

Como citado anteriormente o destaque nos processos bioquímicos de conversão da biomassa é dado à biodigestão anaeróbica¹⁶, quando a finalidade é a obtenção de energia elétrica. Esse processo tem como resultado final uma mistura de gases, denominada biogás, composta principalmente de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), e em menores quantidades por gás sulfúrico (H_2S), nitrogênio (N_2) e hidrogênio (H_2) (CORTEZ et al., 2008). A composição volumétrica do metano no gás varia dependendo da matéria orgânica processada (MME:EPE, 2007). Esse método tem destaque, pois além de possibilitar que resíduos orgânicos urbanos sejam aproveitados na geração de energia, pode ainda ser implementado em áreas rurais para aproveitamento energético dos resíduos da atividade rural e da agroindústria. Ainda, um dos produtos finais da biodigestão é um efluente (líquido) rico em nitrogênio que é utilizado na fabricação de fertilizantes (CORTEZ et al., 2008). O processo é realizado em recipientes

¹⁵ Hidrólise é reação química de quebra de uma molécula na presença de água.

¹⁶ Uma reação química anaeróbica se dá na ausência de oxigênio.

(reatores) estanques chamados de biodigestores, aonde populações bacterianas degradam a de forma natural a matéria orgânica, desta forma, a tecnologia usada nos biodigestores é dependente do tipo de matéria-prima utilizada, sendo por fim, considerada uma tecnologia madura e bem estabelecida (MME:EPE, 2007).

4.3 TECNOLOGIAS APLICADAS À BIOMASSA PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Conforme explicitado anteriormente, a conversão energética da biomassa fornece diversas alternativas à geração de energia, seja por meio de combustão direta do material bio-orgânico, seja por processos de tratamento do composto orgânico, que tem como produtos finais combustíveis sólidos, combustíveis líquidos e em estado gasoso, conforme mostrado na Figura 4.1.

Para a geração de energia elétrica, as rotas tecnológicas que possuem melhores condições de aproveitamento, incluem: sistemas baseados em ciclos a vapor, que utilizam usualmente combustíveis sólidos; sistemas baseados em motores de combustão interna, externa e turbinas a gás, que requerem combustíveis líquidos ou gasosos (com determinadas especificações físico-químicas); e por fim sistemas que utilizam células de combustível (CORTEZ et al, 2008).

4.3.1 Sistemas de geração de energia baseados em ciclos a vapor

Os ciclos a vapor usados na geração termelétrica requerem a queima da biomassa visando produção de calor e sua utilização na geração de vapor. O combustível mais comumente utilizado nesse processo é a biomassa em seu estado sólido, podendo também ser utilizados combustíveis líquidos como a lixívia negra, subproduto do processo de extração da celulose na fabricação de papel. O vapor gerado neste processo é direcionado à expansão em turbinas a vapor, que acionam por sua vez geradores elétricos. Este processo é caracterizado por baixo rendimento e baixa capacidade de geração, que para termelétricas à biomassa tem valores típicos na ordem de 25 a 50 MW e em poucos casos valores entre 70-80 MW (CORTEZ et al., 2008). A relação custo-benefício e a viabilidade econômica, em sistemas de ciclo a vapor, são altamente influenciadas por fatores como a proximidade da planta de geração à fonte de biomassa, custos de transporte e manuseio, além dos teores de umidade do composto orgânico e tecnologias usadas na conversão energética da biomassa. (MME:EPE, 2007).

As tecnologias usadas para transformação da biomassa em vapor, com eficiência e dentro dos requisitos de pressão e temperatura esperados, variam de acordo com a finalidade de aproveitamento do vapor. Este pode ser aproveitado em processos industriais termodinâmicos (aquecimento e trabalho mecânico) e em processos de geração termoeletrica, sendo que o melhor rendimento e eficiência para os ciclos a vapor são alcançados com a combinação de ambos em unidades de co-geração.

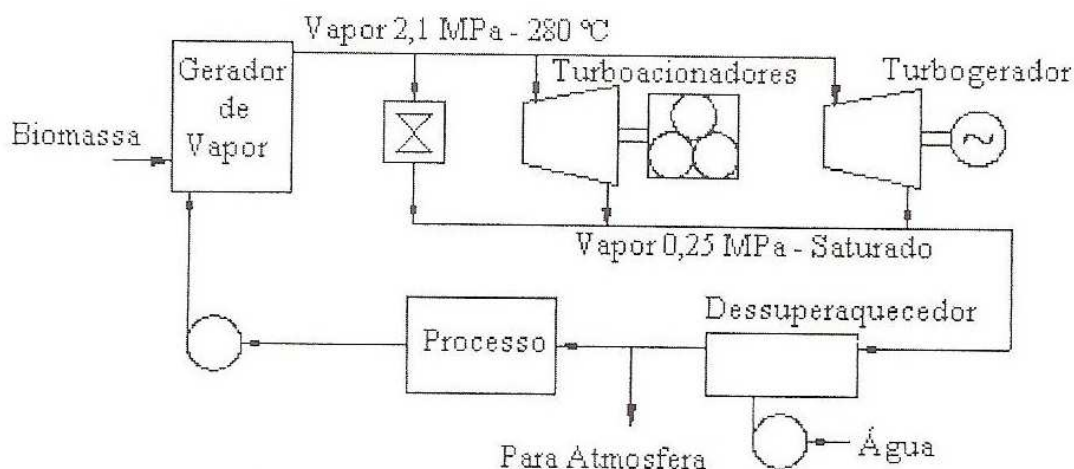
Em uma unidade de co-geração, é fundamental o conhecimento das necessidades energéticas do processo produtivo que utilizará a energia produzida pela planta, isso para a obtenção da adequada integração entre ambos. O conhecimento sobre as quantidades de trabalho mecânico, energia elétrica, calor ou frio fornecem os subsídios iniciais para determinação da configuração adequada ao processo e a especificação dos equipamentos utilizados na unidade de co-geração (MME:EPE, 2007).

Considerando as principais características das tecnologias empregadas até o momento, e dentre essas, aquelas que fazem parte do conjunto de inovações tecnológicas propostas para viabilizar melhora no aproveitamento de recursos energéticos da biomassa. As alternativas consideradas para geração de energia elétrica a partir biomassa em ciclos a vapor são: o ciclo com turbinas de contrapressão, empregado de forma integrada a processos produtivos através da co-geração; e o ciclo com turbinas de condensação e extração, que operam de isoladamente ou de forma integrada ao processo produtivo também por intermédio da co-geração. (TOLMASQUIM, 2004; MME:EPE, 2007).

Tradicionalmente o fornecimento de energia em processos produtivos que dispõem de biomassa combustível, é realizado por ciclos de co-geração *topping*¹⁷ a vapor de contrapressão. Nestes sistemas a queima da biomassa é efetuada diretamente em caldeiras, produzindo vapor que é utilizado no acionamento de turbinas para geração de energia elétrica, podendo posteriormente acionar turbinas de trabalho mecânico e ser utilizado no atendimento às necessidades térmicas do processo produtivo. As principais características deste tipo de sistema são o reduzido desempenho energético e baixa capacidade de produção. Além disso, neste tipo de arranjo a geração de energia elétrica é restringida pelo consumo de energia térmica do processo de produção ao qual está integrado, isso devido a ser no processo produtivo que o vapor é condensado voltando ao seu estado líquido, no fechamento do ciclo, sendo bombeado de volta à

¹⁷ Sistemas de co-geração onde o calor inicialmente é usado para geração de energia elétrica e posteriormente, aproveitado em processos térmicos. O processo inverso, onde o calor é aproveitado inicialmente em processos térmicos de alta temperatura e posteriormente para geração de energia elétrica é realizado em sistemas de co-geração *bottoming*.

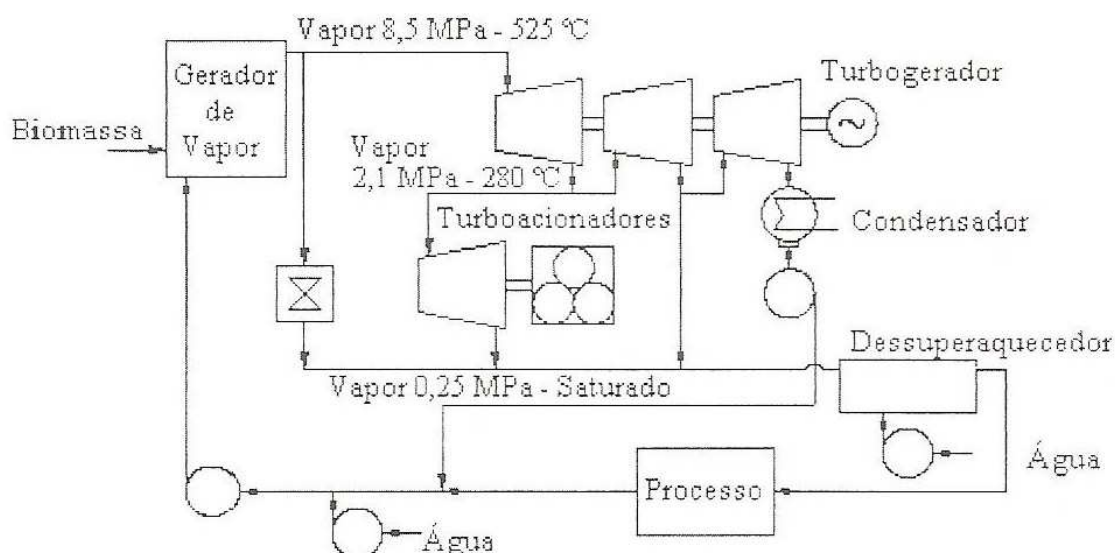
caldeira. A Figura 4.5 ilustra o arranjo de um ciclo tradicional de co-geração *topping* a vapor em contrapressão. (TOLMASQUIM, 2004; MME:EPE, 2007).



Fonte: TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (Coord.). *Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil*. Rio de Janeiro: Relume Dumará: CENERGIA, 2004.

Figura 4.5 *Ciclo tradicional de co-geração topping a vapor em contrapressão.*

Diferentemente, o ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração, tem o vapor ao final da realização de trabalho na turbina, totalmente ou parcialmente condensado em estrutura própria para tal disposta na exaustão da turbina, chamada de condensador. O vapor requerido ao processo produtivo, para acionamentos mecânicos e aquecimento, é extraído em um ponto intermediário da expansão do vapor ainda dentro da turbina. Com a adição do condensador, elevação da temperatura e pressão, possibilitadas por uso de caldeiras mais tecnologicamente desenvolvidas, esse tipo de ciclo tem ganhos significativos de eficiência e capacidade de geração. Isso quando comparados à ciclos a vapor com turbinas de contrapressão, fato que é amplificado quando o sistema é usado somente para geração de energia, ou seja não mais como um sistema de co-geração. A Figura 4.6 ilustra o arranjo de um ciclo de extração e condensação em co-geração *topping* (TOLMASQUIM, 2004; MME:EPE, 2007).



Fonte: TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (Coord.). *Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil*. Rio de Janeiro: Relume Dumará: CENERGIA, 2004.

Figura 4.6 *Ciclo a vapor de condensação e extração em co-geração topping.*

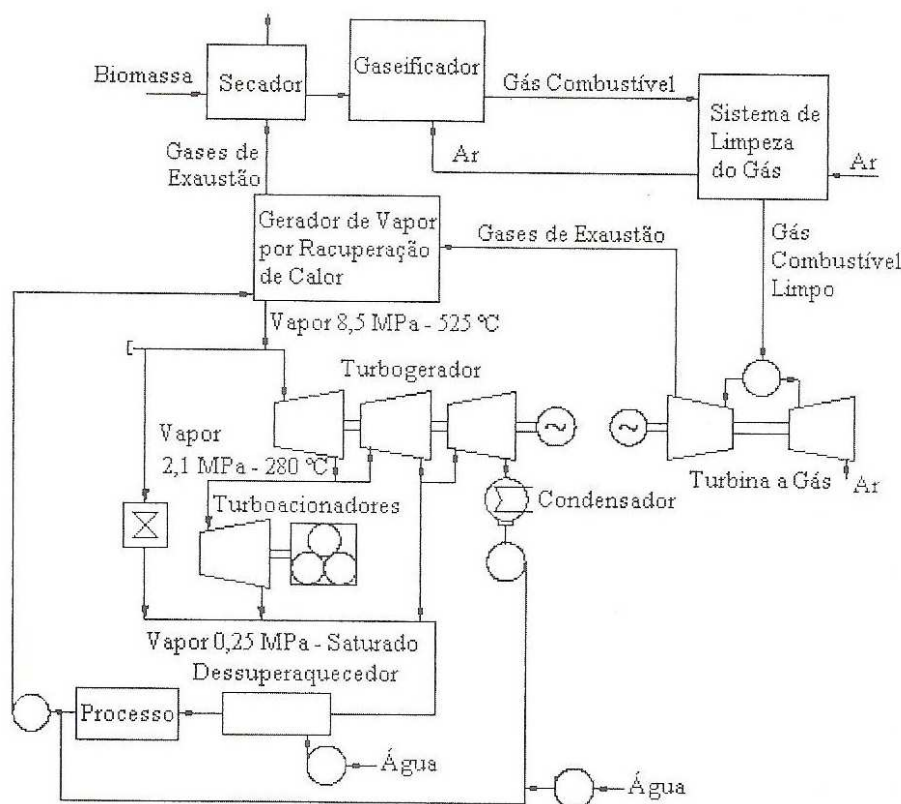
4.3.2 Sistemas baseados em processos de gaseificação da biomassa e uso de turbinas a gás

A rota tecnológica de gaseificação de combustíveis não é uma novidade da atualidade, este tipo de tecnologia já é conhecida desde meados do século XIX. Porém, uma vez que no início do século XX, a oferta de petróleo tornou-se ampla e a custos consideravelmente baixos, esta tecnologia ficou estagnada por um longo período. No princípio da utilização da gaseificação, eram usados o carvão mineral, o carvão vegetal e outros insumos no processo. Agora, no início do século XXI, o que se verifica é um impulso ao uso definitivo da biomassa para a gaseificação, muito por pressões ambientais sob as termelétricas a carvão mineral e muito pela necessidade vigente de diversificação da matriz energética no âmbito global. Ainda fatores como o desenvolvimento de sistemas modernos de controle, da fluido dinâmica e aprimoramentos na metalurgia, contribuem para a amadurecimento da tecnologia de fabricação de turbinas a gás, conferindo a estes sistemas confiabilidade e eficiência. Nas turbinas a gás de ciclo aberto (turbinas de combustão), a energia liberada pelo combustível é diretamente transferida ao fluido de trabalho, uma característica das máquinas de motrizes de combustão interna (TOLMASQUIM, 2004).

Mesmo sendo considerável o desenvolvimento tecnológico alcançado pelos sistemas baseados em gaseificação e turbinas a vapor, o verdadeiro ganho de produtividade e eficiência, é obtido

quando estes sistemas são integrados a processos produtivos em sistemas de co-geração denominados de ciclos combinados. Ciclos combinados estão entre as tecnologias empregadas à geração termelétrica de maior rendimento térmico, e quando são associados ao uso de biomassa combustível são conhecidos pela sigla BIG-CC (Biomass Integrated Gasification to Combined Cycles). Este tipo de instalação apesar de não ser considerada em estágio comercial conforme pode ser visto na figura 4.2, é o tipo de instalação a que credita maior potencial para uso em médio e longo prazo. Sendo que para instalações com capacidade de geração de 30 a 50 MW podem ser alcançadas eficiências de 45% para a geração de eletricidade no médio-longo prazo (CORTEZ et al, 2008).

Sistemas BIG-CC utilizam a combinação de turbinas a gás e a vapor (ciclo combinado), integrada a um gaseificador de biomassa. Assim, a energia térmica contida nos gases exauridos da turbina a gás, é aproveitada em uma caldeira de recuperação para geração de vapor usado como fluido de trabalho em uma turbina a vapor. Acréscimos de potência da ordem de, 50% da potência da turbina a gás são alcançados em ciclos combinados e a eficiência global alcança patamares de 50 a 60% em ciclos combinados comerciais. A figura 4.7 ilustra o arranjo de um sistema BIG-CC (TOLMASQUIN, 2004).



Fonte: TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (Coord.). *Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil*. Rio de Janeiro: Relume Dumará: CENERGIA, 2004.

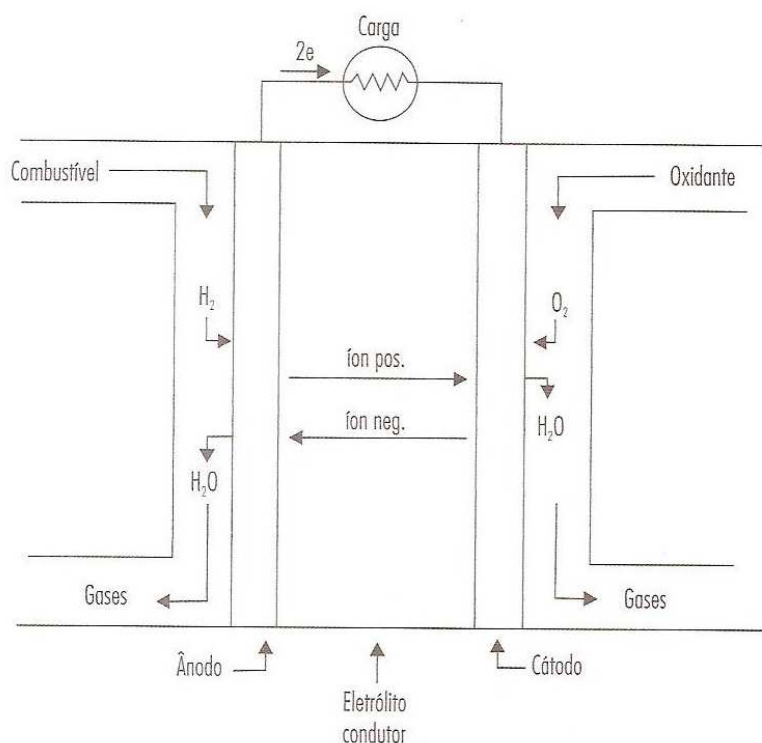
Figura 4.7 Ciclo BIG-CC em co-geração topping.

4.3.3 Outras rotas tecnológicas para o aproveitamento da biomassa na geração de energia elétrica

Alem dos ciclos a vapor, que apresentam segundo a Figura 4.2 as melhores condições de viabilidade econômica e maturidade tecnologia na atualidade, e dos sistemas baseados em gaseificação e turbinas a vapor, que da mesma forma segundo a Figura 4.2 apresentam as melhores perspectivas sobre o uso da biomassa no longo prazo. Existem outras rotas tecnológicas que apresentam características interessantes sobre o uso da biomassa para geração termelétrica, isso quando são considerados sistemas de menor porte quando comparados aos dois primeiros já citados.

Motores de combustão interna (MCI) integrados a geradores elétricos, utilizando biomassa combustível advinda de processos de conversão energética, como a gaseificação e a pirólise, são rotas tecnológicas com boas condições comerciais para instalações de pequeno porte. Para o caso da gaseificação as potências alcançadas na geração elétrica são, em sua maioria, da ordem de 150 kW, com grande potencial para uso desse sistema em áreas isoladas com grande disponibilidade de biomassa. Já no caso da geração de eletricidade, com o uso de MCI alimentado por combustíveis líquidos obtidos da pirólise de biomassa, estudos de viabilidade indicam um nicho de mercado para aproveitamentos com capacidade de geração de 5 a 25MW. Com a vantagem comparativa de ser possível desvincular a produção de biomassa da produção de eletricidade, devido à facilidade de transporte do combustível líquido obtido no processo de pirólise (CORTEZ et al., 2008).

Outra rota tecnológica aplicada à biomassa para obtenção de eletricidade é o uso de células de combustível associadas ao processo de gaseificação da biomassa. O funcionamento das células de combustível é baseado nos princípios de conversão eletroquímica de energia. Nestes sistemas um ânodo alimentado por um combustível, tipicamente hidrogênio (H_2), transfere íons positivos a um cátodo alimentado por um oxidante, tipicamente o oxigênio (O_2), que por sua vez transfere íons negativos ao ânodo através de um eletrólito, conforme ilustrado na Figura 4.8. Diferentemente de uma bateria, não há reserva de energia em uma célula de combustível, devendo haver um fluxo constante de combustível e oxidante no ânodo e cátodo, respectivamente (CORTEZ et al., 2008).



Fonte: CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva, GÓMES, Eduardo Olivares. *BIOMASSA para energia*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

Figura 4.8 Representação esquemática de uma célula combustível.

Além do hidrogênio e oxigênio, outros compostos podem ser utilizados como combustível e oxidante, na composição de células de combustível. Por exemplo, o metano (CH_4) pode ser usado como combustível em condições de temperatura adequadas e com a escolha certa de compostos para comporem o ânodo. Este tipo de característica é o que possibilita a integração de processos de gaseificação da biomassa à tecnologia de produção de energia elétrica por intermédio das células de combustível. Em síntese sistemas híbridos que integram células de combustível de alta temperatura com ciclos combinados de turbinas a gás, parecem ser a melhor alternativa para geração de eletricidade no longo prazo. Há limitantes a essa tecnologia na atualidade, devido aos altos custos de viabilização e riscos inerentes ao processo (CORTEZ et al., 2008).

Por fim, há uma via tecnologia para geração de energia elétrica a partir da biomassa, que merece ser citada: a utilização de motores de combustão externa, do tipo *stirling*¹⁸, aproveitando a combustão direta da biomassa. Isso quando a geração termelétrica é considerada para

¹⁸ Robert Stirling, reverendo escocês, patenteou em 1816 o ciclo de Stirling com um motor de combustão externa, que foi o fim de muitas tentativas de simplificar o motor a vapor.

localidades isoladas e com disponibilidade de biomassa para este fim. Motores *Stirling*, têm seu princípio de funcionamento baseado em um ciclo fechado, em que o gás de trabalho é mantido dentro de um cilindro e o calor é adicionado e removido do espaço de trabalho por intermédio de grandes trocadores de calor (fato que os impedem de serem utilizados em automóveis). Protótipos recentes alcançaram níveis de eficiência de 30 a 45%, bem maiores que os níveis de eficiência de motores de combustão interna convencionais. O fato de estes motores serem de combustão externa, possibilita a queima da biomassa em estado sólido. Em projetos desenvolvidos na Europa e também nos Estados Unidos, foram construídas unidades geradoras de pequeno porte com capacidade de geração de energia elétrica de 30 a 150 kW.

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram apresentadas neste capítulo, as principais rotas tecnológicas para a obtenção de energia elétrica a partir da biomassa e um breve estudo do estado da arte para cada uma delas. A apresentação teve foco nas tecnologias comercialmente aplicáveis na atualidade e em rotas tecnológicas que apesar de estarem em fase de pesquisa e desenvolvimento apresentam boas perspectivas para o futuro.

Contudo, no caso do Brasil, as perspectivas para o aprimoramento tecnológico da geração termelétrica a partir da biomassa, são muito boas. Atualmente no país existem em funcionamento 378 termelétricas movidas à biomassa, muitas delas operando em regimes de co-geração. E ainda há previsão de implantação de 86 novas plantas movidas a biomassa até 2012, com investimentos da ordem de US\$ 17 bilhões. (ANEEL, 2009).

Todo esse volume de investimento e unidades geradoras em funcionamento favorecem o crescimento da economia de escala e aprendizado em desenvolvimento e produção de tecnologia. Assim, cada vez mais o uso da biomassa como fonte de energia para eletricidade torna-se competitiva comercialmente e por fim acaba recebendo novos investimentos.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

5.1 ASPECTOS GERAIS

Este trabalho final de conclusão de curso apresenta uma avaliação quantitativa e qualitativa das fontes de biomassa que apresentam viabilidade econômica nos dias atuais e que, no futuro, serão fontes potenciais na geração de energia elétrica no Brasil. Foi detalhado o histórico recente do crescimento da demanda e do consumo de energia elétrica no Brasil, mostrando suas principais fontes. Foram apresentados aspectos gerais da matriz de energia elétrica nacional, citando suas principais fontes, potências geradas, combustíveis utilizados, entre outras informações. Entrou-se em detalhes para qualificar as principais fontes de biomassa no Brasil, avaliando suas produções e potenciais energéticos, além de se apresentarem as rotas tecnológicas de geração que apresentam um estágio de maturidade aceitável para promoção de investimentos em aproveitamentos energéticos.

O capítulo 2 apresenta um resumo da utilização da biomassa como fonte energética e posteriormente como fonte de geração de energia elétrica, no mundo e no Brasil. É mostrada a relação entre o crescimento econômico do país e o crescimento na demanda por energia elétrica, o que implica constantes investimentos em parques de geração para suprir esse aumento. São apresentadas as fontes de biomassa mais utilizadas e é comentado sobre outras menos utilizadas, mas que também podem ser aproveitadas para geração de energia.

O capítulo 3 apresenta detalhes das fontes de biomassa que, atualmente e num futuro próximo, possuem características que as tornam economicamente viáveis na utilização como combustível para geração de energia elétrica. São explorados detalhes como quantidade de biomassa gerada por área, quantidade de resíduos gerada pelas principais culturas agrícolas do Brasil, quantidade de rejeitos produzidos por animais, estações de tratamento de esgoto, aterros sanitários, entre outras. São apresentados também, os poderes caloríficos dos produtos, quantidade bruta de energia disponível no país, equiparação com outras fontes de energia como a tonelada equivalente de petróleo e é avaliada, para fins de análise econômica, a conversão destes produtos em energia elétrica.

De forma geral, o capítulo 4 apresenta as principais rotas tecnológicas para o uso da biomassa como fonte de energia elétrica. Neste capítulo, deu-se o foco nas mais promissoras vias tecnológicas para este fim, representadas pelos ciclos a vapor, processos de gaseificação aliados ao uso de turbinas a gás e outras tecnologias, como: uso de motores de combustão interna e externa e células a combustível.

5.2 CONCLUSÕES E CONTRIBUIÇÕES

As diversas avaliações e estimativas feitas neste trabalho foram feitas com o intuito de demonstrar a importância da biomassa como potencial fonte de geração de energia elétrica no Brasil. Apesar de já existirem processos maduros, em termos tecnológicos, e comercialmente disponíveis para o aproveitamento energético da biomassa, um grande empecilho para o aumento da exploração deste tipo de combustível são os altos investimentos necessários na planta de geração. Entretanto, em vários casos, o uso da biomassa na geração de energia elétrica é viável do ponto de vista econômico e deve ser buscado.

O setor florestal é fortemente explorado no país e apresenta uma cadeia complexa no aproveitamento da madeira. A extração, o beneficiamento e o processamento da madeira, produzem, nos seus 3 estágios, um enorme volume de resíduos, que muitas vezes não tem um destino correto, sendo por vezes descartados em locais inadequados. O aproveitamento desses resíduos na geração de energia elétrica propicia um destino útil, diminuindo o impacto ambiental gerado. A utilização da madeira pelo setor de celulose e papel gera resíduos, como o licor negro, que possuem um considerável nível de toxicidade. O aproveitamento do licor negro em processos de co-geração dentro de usinas de papel e celulose permite a reciclagem da quase totalidade do licor, promovendo uma destinação ambientalmente correta e economia de energia em processos internos.

O Brasil apresenta um setor agrícola que está entre os maiores produtores mundiais. As altas safras das culturas no país produzem uma quantidade enorme de resíduos, seja no processo de colheita ou nos processos de beneficiamento. A cana-de-açúcar já é utilizada, por meio do seu bagaço, como combustível na geração termelétrica de energia. Entretanto, outras culturas apresentam resíduos com poderes caloríficos e volumes de geração atrativos, sendo necessária a viabilização da captação e fornecimento contínuo próximo a plantas de geração. Em alguns casos, são necessárias pequenas adaptações nos processos de colheita, o que possibilitaria a reunião dos resíduos decorrentes dos processos de colheita. Outra possibilidade que vem despertando interesse são as culturas dedicadas à geração de energia elétrica. O capim-elefante está sendo pesquisado e desenvolvido com o intuito de criar *plantações energéticas*, exclusivas para serem utilizadas por centrais termelétricas. O Brasil apresenta uma dimensão territorial favorável a este tipo de aproveitamento, o que pode permitir uma diversificação na matriz de geração elétrica.

Outras fontes que merecem estudos são os rejeitos urbanos e industriais, sólidos e líquidos. Os aterros sanitários podem ser transformados em *aterros energéticos*, permitindo a produção do

biogás e provendo sua utilização como combustível na geração de eletricidade. Além de gerar energia, parte do lixo será reciclada e outra parte poderá ser utilizada como fertilizante, ao final do processo de geração do biogás. Os rejeitos industriais também podem ser utilizados na produção do biogás. Entretanto, neste caso, deverá ser feita uma análise de viabilidade econômica detalhada, para permitir uma avaliação da quantidade de biogás gerado e se é vantajoso para a empresa gerar sua própria energia elétrica. Em muitos casos, órgãos ambientais impõem obrigações de reciclagem ou destinação correta para estes rejeitos, não permitindo o descarte inadequado no meio ambiente. Nestes casos, investimentos em aproveitamento energético pode ser uma solução para a destinação dos rejeitos, diminuindo o impacto ambiental causado pela empresa e gerando energia para processos internos.

Assim, o uso da biomassa como fonte de energia, no curto prazo, encontrará melhores condições de ser desenvolvido em nichos específicos, que apresentam características como fornecimento contínuo de biomassa, busca por destinação mais adequada para rejeitos produzidos pelas empresas etc. A análise econômica de custos de insumos, custos de produção, custos da biomassa, custos de transporte, análise dos custos de implementação das plantas geradoras termelétricas, retorno dos investimentos, entre vários outros, precisam ser feitos de maneira detalhada, para cada caso de aproveitamento, sendo necessária uma análise criteriosa para saber a rentabilidade dos investimentos.

No médio e no longo prazos, as melhores perspectivas são para uso da rota tecnológica que emprega a gaseificação da biomassa aliada ao uso de turbinas a gás, principalmente em processos baseados na co-geração em ciclos combinados, devido aos altos índices de rendimento e eficiência energética alcançados no ciclo global. Porém, esta perspectiva somente é procedente se forem verificadas as devidas ações institucionais de incentivo ao uso desta tecnologia e também se sua utilização for disseminada a tal ponto que fatores como economia de escala e aprendizado no uso da técnica favoreçam a viabilização econômica dos empreendimentos baseados nessa via tecnológica. Aqui deve ser dado novamente um destaque ao Brasil onde, principalmente no setor sucroalcooleiro, florescem empreendimentos para geração de eletricidade por intermédio da biomassa, e o setor tem fortes incentivos governamentais.

A expressiva oferta de biomassa como recurso energético no Brasil está essencialmente vinculada a sistemas integrados de produção agrícola, agroindustrial e silvicultural. O Brasil é um país que já apresenta uma produção de biomassa com enorme potencial de aproveitamento energético. As condições naturais e geográficas favoráveis, aliadas à grande quantidade de terra agricultável com características adequadas de solo e condições climáticas, fazem do Brasil um

dos países que reúne o maior quantitativo de vantagens comparativas para liderar a agricultura de energia. As grandes agroindústrias necessitam de eletricidade e vapor para seus processos e se sistemas de co-geração fossem implementados, utilizando os resíduos gerados na própria agroindústria, uma parcela da demanda por eletricidade poderia ser suprida.

Entretanto, alguns fatores devem ser observados na utilização da biomassa como combustível. Os resíduos agrícolas, compreendidos pelo material resultante das colheitas, são descartados diretamente nas lavouras. A retirada destes resíduos das lavouras deve ser feita de modo racional, pois quando permanecem na zona de plantio exercem importante papel agrícola, contribuindo para proteção do solo, retendo umidade, evitando a erosão e restaurando os nutrientes que foram extraídos pelas plantas. O uso energético dos resíduos poderá competir, no futuro, com outros usos, como o preparo de cama para criação animais, adubação orgânica, controle de erosão, alimentação de animais etc. Também será necessário consolidar o conceito de resíduo sob a ótica da sustentabilidade da exploração, ou seja, não retirar do local de produção da biomassa excesso de matéria orgânica, que venha a depauperar o solo e prejudicar futuras explorações.

5.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Muitos estudos importantes ainda devem ser realizados para possibilitar uma avaliação energética e econômica mais precisa. Dessa forma, apresentam-se recomendações para possíveis trabalhos futuros.

- 1) Aprimorar a quantificação das várias fontes de biomassa disponíveis no Brasil.
- 2) Avaliar as fontes de biomassa individualmente, analisando a capacidade de fornecimento de biomassa próximo a unidades estratégicas de geração.
- 3) Avaliar as fontes de biomassa individualmente, analisando a rota tecnológica de aproveitamento mais adequada, verificando se existe a possibilidade do aumento da eficiência do processo de conversão.
- 4) Aprimorar a quantificação do lixo gerado nas principais capitais brasileiras e verificar a capacidade de geração de biogás pelos aterros sanitários. Desenvolver estudos para saber a qualidade do biogás produzido.
- 5) Buscar modelos de agroindústrias interessadas em simular um aproveitamento energético dos rejeitos produzidos nos seus processos.

REFERÊNCIAS

ABIMCI – Associação Brasileira da Indústria de Madeira Processada Mecanicamente. Disponível em <www.abimci.com.br>. Acesso em: maio de 2010.

ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. Disponível em <www.abraflor.org.br>. Acesso em: maio de 2010.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <www.aneel.gov.br>. Acesso em: junho de 2010.

_____. *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3ª ed. Brasília: ANEEL, 2009. Disponível em:<www.aneel.gov.br>. Acesso em: julho de 2010.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em: <www.anp.gov.br>. Acesso em: junho de 2010.

BALESTIERE, José Antônio Perrella. *Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor*. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2002.

BBER – Brasil Biomassa e Energia Renovável. Disponível em <www.scribd.com/doc/8270379/Brasil-Biomassa-e-Energia-Renovavel>. Acesso em: maio de 2010.

BIODIESELBR. Disponível em <www.biodieselbr.com/plantas/oleaginosas.htm>. Acesso em: Agosto de 2010.

BP – Beyond Petroleum. Disponível em: <www.bp.com/statisticalreview>. Acesso em: maio de 2010.

_____. *Statistical Review of World Energy June 2009*. Londres: BP, 2009. Disponível em:<www.bp.com/statisticalreview>. Acesso em: fevereiro de 2010.

BRACELPA – Associação Brasileira de Celulose e Papel Disponível em <www.bracelpa.org.br>. Acesso em: maio de 2010.

BRITO, Yariadner Costa. *Esterificação e Transesterificação em Presença de Complexos de Titânio e Zircônio*. 2008. 58 f. Dissertação (Mestrado em Química) Instituto de Química e Biotecnologia – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

CASTANÓN, N.J.B. *Biogás originado a partir dos rejeitos rurais*. Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia, Conversão e utilização. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em <www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: julho de 2010.

CEPEL – Centro de Pesquisa de Energia Elétrica. Disponível em <www.cepel.br>. Acesso em: julho de 2010.

CORTEZ, Luiz Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva, GÓMES, Eduardo Olivares. *Biomassa para energia*. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

ECODEBATE. Disponível em: <www.ecodebate.com.br>. Acesso em : julho de 2010.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Disponível em <www.embrapa.br>. Acesso em: junho de 2010.

EPE – Empresa de Pesquisas Energéticas. Disponível em <www.epe.gov.br>. Acesso em: julho de 2010.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em <www.fao.org.br>. Acesso em: maio de 2010.

FAO, 2006a, *Global Forest Resources Assessment 2005 – Progress Toward Sustainable Forest Management*, FAO Forestry Paper 147, Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO-UN, Rome.

FONSECA, F. E.; LUENGO, C. A.; SOLER, P. B.; *Torrefação de Biomassa: Características, Aplicações e Perspectivas*. São Paulo, 2000. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

GUARDABASSI, Patricia Maria. *Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento*. 2006. 123 f. Dissertação (Mestrado em Energia) Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

HASSUANI, S. J., LEAL, M. R. L. V., MACEDO, I. C., 2005, “Biomass Power Generation: Sugar Cane Bagasse and Trash”, Série Caminhos para Sustentabilidade, n. 01, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento / Centro de Tecnologia Canavieira – CTC, Piracicaba, Brazil.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em <www.ibge.gov.br>. Acesso em: agosto de 2010.

_____. *Produção Agrícola Municipal - Cereais, Leguminosas e Oleaginosas 2008*, Coordenação de Agropecuária - Diretoria de Pesquisas - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MP, Rio de Janeiro, Brasil. Acessado em: agosto de 2010.

IEA – International Energy Agency. Disponível em <www.iea.org>. Acesso em: junho de 2010a.

_____. *World Energy Outlook 2008*. França: IEA, 2008. Disponível em:<<http://www.worldenergyoutlook.org/>>

_____. *World Energy Outlook 2009*. França: IEA, 2009. Disponível em:<<http://www.worldenergyoutlook.org/>>

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Disponível em <www.ipeadata.gov.br>. Acesso em: junho de 2010.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Disponível em <www.ipt.br>. Acesso em: junho de 2010.

IRGA – Instituto Rio Grandense do Arroz. Disponível em <www.irga.rs.gov.br>. Acesso em: julho de 2010.

KONZEN, E.A. *Avaliação quantitativa e qualitativa dos dejetos de suínos em crescimento e terminação, manejados em forma líquida*, 1980. 56p. Dissertação de Mestrado, Universidade federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

KOOPMANS, A., KOPPEJAN, J., 1997, "Agricultural and Forest Residues - Generation, Utilization and Availability", In: *Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy*, pp. 6-10, Kuala Lumpur, Malaysia.

MAPA – Ministério da Agricultura e Pecuária. Disponível em <www.agricultura.gov.br>. Acesso em: agosto de 2010.

_____. *Dados Estatísticos – Culturas, baseado em Produção Agrícola Municipal e Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (dez/08) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE*, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/portal/page?_pageid=33,969696&_dad=portal&_schema=PORTAL> , acessado em julho de 2010.

MME – Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME, 2010. Disponível em:<www.mme.gov.br>. Acesso em: janeiro 2010a.

_____. *Balanço energético nacional (BEN) – 2009*. Brasília: MME, 2009. Disponível em:<www.mme.gov.br>. Acesso em: junho 2010a.

_____. *Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030)*. Brasília: MME, 2007. Disponível em:<www.mme.gov.br>. Acesso em: fevereiro 2010b.

NOGUEIRA, L. A. H., LORA, E. E., 2002, *Wood Energy: Principles and Applications*, Núcleo de Excelência em Geração Termoeletrica Distribuída – NEST, do Instituto de Engenharia Mecânica – IEM, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, disponível em <http://www.nest.efei.br/portugues/Downloads/Files/Capitulo_1F.pdf>. Acessado em: agosto de 2010.

OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L.P. *Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits. Energy Policy*. v 31, 2003.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. Disponível em <<http://site.sabesp.com.br>>. Acesso em: agosto de 2010.

SEVERINO, M. M. (2008). *Avaliação Técnico-Econômica de um sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia*. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD – 027/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p. Acesso em: Julho de 2010.

Sykué Bioenergia. Disponível em <www.sykue.com.br/energialimpa/index.php>. Acesso em: agosto de 2010.

TOLMASQUIM, Mauricio Tiomno (Coord.). *Alternativas energéticas sustentáveis no Brasil*. Rio de Janeiro: Relume Dumará: CENERGIA, 2004.

UNICA – União da Indústria de Cana de Açúcar. Disponível em <www.unica.com.br>. Acesso em: agosto de 2010.

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá. Disponível em <www.unifei.edu.br>. Acesso em: julho de 2010.

VICENTE, N.G. MAZZARELLA. 2007. *Jornada Madeira Energética - Capim Elefante com Fonte de Energia no Brasil: Realidade Atual e Expectativas*. IPT-BNDS – Rio de Janeiro, maio de 2007. P.Point.