



Ministério de Minas e Energia
Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Plano Nacional de Energia **2030**



2006 - 2007



Ministério de Minas e Energia
Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Plano Nacional de Energia 2030



2006 - 2007



Ministério das Minas e Energia – MME

Ministro

Silas Rondeau Cavalcante Silva
Nelson Jose Hubner Moreira (interino)

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Márcio Pereira Zimmermann

Diretor do Departamento de Planejamento Energético

Iran de Oliveira Pinto

Ministério das Minas e Energia – MME

Esplanada dos Ministérios Bloco U – 5º andar
70065-900 – Brasília – DF
Tel.: (55 61) 3319 5299 Fax : (55 61) 3319 5067
www.mme.gov.br



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa de Pesquisa Energética – EPE

Presidente

Maurício Tiomno Tolmasquim

Diretor de Estudos Econômicos e Energéticos

Amílcar Gonçalves Guerreiro

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

José Carlos de Miranda Farias

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Bioenergia

Maurício Tiomno Tolmasquim (interino)

Diretor de Gestão Corporativa

Ibanês César Cássel

Empresa de Pesquisa Energética – EPE

Sede: SAN – Quadra 1 – Bloco “B” – 1º andar | 70051-903
Brasília – DF
Escritório Central: Av. Rio Branco, 01 – 11º Andar 20090-003
Rio de Janeiro – RJ
Tel.: (55 21) 3512 3100 | Fax : (55 21) 3512 3199
www.epe.gov.br

Catálogo na Fonte
Divisão de Gestão de Documentos e Informação Bibliográfica

Brasil. Ministério de Minas e Energia.

Plano Nacional de Energia 2030 / Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . _ Brasília : MME : EPE, 2007.

12 v. : il.

Conteúdo: v. 1. Análise retrospectiva – v. 2. Projeções – v. 3. Geração hidrelétrica – v. 4. Geração termelétrica a partir de Petróleo e derivados – v. 5. Geração termelétrica a partir do gás natural – v. 6. Geração termelétrica a partir do carvão mineral – v. 7. Geração termonuclear – v. 8. Geração termelétrica a partir da biomassa – v. 9. Geração de energia elétrica a partir de outras fontes – v. 10. Combustíveis líquidos – v. 11. Eficiência energética – v. 12. Transmissão.

1. Energia elétrica – Brasil. 2. Fonte alternativa de energia. 3. Plano Nacional de Energia Elétrica. I. Empresa de Pesquisa Energética. II. Título.

CDU 621.3(81)“2030” : 338.28

Plano Nacional de Energia **2030**

Geração Termelétrica - Biomassa

Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético – SPE/MME

Coordenação Geral

Márcio Pereira Zimmermann

Coordenação Executiva

Francisco Romário Wojcicki

Iran de Oliveira Pinto

Paulo Altaur Pereira Costa

Departamento de Planejamento Energético

Diretor

Iran de Oliveira Pinto

Consultores

Albert Cordeiro Geber de Melo – CEPEL

Altino Ventura Filho – MME

Antônio Carlos Tatit Holtz – MME

Maria Elvira Piñeiro Maceira – CEPEL

Equipe Técnica

Adriano Jerônimo da Silva

Andrea Figueiredo

Artur Costa Steiner

Christiany Salgado Faria

Eduardo de Freitas Madeira

Fernando Colli Munhoz

Fernando José Ramos Mello

Flávia Xavier Cirilo de Sá

Gilberto Hollauer

Jarbas Raimundo de Aldano Matos

João Antônio Moreira Patusco

John Denys Cadman

José Luiz Scavassa

Osmar Ferreira do Nascimento

Renato Augusto Faria de Araújo

Sophia Andonios Spyridakis Pereira

Vanessa Virgínio de Araújo

Equipe de Apoio

Gilda Maria Leite da Fonseca

Leonardo Rangel de Melo Filardi

Maria Soares Correia

Maurílio Amaro de Souza Filho

Coordenação Editorial

Gabriela Pires Gomes de Sousa Costa

Equipe Editorial

Alex Weiler Magalhães

Ana Klea Sobreira de Moraes

Carlos Teixeira da Silva

Daniele de Oliveira Bandeira

Eduardo Gregório

Paulo Alfredo Perissin

Rafael Santiago de Carvalho

Departamento de Desenvolvimento Energético

Diretora

Laura Porto

Coordenação Geral

Alexandre Ramos

Augusto Machado

Ceres Cavalcanti

Consultor

Luis Antonio Duarte

Departamento de Outorgas de Concessões, Permissões e Autorizações

Diretor

Sidney do Lago Júnior

Equipe Técnica

Celso Luiz Fioravanti dos Santos

Dirceu Bonecker de Souza Lobo Júnior

Gilberto Aristeu Beltrame

Jefferson Chaves Boechat

José Carlos Vilela Ribeiro

Maurício de Oliveira Abi-chahin

Ticiane de Freitas Sousa

Willian Rimet Muniz

Impresso na Gráfica da Eletrobrás



Apresentação

O Plano Nacional de Energia - PNE 2030 tem como objetivo o planejamento de longo prazo do Setor Energético do país, orientando tendências e balizando as alternativas de expansão desse segmento nas próximas décadas.

O PNE é composto de uma série de estudos que buscam fornecer insumos para a formulação de políticas energéticas segundo uma perspectiva integrada dos recursos disponíveis. Estes estudos estão divididos em volumes temáticos cujo conjunto subsidiará a elaboração do relatório final do PNE.

Este volume, cujo tema é Biomassa, é resultado do conjunto de quatro notas técnicas, fruto de trabalhos contratados pelo Ministério de Minas e Energia (MME) e elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), empresa pública vinculada ao MME.

Na concepção do referido plano, bem como para os aperfeiçoamentos necessários e, sobretudo, para garantir os melhores resultados possíveis, foram realizadas no MME apresentações dos estudos preliminares através de seminários públicos, assegurando a efetiva participação dos agentes setoriais e da sociedade no processo de planejamento.

Foram realizados nove seminários cujo cronograma se vinculava ao estágio de desenvolvimento dos estudos temáticos do PNE 2030. O primeiro seminário ocorreu em abril de 2006 e o último em novembro do mesmo ano. O seminário sobre Biomassa ocorreu no dia 27 de abril de 2006, e as contribuições realizadas neste seminário foram, na medida de sua pertinência, incorporadas nos trabalhos desenvolvidos de que trata este volume.

O presente volume encontra-se dividido em três Notas Técnicas enumeradas a seguir:

1. Avaliação do potencial da biomassa como recurso energético;
2. Geração termelétrica a partir da biomassa: caracterização técnico-econômica;
3. Geração termelétrica a partir da biomassa: potencial de geração.
4. Geração termelétrica a partir da biomassa: avaliação dos impactos socioambientais.

A Nota Técnica “Avaliação do potencial da biomassa como recurso energético” tem como objetivo analisar a disponibilidade atual e futura de fontes nacionais de biomassa, levando-se em consideração os recursos e a produção deste energético.

A Nota Técnica “Geração termelétrica a partir da biomassa: caracterização técnico-econômica” é focado o aspecto técnico e econômico da geração termelétrica a partir da biomassa, tais como: características técnicas e operacionais de usinas, caracterização dos custos envolvidos na geração termelétrica e avaliação econômica da geração termelétrica a biomassa.

A Nota Técnica “Geração termelétrica a partir da biomassa: potencial de geração” tem por objetivo avaliar a participação das usinas de geração termelétrica utilizando a biomassa como recurso energético combustível para expansão do sistema nacional de geração de energia elétrica.

Finalizando este volume, a Nota Técnica “Geração termelétrica a partir da biomassa: avaliação dos impactos socioambientais” tem como objetivo descrever e quantificar os impactos ambientais das tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa.

Como auxílio à elaboração destas notas técnicas, que compõem um dos estudos da oferta de energia que subsidiarão a elaboração do PNE 2030, a EPE promoveu, no seu escritório central, uma série de reuniões temáticas entre os meses de fevereiro e março de 2006. Em cada reunião tomavam assento especialistas, estudiosos e profissionais reconhecidamente competentes em relação ao tema objeto da reunião. No dia 22 de fevereiro teve lugar o tema “Biomassa”, e foram convidados os senhores: Albert Cordeiro Geber de Melo – CEPEL; Luciano Basto Oliveira – COPPE/UFRJ e IVIG; Onório Kitayama – UNICA; Osvaldo Stella Martins – CENBIO; Pedro Villalobos; Carlos Roberto Silvestrin – COGEN. Os depoimentos e os esclarecimentos colhidos nessa reunião foram especialmente importantes, seja por sua relevância intrínseca, dada qualificação dos profissionais convidados, seja por sua atualidade.

Tal processo despendeu esforço de um grande número de profissionais, estudiosos e interessados no tema e, ainda que tais esforços cumpram com seu objetivo, como todo trabalho de natureza complexa, cíclica e, necessariamente, vinculada a um horizonte temporal, o PNE e seus estudos correlatos estão sujeitos a atualizações e aperfeiçoamentos, sendo necessário refazê-los periodicamente.

Assim, com a publicação deste volume, o Ministério de Minas e Energia busca apresentar à sociedade o resultado de estudos que constituem a gênese de um processo que culminará com a publicação do Plano Nacional de Energia – 2030, este que é uma das principais formas de materialização do planejamento energético de longo prazo brasileiro que, paulatinamente, caminha rumo a uma mais intensa e efetiva participação da sociedade em sua elaboração.





SUMÁRIO GERAL

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA BIOMASSA COMO RECURSO ENERGÉTICO	11
---	----

GERAÇÃO TERMELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA: CARACTERIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA.....	97
---	----

GERAÇÃO TERMELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA: POTENCIAL DE GERAÇÃO	145
--	-----

GERAÇÃO TERMELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA: AVALIAÇÃO DO IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS	195
---	-----

Participantes da Empresa de Pesquisa Energética – EPE

Coordenação Geral

Mauricio Tiomno Tolmasquim
Amílcar Guerreiro

Coordenação Executiva

Renato Pinto de Queiroz
Juarez Castrillon Lopes

Coordenação Técnica

Ricardo Gorini de Oliveira

Equipe Técnica

Vicente Correa Neto

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DA BIOMASSA COMO RECURSO ENERGÉTICO

SUMÁRIO

1.	Introdução	13
2.	Produção de biomassa no Brasil	14
2.1.	Principais culturas agrícolas brasileiras.....	15
2.1.1.	Soja	21
2.1.2.	Milho.....	23
2.1.3.	Arroz	26
2.1.4.	Cana-de-açúcar	28
2.2.	Produção florestal silvicultural e extrativa vegetal.....	31
2.2.1.	Eucalipto	38
2.2.2.	Pinus.....	39
3.	A produção de resíduos combustíveis da biomassa no Brasil	39
3.1.	Resíduos agrícolas.....	40
3.1.1.	Palha da soja	40
3.1.2.	Sabugo, colmo, folha e palha do milho	43
3.1.3.	Palha do arroz.....	46
3.1.4.	Folhas e ponteiros da cana-de-açúcar	49
3.2.	Resíduos agroindustriais.....	52
3.2.1.	Bagaço da cana-de-açúcar	53
3.2.2.	Casca do arroz.....	55
3.2.3.	Lixívia e resíduos de madeira.....	57
3.3.	Florestas plantadas.....	64
4.	Expansão da produção agrícola, agroindustrial e silvicultural no Brasil	71
4.1.	A disponibilidade de áreas agriculturáveis.....	72
4.2.	Expansão da produção agrícola.....	74
4.2.1.	Soja	76
4.2.2.	Milho.....	76
4.2.3.	Arroz	77
4.2.4.	Cana-de-açúcar	79
4.3.	Expansão da produção agroindustrial.....	80
4.3.1.	Açúcar	80
4.3.2.	Etanol	82
4.3.3.	Celulose.....	84
4.4.	Expansão da produção da silvicultura	86
4.5.	Consolidação da oferta de biomassa combustível pela produção agrícola, agroindustrial e silvicultural no Brasil.....	88
5.	Conclusões	91
6.	Referências bibliográficas	93
6.1.	Reuniões temáticas na EPE: Outras fontes renováveis.....	93
6.2.	Documentos consultados	93

1. Introdução

O Brasil é um país que reúne inúmeras vantagens comparativas que o tornam capaz de atuar como líder no mercado mundial de produtos agrícolas, agroindustriais e silviculturas, em particular aqueles dedicados a energia. Destacam-se as áreas disponíveis para a agricultura com impactos ambientais circunscritos ao socialmente aceitos, a possibilidade de múltiplos cultivos ao longo de um único ano, a intensa radiação solar recebida, além da diversidade de clima, exuberância de biodiversidade e a existência de desenvolvimento científico e tecnológico agrícola específico da zona tropical, associado à uma agroindústria sólida e produtiva.

O Brasil apresenta um grande potencial de crescimento para sua produção agrícola. Cerca de 30% do valor da produção agrícola de 2004 deriva da produção de soja, que vem apresentando grande crescimento a partir da década de 1980, sendo hoje a cultura com maior área plantada do Brasil. 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. A cana-de-açúcar é a segunda cultura, em termos de valor de produção, e vem ganhando novos investimentos nos últimos anos, com o objetivo de suprir a demanda por álcool no mercado interno, devido à criação dos carros bicom bustíveis e atender às exportações, que aumentaram nos últimos anos. Outros produtos, como o milho e o arroz, têm sua importância por constituir elemento básico da alimentação humana e para a produção de rações, que abastecem os setores da avicultura e suinocultura.

A biomassa é classificada como recurso energético nas categorias de biomassa energética florestal, seu produtos e subprodutos ou resíduos; biomassa energética agrícola, as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e rejeitos urbanos.

A disponibilidade e as características de produção e acesso de cada um destes recursos são muito diferentes. As estimativas da disponibilidade para resíduos de madeira e resíduos florestais são altamente incertas e dependem das circunstâncias locais. A disponibilidade de resíduos em unidades agroindustriais de moagem e de resíduos agrícolas pode ser estimada mais precisamente, e, no caso dos resíduos agrícolas, dos padrões de colheita e de limitações ambientais. As estimativas são muito difíceis de fazer, pois não houve até o momento uma preocupação mais firme na sua quantificação devido ao desinteresse por seu uso.

A biomassa para fins energéticos em geral, e também particularmente como fonte para geração de energia elétrica, está entre as fontes renováveis com maiores possibilidades em termos de natureza, origem, tecnologia de conversão e produtos energéticos, exigindo para o alcance dos objetivos de quantificação da oferta deste relatório que se busque valores para os resíduos agrícolas das principais culturas do país, tenham ou não, alguma destinação energética estabelecida.

Considerando o contexto em que se insere esta avaliação do potencial da biomassa como recurso energético, cujo papel é subsidiar um plano de energia com foco na geração de energia elétrica para o Brasil, concentraremos nossa atenção nas fontes de biomassa de escala compatível com a integração ao sistema elétrico e nas culturas que apresentam condições atuais e perspectivas futuras de escala no país, considerando tanto as culturas alimentares e seus resíduos, as culturas energéticas e a produção silvicultural, bem como os resíduos agroindustriais produzidos.

2. Produção de biomassa no Brasil

No contexto em que se insere esta avaliação do potencial da biomassa como recurso energético, considerando recursos, oferta e usos, cujo foco é a disponibilização de biomassa combustível para a geração termelétrica, para subsidiar um plano de energia com foco na geração de energia elétrica para o Brasil, concentraremos nossa atenção nas fontes de biomassa de escala compatível com a integração ao sistema elétrico e nas culturas que apresentam representatividade na produção agrícola do país, considerando para isso, o aspecto de maior significância, que neste caso é a fonte de biomassa, cuja disponibilidade é um fator primordial, seja como resíduo ou produção dedicada.

Neste sentido, dedicamos este item inicial à identificação e quantificação das principais culturas produzidas no país, sejam agrícolas, extrativas ou silviculturais, apresentando os totais relativos às variáveis de área plantada, quantidade produzida e rendimento médio da produção, apresentados segundo as Unidades da Federação, as Regiões e o País, usando como referência as bases de dados estatísticos dos principais organismos dedicados à tarefa de quantificação destes parâmetros no Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, do Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MP, com as publicações *Produção Agrícola Municipal - Cereais, Leguminosas e Oleaginosas*; *Produção Agrícola Municipal - Culturas Temporárias e Permanentes*; *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura*, e a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, com as pesquisas e série históricas de safras, do período de 1976/77 a 2005/06.

Na pesquisa de Produção Agrícola Municipal - Cereais, Leguminosas e Oleaginosas / PAM-CLO, são contabilizados os produtos comumente chamados “grãos”, que têm grande importância econômica e social e, muitos deles, são commodities. Os produtos deste grupo destacam-se por seu uso na produção de óleos com fins alimentícios e na geração de energia; atendem também às indústrias alimentares e de ração; e alguns são importantes componentes da cesta básica do brasileiro (IBGE, 2006).

A pesquisa de Produção Agrícola Municipal - Culturas Temporárias e Permanentes / PAM-CTP investiga um elenco de mais de 60 produtos, que são divididos em produtos de lavouras temporárias e produtos de lavouras permanentes. Dentre eles, encontram-se aqueles de grande importância econômica, muitos sendo commodities. Outros têm uma relevância maior sob o ponto de vista social, pois compõem a cesta básica do brasileiro ou movimentam economias locais, dando sustento a famílias de baixa renda (IBGE, 2005b).

Algumas espécies cultivadas comercialmente são obtidas em áreas de vegetação espontânea, ou seja, através da extração vegetal, como ocorre com a seringueira (látex de hévea), com a erva-mate e com o palmito, cujas produções oriundas de cultivo são investigadas e encontram-se na publicação *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura - PEVS*, que divulga os dados para Brasil, Grandes Regiões e Unidades da Federação, com informações referentes à quantidade da produção decorrentes dos processos de exploração dos recursos naturais (denominados de extrativismo vegetal), bem como da exploração de maciços florestais plantados (silvicultura).

O extrativismo vegetal é o processo de exploração dos recursos vegetais nativos que compreende a coleta ou apanha de produtos como madeiras, látex, sementes, fibras, frutos e raízes, entre outros, de forma racional, permitindo a obtenção de produções sustentadas ao longo do tempo, ou de modo primitivo e itinerante, possibilitando, geralmente, apenas uma única produção.

A silvicultura é a atividade que se ocupa do estabelecimento, desenvolvimento e da reprodução de florestas, visando múltiplas aplicações, tais como: produção de madeira, carvoejamento, produção de resinas, proteção ambiental, etc. (IBGE, 2005a).

■ 2.1. Principais culturas agrícolas brasileiras

As principais culturas agrícolas do Brasil apresentam como destaque entre os cereais, leguminosas e oleaginosas, a soja, o milho e o arroz, respondendo por quase 90 % da produção física e, aproximadamente, 80 % da área utilizada para cultivo dos chamados “grãos”, como pode ser verificado pelos dados apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Série histórica de produção por safras – grãos, leguminosas e oleaginosas
Brasil (10³ t/ano)

Produto	1980/81	1989/90	1999/2000	2003/04	2004/05 ⁽¹⁾ Preliminar	2005/06 ⁽²⁾ Previsão
Soja	14.887	20.101	32.345	49.793	51.452	53.366
Milho	19.435	22.258	31.641	42.129	35.007	41.287
Arroz	9.638	7.968	11.423	12.829	13.227	11.522
Trigo	2.729	3.304	1.658	5.851	5.846	4.873
Feijão	1.895	2.346	3.098	2.978	3.046	3.536
Algodão	1.106	1.229	1.187	2.099	2.129	1.670
Sorgo	182	343	781	2.014	1.568	1.421
Aveia	76	256	194	411	433	517
Cevada	85	210	319	367	387	399
Triticale ⁽³⁾	-	-	-	229	221	306
Amendoim	525	144	172	217	302	276
Mamona	302	118	107	107	210	103
Girassol	-	-	97	86	68	97
Centeio	11	5	7	4	3	7
Brasil	50.871	58.280	83.030	119.114	113.898	119.380

Notas: (1) Dados Preliminares: sujeitos a mudança.

(2) Dados Estimados: sujeitos a mudança.

(3) Híbrido de centeio e trigo.

Fonte: CONAB, 2006a.

Entre as culturas temporárias e permanentes, destacam-se a cana-de-açúcar, a mandioca e a laranja, respondendo por, aproximadamente, 95% da produção física, sendo que a cana-de-açúcar sozinha é responsável por mais de 86% do total produzido. Em termos de área utilizada para cultivo de lavouras temporárias e permanentes, estes três produtos ocupam mais de 60% da área total ocupada por este tipo de cultura, e a cana-de-açúcar ocupa mais de 40% da área total, como verificado pelos dados apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 2 – Série histórica da área plantada por safras – grãos, leguminosas e oleaginosas
Brasil (10³ ha)

Produto	1980/81	1989/90	1999/2000	2003/04	2004/05 ⁽¹⁾ Preliminar	2005/06 ⁽²⁾ Previsão
Soja	8.756	11.551	13.508	21.376	23.301	22.212
Milho	11.670	12.093	12.758	12.783	12.208	12.911
Feijão	5.068	5.047	4.309	4.287	3.949	4.190
Arroz	6.472	4.180	3.678	3.654	3.916	2.997
Trigo	3.105	3.283	1.468	2.464	2.756	2.362
Algodão	4.071	1.964	824	1.100	1.179	844
Sorgo	79	191	543	898	789	708
Aveia	76	196	222	299	326	357
Mamona	440	242	195	166	215	152
Cevada	74	105	151	137	140	143
Triticale ⁽³⁾	-	-	-	101	106	131
Amendoim	337	90	104	98	130	117
Girassol	-	-	58	55	50	69
Centeio	12	4	7	3	3	4
Brasil	40.158	38.945	37.824	47.423	49.068	47.198

Notas: (1) Dados preliminares sujeitos a mudança.

(2) Dados estimados sujeitos a mudança.

(3) Híbrido de centeio e trigo.

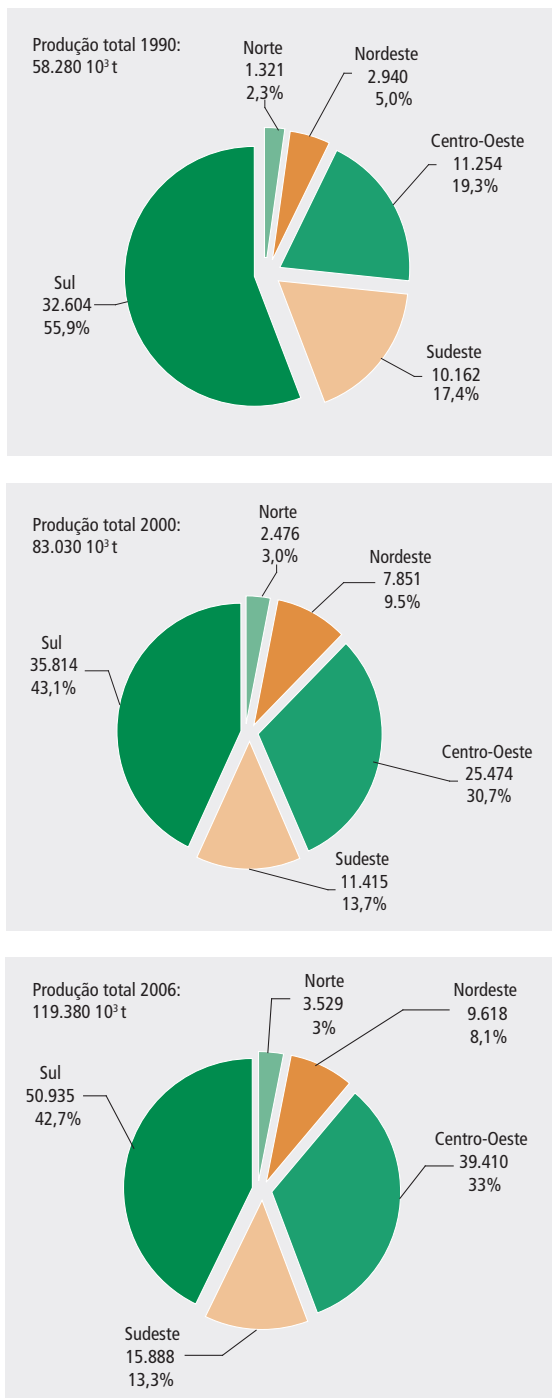
Fonte: CONAB, 2006a.

A produção brasileira de cereais, leguminosas e oleaginosas de 2005 foi de 113,90 milhões de toneladas, 4,4% menor que 2004 e 7,5% menor que 2003, ano da maior safra nacional, quando a produção alcançou 123,17 milhões de toneladas. As condições climáticas não favoreceram a agricultura nos últimos dois anos. A falta de chuvas regulares durante o desenvolvimento das culturas provocou sérios prejuízos aos agricultores. Além disso, os agricultores têm enfrentado dificuldades para renegociar suas dívidas, escoar a produção, conseguir crédito e melhores preços (IBGE, 2006).

Em 2005, a área plantada de cereais, leguminosas e oleaginosas aumentou em, aproximadamente, 1,645 milhões de hectares, crescendo 3,5%, reflexo, principalmente, da expansão da área de soja que vem ocorrendo nos últimos anos nas áreas consideradas fronteiras agrícolas, localizadas, de maneira geral, no cerrado brasileiro, e que foi de 9,0% em relação à área plantada em 2004. A soja também vem sendo plantada em áreas onde tradicionalmente eram cultivadas outras culturas. Entre os produtos que mais diminuíram sua área plantada, encontram-se o milho e o feijão, que são culturas de verão como a soja. Já o trigo, cultura de inverno, igualmente teve redução de área.

Com pode ser visto na Figura 1, entre 1990 e a estimativa para 2006, a produção física de cereais, leguminosas e oleaginosas aumentou 97,45 milhões de toneladas, uma expansão de 105%. Também se verifica uma importante alteração na participação das regiões produtoras, havendo um deslocamento das regiões Sul e Sudeste para a região Centro-Oeste.

Figura 1 - Evolução da produção das principais culturas – grãos, leguminosas e oleaginosas⁽¹⁾
Regiões do Brasil (10^3 t/ano)⁽²⁾

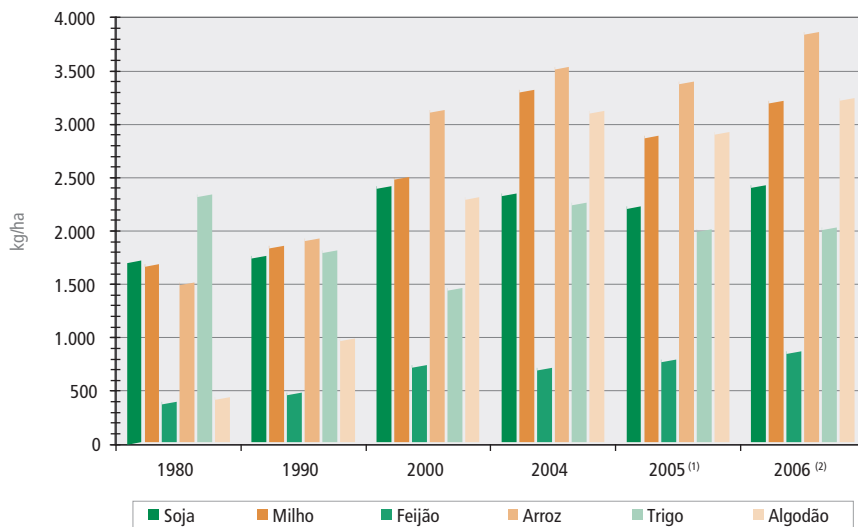


Notas: (1) Culturas: algodão (em caroço), amendoim, arroz, aveia, centeio, cevada, feijão, girassol, mamona, milho, soja, sorgo, trigo e triticale.

(2) Dados estimados para 2006.

Fonte: CONAB, 2006a.

Figura 2 – Evolução da produtividade das principais culturas – cereais e leguminosas
Brasil

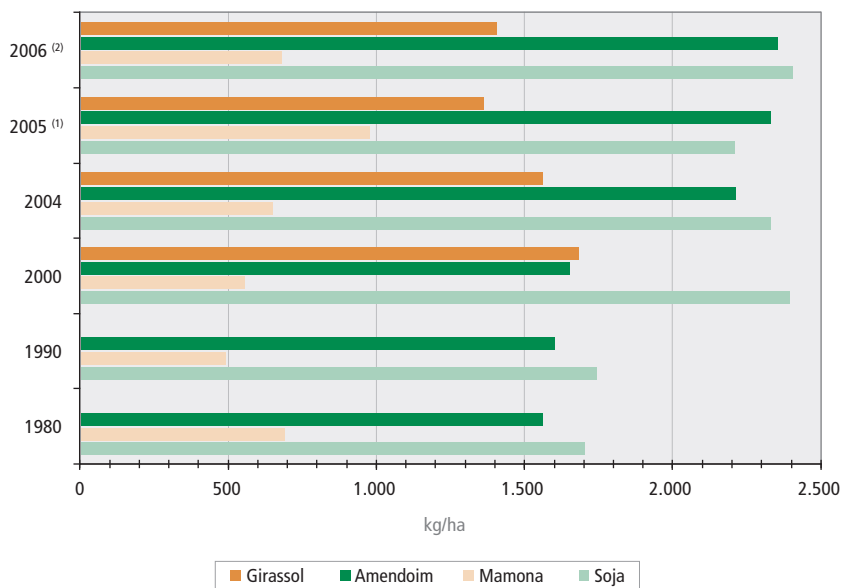


Notas: (1) Dados preliminares sujeitos a mudança.

(2) Dados estimados sujeitos a mudança.

Fonte: CONAB, 2006a.

Figura 3 - Evolução da produtividade das principais culturas - oleaginosas
Brasil



Notas: (1) Dados preliminares sujeitos a mudança.

(2) Dados estimados sujeitos a mudança.

Fonte: CONAB, 2006a.

Em termos de produtividade, a atividade agrícola brasileira apresentou expressivos ganhos entre as safras da década de 80 e os últimos anos, com crescimentos de 41 % na produtividade da soja, 92 % do milho, 126 % do feijão, 158 % do arroz, 678 % do algodão, 51 % do amendoim, resultando em uma elevação média nacional de 99,6 %. A evolução da produtividade brasileira das principais culturas de cereais, leguminosas e oleaginosas, em kg/ha, pode ser vista nas Figuras 2 e 3.

Tabela 3 - Série histórica de produção por safras – lavouras temporárias e permanentes
Brasil (10³ t/ano)

Cultura	1990	1995	2000	2003	2004	2005 ⁽¹⁾
Lavouras Temporárias (LT)						
Cana-de-açúcar	262.674	303.699	326.121	396.012	415.206	421.760
Mandioca	24.322	25.423	23.041	21.961	23.781	26.329
Tomate	2.261	2.715	3.005	3.709	3.489	3.431
Batata - inglesa	2.234	2.692	2.607	3.089	3.046	3.138
Cebola	869	941	1.156	1.230	1.133	1.061
Fumo (em folha)	445	456	580	656	920	894
Alho	71	59	84	123	85	86
Malva (fibra)	19	10	6	9	10	10
Demais LT ^{(2) (3)}	2.396	3.367	3.468	4.257	1.438	1.476
Lavouras Permanentes (LP)						
Laranja	14.016	15.870	17.064	16.918	18.271	17.877
Banana	5.616	5.690	5.777	6.801	6.607	6.660
Café (em côco)	2.930	1.860	3.807	1.987	2.467	2.144
Uva	805	837	1.024	1.067	1.283	1.246
Maçã	408	515	865	842	973	844
Cacau (em amêndoa)	356	297	197	170	195	215
Sisal ou agave (fibra)	185	118	194	187	199	208
Castanha de caju	108	185	139	183	183	148
Pimenta-do-reino	78	34	39	67	65	78
Demais LP ^{(4) (5)}	4.835	6.189	7.728	9.943	1.966	2.026
Total Lavouras Temporárias	295.291	339.362	360.067	431.046	449.109	458.185
Total Lavouras Permanentes	29.336	31.594	36.834	38.165	32.208	31.446
Total Brasil (LT e LP)	324.627	370.956	396.901	469.211	481.317	489.631

Notas: (1) Estimativas.

(2) Demais lavouras temporárias inclui: abacaxi, batata - doce, ervilha (em grão), fava (em grão), juta (fibra), linho (semente), melancia, melão, rami (fibra).

(3) Entre as demais lavouras temporárias, diversas estimativas não disponíveis para 2004 e 2005

(4) Demais lavouras permanentes inclui: abacate, azeitona, borracha (látex coagulado), caqui, chá-da-india (folha verde), côco-da-baía, dendê (côco), erva-mate (folha verde), figo, goiaba, guaraná (semente), limão, mamão, manga, maracujá, marmelo, noz (fruto seco), palmito, pêra, pêssego, tangerina, tungue (fruto seco), urucum (semente).

(5) Entre as demais lavouras permanentes, diversas estimativas não disponíveis para 2004 e 2005

Fonte: IBGE, 2005b; CONAB, 2006a.

No que diz respeito à produção brasileira em lavouras temporárias e permanentes em 2005, que inclui uma grande variedade de culturas, o valor total foi de 489,63 milhões de toneladas, 1,7 % maior que 2004 e 4,4 % maior que 2003, como indicado na Tabela 3. Em 2005 ocorreu a maior safra nacional desde 1990.

Tabela 4 - Série histórica área colhida – lavouras temporárias e permanentes
Brasil (10³ ha)

Cultura	1990	1995	2000	2003	2004 ⁽¹⁾	2005 ⁽¹⁾
Lavouras Temporárias (LT)						
Cana-de-açúcar	4.273	4.559	4.805	5.371	5.635	5.875
Mandioca	1.938	1.946	1.709	1.634	1.751	1.924
Fumo (em folha)	274	293	310	393	461	498
Batata - inglesa	158	177	152	152	143	142
Tomate	61	62	57	63	59	60
Cebola	75	75	67	69	58	56
Abacaxi	33	44	60	58	55	55
Alho	17	13	13	15	10	10
Demais LT ⁽²⁾	277	237	189	196	9	8
Lavouras Permanentes (LP)						
Café (em côco)	2.909	1.870	2.268	2.396	2.366	2.318
Laranja	913	856	856	836	820	804
Castanha de caju	583	700	651	683	681	690
Cacau (em amêndoa)	665	739	706	591	637	667
Banana	488	509	525	510	490	492
Côco-da-baía	214	243	264	280	274	282
Sisal ou agave (fibra)	249	152	195	222	233	236
Uva	59	61	60	68	71	74
Maçã	22	27	30	32	33	35
Pimenta-do-reino	34	19	16	26	26	31
Guaraná (semente)	11	8	12	13	13	13
Demais LP ⁽³⁾	359	438	578	619	-	-
Total Lavouras Temporárias	7.105	7.406	7.362	7.950	8.179	8.628
Total Lavouras Permanentes	6.506	5.621	6.162	6.274	5.645	5.641
Total Brasil (LT e LP)	13.611	13.027	13.523	14.224	13.824	14.270

Notas: (1) Estimativas.

(2) Demais lavouras temporárias inclui: malva (fibra), juta (fibra), batata-doce, ervilha (em grão), fava (em grão), linho (semente), melancia, melão e rami (fibra).

(3) Demais lavouras permanentes inclui: abacate, azeitona, borracha (látex coagulado), caqui, chá-da-índia (folha verde), dendê (côco), erva-mate (folha verde), figo, goiaba, limão, mamão, manga, maracujá, marmelo, noz (fruto seco), palmito, pêra, pêssego, tangerina, tungue (fruto seco), urucum (semente)

Fonte: IBGE, 2005b; CONAB, 2006a.

Entre estas culturas está a cana-de-açúcar, que respondeu por mais 85% da produção física nacional em lavouras temporárias e permanentes, com um total de 421,76 milhões de toneladas, ocupando, aproximadamente, 5,8 milhões de hectares. Este setor vem ganhando novos investimentos nos últimos anos, com o objetivo de suprir a demanda por açúcar e etanol nos mercados interno e externo. A produção já cresceu 30% desde o ano 2000, sendo que a área cultivada cresceu apenas 22%. Entre 1990 e 2005, a produção cresceu 60% e a área 38%, refletindo o expressivo crescimento da produtividade agrícola desta atividade.

■ 2.1.1. Soja

O grande crescimento da produção de soja no Brasil, nas últimas décadas, proporcionou a expansão da fronteira agrícola para o cerrado brasileiro, levando o progresso e o desenvolvimento para a Região Centro-Oeste. O Brasil é o país que possui as melhores condições para atender o crescimento da demanda mundial de soja, porém, o seu 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 2004, o Brasil foi o segundo maior produtor mundial de soja, com uma produção de 49,8 milhões de toneladas, aproximadamente 24% do total mundial. Esta produção representa um decréscimo de 4,3% em relação à produção do ano anterior, que totalizou 52 milhões de toneladas.

Na Tabela 5, vemos a série histórica de produção de soja no Brasil, segmentada por Regiões e Unidades da Federação e a Figura 4 mostra o mapa de produção da soja com os dez principais municípios produtores assinalados.

Tabela 5 - Série histórica de produção de soja
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10³ t/ano)

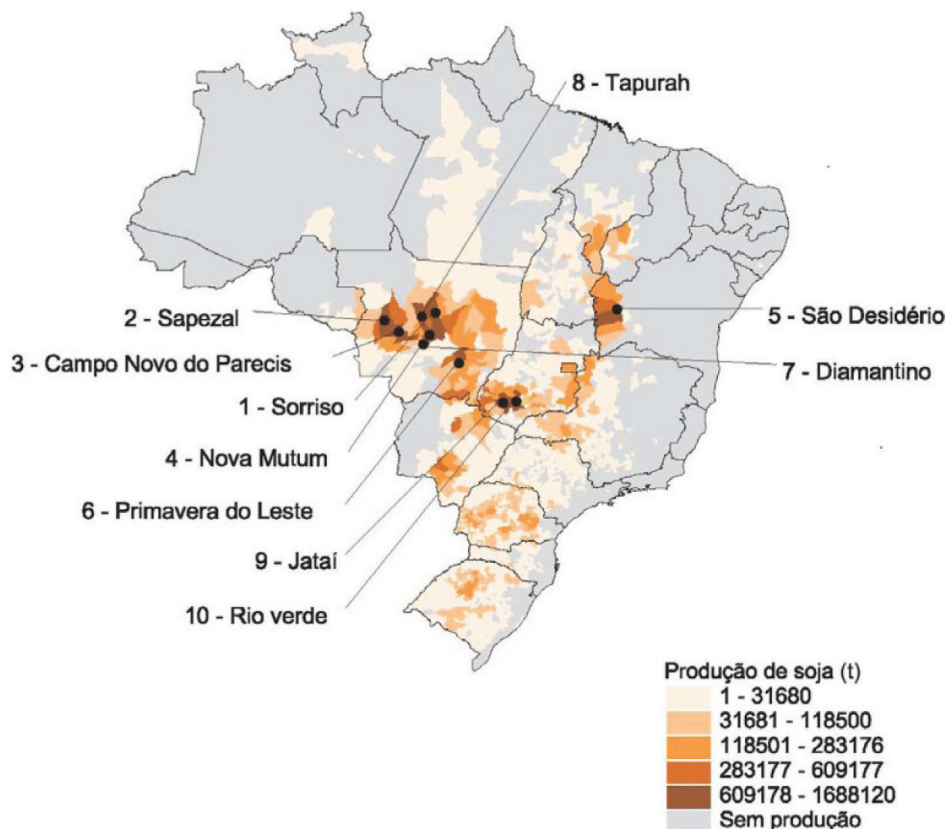
	1990	1995	2000	2003	2004	2005 ⁽¹⁾
Brasil	20.101,3	25.934,1	32.344,6	52.017,5	49.792,7	51.452,0
Norte	53,2	45,5	150,7	557,5	913,7	1.404,8
Roraima	-	-	-	7,2	28,8	56,0
Rondônia	15,6	13,0	35,4	123,0	177,9	222,8
Amazonas	-	-	-	5,4	5,4	8,4
Pará	-	-	4,9	44,2	95,0	207,0
Tocantins	37,6	32,5	110,4	377,7	606,6	910,6
Nordeste	267,8	1.267,8	2.064,0	2.519,3	3.538,9	3.953,1
Maranhão	6,7	169,6	439,3	654,9	924,1	997,5
Piauí	0,4	25,2	100,0	308,2	396,7	554,4
Bahia	256,2	1.073,0	1.524,7	1.556,2	2.218,1	2.401,2
Sudeste	1.843,5	2.365,9	2.569,7	4.067,6	4.474,4	4.705,7
Minas Gerais	874,5	1.188,0	1.396,8	2.332,5	2.659,2	3.021,6
São Paulo	969	1.177,9	1.172,9	1.735,1	1.815,2	1.684,1
Sul	11.611,2	12.170,2	12.614,9	21.340,6	16.252,6	12.793,1
Paraná	4.572,0	5.534,8	7.134,4	10.971,0	10.036,5	9.541,3
Santa Catarina	600,6	484,8	515,5	738,5	656,7	630,0
Rio Grande do Sul	6438,6	6.150,6	4.965,0	9.631,1	5.559,4	2.621,8
Centro-Oeste	6.325,6	10.084,7	14.945,3	23.532,5	24.613,1	28.595,3
Mato Grosso do Sul	1.934,4	2.426,4	2.323,9	4.103,8	3.324,8	3.716,4
Mato Grosso	2.900,8	5.440,1	8.456,0	12.949,4	15.008,8	17.705,1
Goiás	1.490,4	2.218,2	4.165,4	6.479,3	6.279,5	7.173,8

Nota: (1) Valores estimados para dados do ano 2005.

Fonte: CONAB, 2006b.

A expectativa inicial era de que fossem colhidas cerca de 58,9 milhões de toneladas, dado que a área plantada apresentara um crescimento de 9,0 %, em virtude das excelentes cotações do complexo soja, do aumento da demanda por parte dos países asiáticos e do bom nível de capitalização dos sojicultores, além do fato de a safra norte-americana ter apresentado significativa quebra. As condições climáticas vigentes no início do ciclo eram normais, mas a partir de dezembro os estados sulinos foram afetados por uma forte estiagem, e os Estados do Mato Grosso, Goiás e Minas Gerais registraram excessivas chuvas que resultaram em perdas expressivas nesta lavoura (IBGE, 2005b).

Figura 4 - Mapa da produção de soja
Brasil e os dez principais municípios produtores – 2004



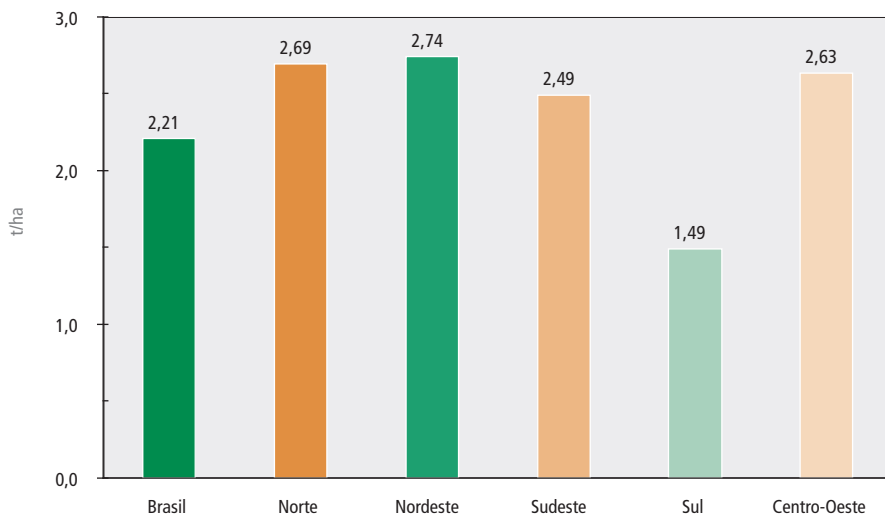
Fonte: IBGE, 2005b.

As exigências térmicas e hídricas da cultura da soja são, durante o seu desenvolvimento, de 400 mm a 800 mm de água, bem-distribuídos, sobretudo nas fases mais críticas que são a da floração e a do enchimento dos grãos, e são semelhantes às do milho. Apesar disso, a soja suporta melhor uma certa escassez de água na fase vegetativa, bem como tolera excesso de umidade no estágio de maturação e colheita.

As temperaturas médias de verão, consideradas ótimas para todas as variedades de soja, estão em torno de 23°C e 25°C. Para uma boa produção, as precipitações durante o ciclo da cultura devem situar-se entre 450 mm e 700 mm, dependendo da drenagem do solo. As fases críticas, em termos das necessidades hídricas da soja, são as seguintes: da sementeira à emergência e da floração à maturação, quando a deficiência de água causa quedas das flores e vagens (IBGE, 2004b).

Em termos de produtividade, vemos na Figura 5 o rendimento médio da produção de soja, segmentado pelas regiões e para o país, refletindo a adaptação desta cultura às áreas mais promissoras da fronteira agrícola nacional, as regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste.

Figura 5 - Rendimento médio da produção de soja
Brasil e Regiões – 2005 ⁽¹⁾



Nota: (1) Valores estimados para a safra do ano.

Fonte: CONAB, 2006b.

■ 2.1.2. Milho

Em 2004, a produção de milho somou 41,8 milhões de toneladas, representando um decréscimo de 11,9 % em relação à safra de 2003, e a previsão para 2005 indica uma queda ainda maior, de 15,9 % em relação à produção de 2004, reduzindo-se para, aproximadamente, 35,1 milhões de toneladas, apesar da elevação, embora pequena, da área plantada no período.

A cultura do milho se faz presente em todas as Unidades da Federação, mas apenas oito estados concentram cerca de 90% da produção nacional. Estes estados, pela ordem de grandeza de suas produções, em 2004, são: Paraná, Minas Gerais, São Paulo, Goiás, Mato Grosso, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Mato Grosso do Sul, como apresentado na Tabela 6, e também na Figura 6.

A tendência geral nestes estados produtores foi de redução da área de plantio, principalmente pelo fato de o preço do cereal ter sido considerado insatisfatório. Em verdade, a safra de 2004 também foi muito afetada pela estiagem ocorrida em ampla área da Região Sul, e pelo ciclone Catarina, que trouxe grandes prejuízos ao litoral e áreas interiores adjacentes dos Estados de Santa Catarina e do Rio Grande do Sul. Os decréscimos foram sentidos não só nos estados da Região Sul, mas também no Mato Grosso do Sul, e deveram-se também à menor quantidade dos insumos de produção utilizados neste ano nas lavouras de milho. Além disso, em algumas áreas, a opção para plantio da “safra das águas” recaiu sobre as culturas da soja, do algodão herbáceo e da mandioca, em detrimento da cultura do milho (IBGE, 2006).

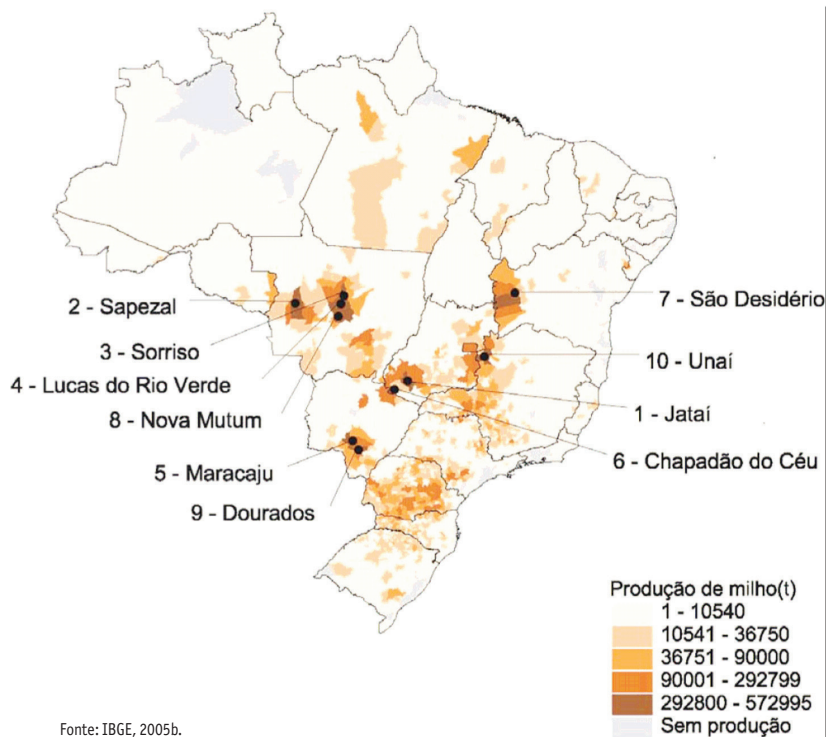
Tabela 6 – Série histórica de produção de milho
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10³ t/ano)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005 ⁽¹⁾
Brasil	24.096,1	37.441,9	31.640,5	47.410,9	41.787,6	35.134,3
Norte	623,8	971,8	1.050,8	979,2	1.072,0	1.082,7
Roraima	3,1	15,4	19,5	42,7	240,4	245,2
Rondônia	204,8	381,6	224,4	184,0	68,3	61,0
Acre	48,5	57,9	52,4	49,5	25,0	34,9
Amazonas	6,8	9,8	17,3	15,7	24,0	24,0
Amapá	-	-	1,0	1,2	570,3	559,7
Pará	277,0	396,1	621,2	528,1	0,9	1,3
Tocantins	83,6	111,0	115,0	158,0	143,157	156,6
Nordeste	2.030,8	2.679,9	2.953,8	3.277,5	2.898,7	2.933,1
Maranhão	354,7	422,5	313,6	414,2	408,9	402,6
Piauí	256,8	404,8	231,2	287,3	134,114	191,8
Ceará	386,8	468,9	636,3	749,4	379,837	281,7
Rio Grande do Norte	71	83,2	58,9	71,0	60,57	23,1
Paraíba	138,2	156,6	149,7	123,2	72,899	61,4
Pernambuco	232,2	253,5	139,8	82,1	65,746	115,9
Alagoas	58,6	46,7	22,4	18,0	29,833	34,4
Sergipe	69,6	85,2	95,7	133,1	136,317	205,6
Bahia	462,9	758,5	1.306,2	1.399,2	1610,524	1.616,5
Sudeste	8.197,4	8.412,3	7.191,2	10.047,7	10.753,8	10.487,0
Minas Gerais	3.792,0	4.152,5	4.138,7	5.327,3	5.952,2	6.243,9
Espírito Santo	288,8	103,0	111,1	144,9	129,579	122,2
Rio de Janeiro	45,8	32,2	32,3	22,1	24,852	27,0
São Paulo	4070,8	4.124,6	2.909,1	4.553,4	4647,24	4.093,9
Sul	8.738,2	19.002,5	14.061,7	23.175,1	17.569,2	12.752,6
Paraná	4.968,9	9.180,0	7.037,7	13.657,2	10.934,6	8.572,4
Santa Catarina	1564,5	3.821,8	3.257,2	4.234,5	3257,77	2.695,2
Rio Grande do Sul	2204,8	6.000,7	3.766,8	5.283,4	3376,862	1.485,0
Centro-Oeste	4.505,9	6.375,4	6.383,0	9.931,4	9.493,8	7.879,0
Mato Grosso do Sul	958,5	1.476,3	1.193,6	3.039,7	2.374,0	1.291,9
Mato Grosso	698,9	1.286,9	1.467,2	3.227,8	3.409,0	3.506,2
Goiás	2.848,5	3.612,2	3.722,2	3.663,9	3.710,8	3.080,8

Nota: (1) Valores estimados para dados do ano 2005.

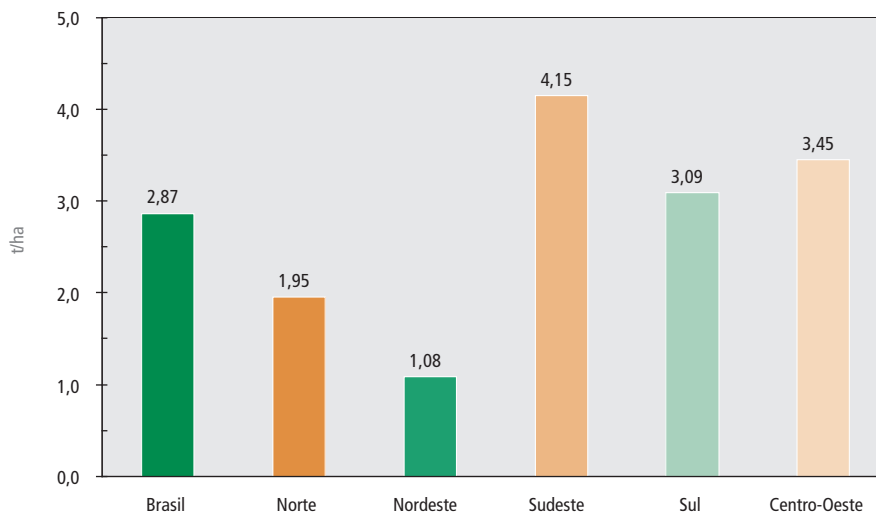
Fonte: IBGE, 2006.

Figura 6 – Mapa da produção de milho
Brasil e os dez principais municípios produtores – 2004



Fonte: IBGE, 2005b.

Figura 7 – Rendimento médio da produção de milho
Brasil e Regiões – 2005¹



Nota: (1) Valores estimados para a safra do ano.

Fonte: CONA, 2006b.

A cultura do milho necessita, durante o seu desenvolvimento, de 500 mm a 800 mm de água, bem distribuídos, sobretudo nas fases mais críticas que são a da floração e a do enchimento dos grãos. No estudo do IBGE (2004b), considera-se como safra anual de milho, a soma da safra principal e da safrinha.

Cabe também assinalar que, a safrinha do milho é plantada pelos produtores como uma alternativa aos cultivos de inverno (trigo, centeio, cevada, triticale, etc.), estando, portanto, muito mais sujeita ao stress hídrico e outros danos provocados por intempéries climáticas.

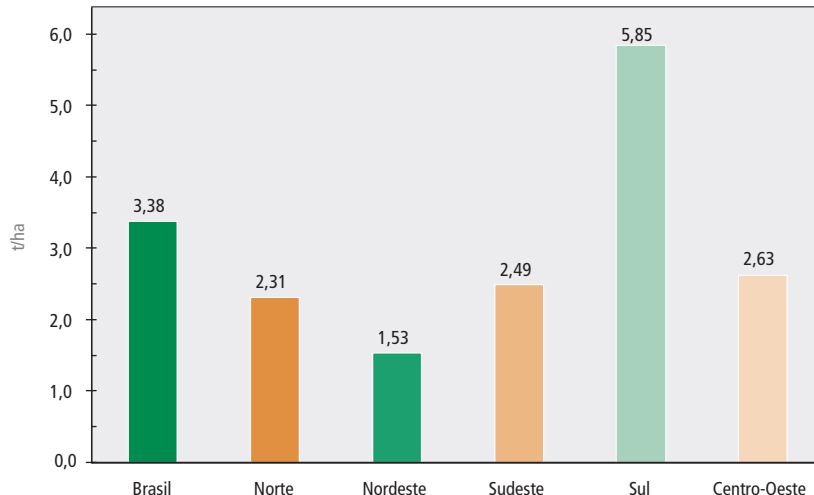
Em termos de produtividade, vemos na Figura 7, o rendimento médio da produção de milho, segmentado pelas regiões e para o país, refletindo a melhor adaptação desta cultura às regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste.

■ 2.1.3. Arroz

O arroz é o cereal de maior importância alimentar no mundo. Desenvolve-se sob diversas condições climáticas sendo, contudo, muito exigente em umidade do solo. Necessita de 160 mm a 200 mm de água por mês, e é o único cereal que pode ser cultivado em solos inundados. O arroz só se desenvolve normalmente quando sujeito a longo período de luz (IBGE, 2004b).

Os números preliminares da produção nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas do ano de 2005, apontam para uma produção de arroz em casca de 13,3 milhões de toneladas, que, em relação à do ano anterior, mostrou-se apenas 3,1 % maior, como pode ser visto na Tabela 7.

Figura 8 – Rendimento médio da produção de arroz
Brasil e Regiões – 2005 ⁽¹⁾



Nota: (1) Valores estimados para a safra do ano.

Fonte: CONAB, 2006b.

Tabela 7 – Série histórica de produção de arroz
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10³ t/ano)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005 ⁽¹⁾
Brasil	7.967,9	11.238,0	11.423,1	10.367,1	12.829,4	13.227,5
Norte	605,6	1.109,0	1.150,9	1.261,5	1.330,5	1.529,8
Roraima	10,8	49,6	51,2	106,4	133,8	135,2
Rondônia	142,7	257,8	189,6	115,7	166,3	222,3
Acre	43,5	50,2	32,4	32,6	37,8	35,6
Amazonas	2,3	6,4	30,8	23,2	23,2	23,6
Amapá	0,3	0,7	1,0	3,6	3,8	4,0
Pará	146,8	331,2	453,9	554,8	541,4	641,3
Tocantins	259,2	413,1	392,0	425,2	424,2	467,9
Nordeste	839,1	1.709,4	1.337,2	1.124,8	1.168,3	1.251,8
Maranhão	414,2	926,1	717,3	706,9	720,1	718,0
Piauí	137,9	399,3	251,8	197,7	167,6	233,5
Ceará	128,1	200,0	169,0	99,6	92,3	101,5
Rio Grande do Norte	3,8	4,6	1,7	7,1	8,0	3,1
Paraíba	20,4	18,6	14,8	10,8	13,2	5,3
Pernambuco	29,4	19,7	19,6	17,4	51,7	48,9
Alagoas	29,4	28,5	32,3	12,0	11,9	12,9
Sergipe	39,1	15,1	37,5	42,8	40,4	40,8
Bahia	36,8	97,5	93,2	30,5	63,1	87,8
Sudeste	1.058,7	947,5	438,0	311,6	337,0	379,6
Minas Gerais	584,8	605,7	290,7	191,6	212,4	256,2
Espírito Santo	103,3	68,1	18,6	8,0	10,2	11,6
Rio de Janeiro	44	51,5	14,5	8,5	8,8	10,2
São Paulo	326,6	222,2	114,2	103,5	105,6	101,7
Sul	4.500,7	6.013,1	6.068,8	5.920,1	7.476,1	7.405,4
Paraná	255,4	221,6	176,9	180,4	174,6	150,2
Santa Catarina	565,4	721,5	804,0	1.043,3	999,8	1.049,9
Rio Grande do Sul	3679,9	5.070,0	5.087,9	4.696,4	6.301,7	6.205,2
Centro-Oeste	963,8	1.459,0	2.428,2	1.749,1	2.517,5	2.660,8
Mato Grosso do Sul	168,3	235,8	251,4	237,6	240,0	236,2
Mato Grosso	424,9	760,0	1.890,8	1.289,6	1.932,2	2.043,2
Goiás	370,6	463,2	286,0	221,9	345,3	381,3

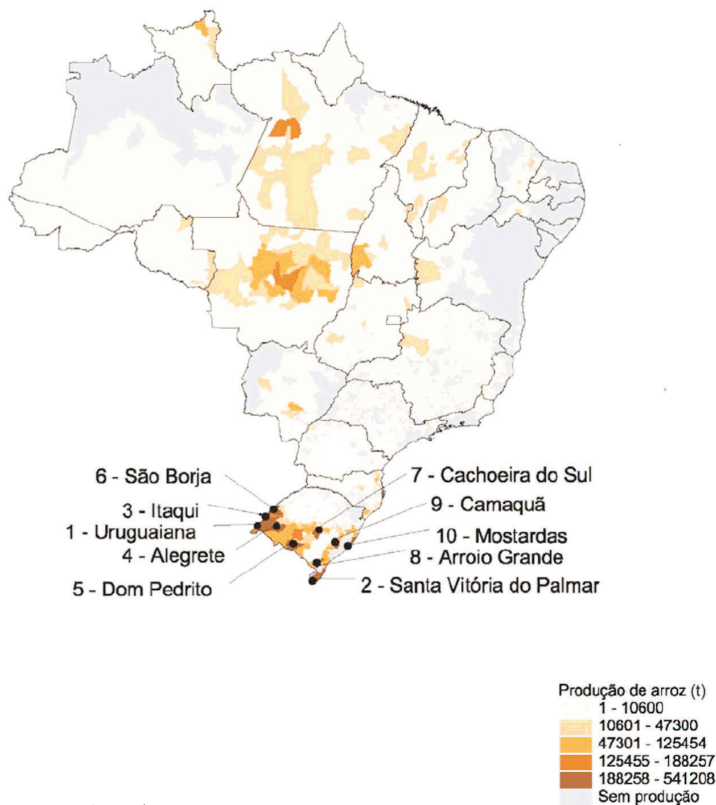
Nota: (1) Valores estimados para dados do ano 2005.

Fonte: CONAB, 2006b.

Nas safras de 2004 e de 2005, não se alteraram as posições dos sete maiores Estados produtores de arroz do País. Observa-se que, o Rio Grande do Sul é o principal produtor do País, tendo produzido 6,25 milhões de toneladas em 2005, o equivalente a 47% da produção nacional. Na segunda colocação, encontra-se Mato Grosso, com uma produção de 2,05 milhões de toneladas, que corresponde a cerca de 15 % do total colhido naquele ano.

Importa destacar que 24 municípios gaúchos estão entre os maiores produtores de arroz do País e somaram em 2005 33,8 % da produção nacional, onde já alcançou-se a produtividade de 7,5 kg/ha, frente a uma média da região Sul de 5,85 kg/ha e uma média nacional de 3,38 kg/ha, como visto na Figura 8.

Figura 9 – Mapa da produção de arroz
Brasil e os dez principais municípios produtores – 2004



Fonte: IBGE, 2005b.

Na Figura 9, que apresenta o mapa da produção de arroz no Brasil é possível verificar a predominância desta cultura na região Sul do País, em particular no Rio Grande do Sul.

■ 2.1.4. Cana-de-açúcar

A estimativa de produção nacional de cana-de-açúcar para o ano de 2005 é de 431,4 milhões de toneladas, correspondente a um incremento de 3,9 % em relação ao ano anterior, e de 8,9 % em relação a 2003. Este crescimento pode ser creditado ao comportamento dos preços do etanol e do açúcar. Um fato importante foi a exportação de etanol, com as exportações de álcool combustível superando as de álcool industrial. As exportações de etanol em 2005 atingiram a cifra de 2,66 bilhões de litros, tendo crescido 40 vezes em relação às exportações do ano 2000, e triplicando em relação ao ano de 2003. As exportações de açúcar cresceram 58% em relação ao ano 2000.

Também no que diz respeito ao setor externo, o parecer favorável ao pedido de salvaguardas do Brasil na Organização Mundial do Comércio - OMC contra os subsídios concedidos na União Européia para exportação do açúcar contribuiu para esse quadro positivo (IBGE, 2005b).

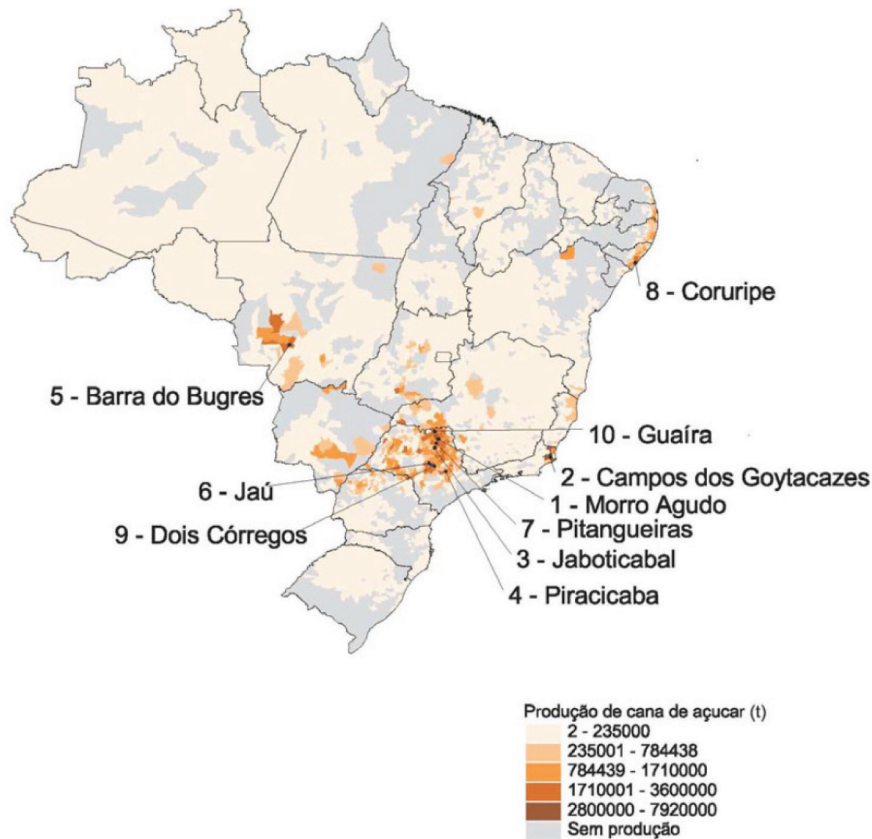
Tabela 8 – Série histórica de produção de cana-de-açúcar
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10³ t/ano)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	262.679	303.699	326.121	396.012	415.206	431.386
Norte	784	725	844	875	956	1.077
Rondônia	23	17	0	0	30	33
Acre	17	17	0	0	23	26
Amazonas	115	53	226	342	235	265
Roraima	-	-	0	0	1	1
Pará	390	425	464	373	504	568
Amapá	-	-	0	0	2	2
Tocantins	238	213	154	159	160	180
Nordeste	71.689	60.659	60.259	63.742	65.499	56.600
Maranhão	2.042	1.366	1.140	1.728	1.652	1.970
Piauí	1.562	904	407	483	524	614
Ceará	2.724	2.029	1.840	1.770	1.762	1.773
Rio Grande do Norte	2.492	2.336	1.730	3.202	3.257	2.638
Paraíba	8.283	6.522	3.831	6.169	6.364	4.765
Pernambuco	22.818	20.665	16.358	18.811	19.015	16.944
Alagoas	26.151	21.573	28.412	25.152	26.284	23.111
Sergipe	2.182	1.242	1.389	1.482	1.697	1.418
Bahia	3.435	4.021	5.153	4.945	4.944	3.368
Sudeste	162.444	201.052	214.391	262.197	276.593	304.890
Minas Gerais	17.533	16.726	19.212	21.198	24.332	27.557
Espírito Santo	1.501	2.070	2.436	3.845	4.080	4.243
Rio de Janeiro	5.575	7.295	7.276	7.347	8.653	7.576
São Paulo	137.835	174.960	185.467	229.808	239.528	265.513
Sul	13.630	21.687	24.220	33.285	34.272	30.013
Paraná	11.736	20.430	22.713	31.454	32.643	28.505
Santa Catarina	979	427	523	677	603	602
Rio Grande do Sul	915	831	984	1.154	1.026	906
Centro-Oeste	14.132	19.577	26.407	35.914	37.886	38.806
Mato Grosso do Sul	4.193	4.922	6.386	9.273	9.572	9.799
Mato Grosso	3.037	6.945	10.063	13.771	14.291	13.460
Goiás	6.902	7.709	9.958	12.869	14.023	15.547

Fonte: PAM – IBGE (2006) para os dados de 1990 a 2004
CONAB, 2006b para dados do ano 2005 – valores estimados

Verifica-se pelos dados apresentados na Tabela 8, bem como na visualização da Figura 10, que é o mapa da produção de cana-de-açúcar no país, que o Estado de São Paulo é o principal produtor nacional, com 62 % da produção do País, e apresentou um crescimento de 10,9 %, totalizando 265,5 milhões de toneladas. Verifica-se que dos dez maiores municípios produtores do Brasil, sete pertencem a essa Unidade da Federação, sendo que entre eles o Município de Guaíra possui o maior rendimento, cerca de 100 t/ha.

Figura 10 – Mapa da produção de cana-de-açúcar
Brasil e os dez principais municípios produtores – 2004

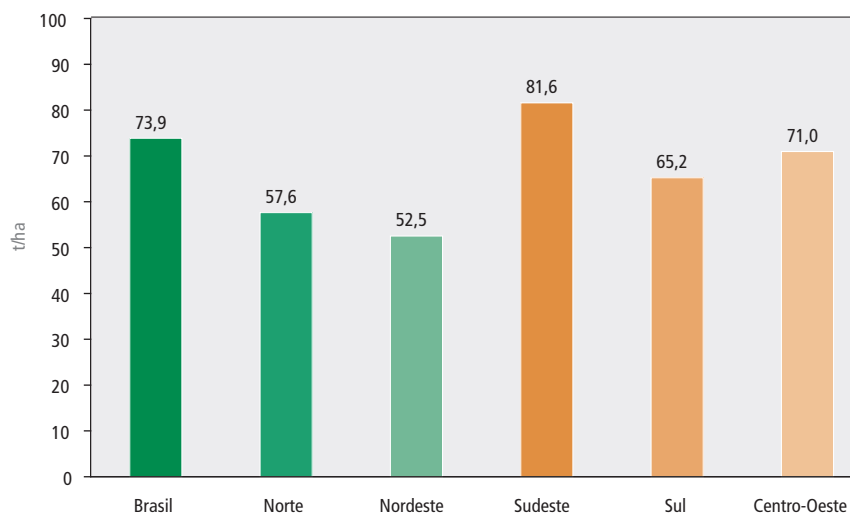


Fonte: IBGE, 2005b.

Em termos de área colhida, verifica-se na Tabela 4 um crescimento de 37,5% em relação a 1990, enquanto a produção cresceu mais de 64%, refletindo o ganho de produtividade que elevou a média nacional de 57 t/ha em 1990 para a atual de 74 t/ha, como visto na Figura 11. Como se vê, a produtividade média da região Sudeste é bastante elevada, em torno de 82 t/ha, sendo no Estado de São Paulo de 85 t/ha. A média da região Sudeste é puxada para baixo pela produtividade do Estado do Rio de Janeiro, que não ultrapassou 45 t/ha em 2005.

No complexo sucroalcooleiro da Região Nordeste, mais precisamente Pernambuco e Alagoas, maiores produtores regionais, juntos com cerca de 9,3% da produção nacional, a produção reduziu-se em torno de 10%, e a produtividade média da Região não ultrapassou os 52,5 t/ha.

Figura 11 – Rendimento médio da produção de cana-de-açúcar
Brasil e Regiões – 2005 ⁽¹⁾



Nota: (1) Valores estimados para a safra do ano.

Fonte: CONAB, 2006b.

■ 2.2. Produção florestal silvicultural e extrativa vegetal

A produção da silvicultura é a que provém do cultivo de florestas - plantio, tratos silviculturais e colheita de espécies exóticas como o eucalipto, o pinus americano, a acácia-negra, e a teca, entre outras, bem como do plantio de espécies nativas ou autóctones (pinheiro brasileiro ou araucária, mogno, etc). Em geral, os produtos obtidos são: madeira em tora para papel e celulose; madeira em tora para outras finalidades, como construção civil, movelaria, náutica, etc.; lenha; carvão vegetal; casca de acácia-negra; folha de eucalipto e resinas.

No extrativismo vegetal, os produtos são simplesmente coletados em vegetações nativas espontâneas, e podem ser produtos madeireiros, como madeira em tora, lenha, carvão vegetal e nó-de-pinho e não-madeireiros, como borrachas, fibras, gomas, frutos e amêndoas oleaginosas, frutos, folhas e raízes medicinais, aromáticas, corantes e alimentícias, entre outros.

Conforme apurado na pesquisa Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura 2004 (IBGE, 2005a e b), a produção primária florestal do País somou cerca de 220 milhões de m³, como apresentado na Tabela 9.

Dos produtos da silvicultura nos anos de 2003 e 2004, constata-se que o volume de madeira para papel e celulose declinou 6,6%, enquanto o de madeira para outras finalidades apresentou uma redução de 17,8%. Em razão disso, o volume total de madeira produzida no segmento da silvicultura, de 135,35 milhões de m³, apresentou uma redução geral de 8,1 %, relativamente ao registrado no ano de 2003.

Apesar da queda verificada neste biênio, a comparação dos anos 2000 e 2004 com o início da década de 90, mostram que a produção silvicultural cresceu, respectivamente, 17 % e 23 % nos períodos compreendidos entre estes anos. Outra análise importante é a comparação entre a proporção da produção silvicultural e da extração vegetal neste mesmo período, que mostra a inversão da participação de cada uma das atividades

como fornecedora de madeira par seus diversos fins. Em 1990, a extração vegetal respondia por 74 % desta oferta, enquanto em 2000 sua participação caiu para 40 % e desde então declinou apenas levemente, chegando a 38,5 % em 2004.

Verifica-se pela Tabela 9, que a produção florestal silvicultural apresentou certa estabilidade nos últimos anos, no período compreendido entre os anos 2000 e 2004, variando em torno dos 130 milhões de m³ por ano, com um desvio médio da ordem de 9,0 milhões de m³, e apresentando um crescimento total de 6,2 %. Já a produção florestal extrativa vegetal manteve-se praticamente estável no período, variando em torno dos 85,5 milhões de m³ por ano, com um desvio médio de apenas 1,2 milhões de m³.

Tabela 9 – Série histórica da produção florestal da silvicultura e da extração vegetal
Brasil – 1990 a 2004 (10³ m³/ano)

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004
Brasil	312.042	274.257	212.313	197.321	221.547	233.994	219.999
Extração Vegetal	230.494	161.995	84.834	84.108	87.249	86.660	84.648
Carvão Vegetal ⁽¹⁾	23.274	15.043	11.910	14.411	16.295	18.560	18.216
Lenha	108.549	84.795	50.395	49.002	49.503	47.232	47.168
Madeira em Tora	97.514	61.588	21.919	20.069	21.375	20.663	19.103
Outros ^{(2) (3)}	1.156	569	610	626	77	204	161
Silvicultura	81.548	112.262	127.479	113.213	134.298	147.334	135.351
Carvão Vegetal ⁽⁴⁾	11.785	15.909	15.292	13.412	12.822	13.810	13.831
Lenha	22.739	28.166	40.469	30.042	46.410	33.827	34.005
Madeira em Tora	47.024	68.186	71.718	69.758	75.065	99.697	87.515
Para Papel e Celulose	32.953	48.613	46.009	40.999	43.352	49.531	46.285
Para Outras Finalidades	14.071	19.574	25.708	28.759	31.714	50.166	41.230
Outros Produtos ^{(5) (6)}	241	245	427	295	1.160	328	330

Notas: (1) Dados originais de carvão vegetal em toneladas de carvão, convertidos a m³ de lenha primária considerando eficiência de 2,5 t lenha / ton CV (TRUGILHO et al., 2005), densidade da lenha catada 300 kg/m³.

(2) Outros da Extração Vegetal são os produtos do pinheiro brasileiro - nó-de-pinho e madeira em tora.

(3) Diversos outros produtos da Extração Vegetal são quantificados pelas pesquisas do IBGE, entre eles: borrachas, gomas não-elásticas, ceras, fibras, tanantes, oleaginosos, alimentícios, aromáticos, medicinais, tóxicos e corantes; que não foram considerados aqui em função do objetivos deste trabalho.

(4) Dados originais de carvão vegetal em toneladas de carvão, convertidos a m³ de lenha primária considerando eficiência de 2,5 t lenha / ton CV (TRUGILHO et al., 2005), densidade da lenha catada 390 kg/m³.

(5) Outros produtos da Silvicultura são cascas de acácia-negra, folhas de eucalipto e resina.

(6) Valores em milhares de toneladas, não contabilizados nos totais de Silvicultura e Brasil.

Fonte: SIDRA, 2006.

Tabela 10 – Produção florestal da silvicultura
Brasil, Regiões e Unidades da Federação – 2004 (10³ m³/ano)

	Madeiras				Total	Outros produtos ^{(2) (3)}
	Carvão vegetal ⁽¹⁾	Lenha	Madeira em tora			
			Para papel e celulose	Para outras finalidades		
Brasil	13.831	34.005	46.285	41.230	135.351	330
Norte		286	3.367	565	4.219	-
Rondônia	-	-	-	-	-	-
Acre	-	-	-	-	-	-
Amazonas	-	-	-	-	-	-
Roraima	-	-	-	-	-	-
Pará	-	286	1.565	565	2.417	-
Amapá	-	-	1.802	-	1.802	-
Tocantins	-	-	-	-	-	-
Nordeste	1.690	1.097	5.377	456	8.619	-
Maranhão	467	18	58	29	573	-
Piauí	-	-	-	-	-	-
Ceará	12	-	-	-	12	-
Rio Grande do Norte	0	55	-	-	56	-
Paraíba	-	-	-	-	-	-
Pernambuco	-	5	-	-	5	-
Alagoas	-	-	-	-	-	-
Sergipe	-	-	-	-	-	-
Bahia	1.210	1.018	5.318	427	7.973	-
Sudeste	11.205	9.654	21.989	12.974	55.822	68
Minas Gerais	10.531	2.109	3.241	3.330	19.212	25
Espírito Santo	158	394	3.911	810	5.272	-
Rio de Janeiro	13	287	12	30	341	-
São Paulo	503	6.864	14.824	8.804	30.997	43
Sul	416	21.058	14.435	26.170	62.080	260
Paraná	169	4.301	6.300	11.423	22.193	6
Santa Catarina	45	4.387	6.306	10.319	21.057	0
Rio Grande do Sul	202	12.371	1.828	4.428	18.829	255
Centro-Oeste	521	1.909	1.117	1.064	4.611	1
Mato Grosso do Sul	393	599	1.117	1.030	3.139	1
Mato Grosso	-	368	-	13	381	-
Goiás	128	935	-	22	1.085	-
Distrito Federal	-	6	-	-	6	-

Notas: (1) Dados originais de carvão vegetal em toneladas de carvão, convertidos a m³ de lenha primária considerando eficiência de 2,5 t lenha / ton CV (TRUGILHO et al., 2005), densidade da lenha catada 390 kg/m³.

(2) Outros produtos da Silvicultura são cascas de acácia-negra, folhas de eucalipto e resina.

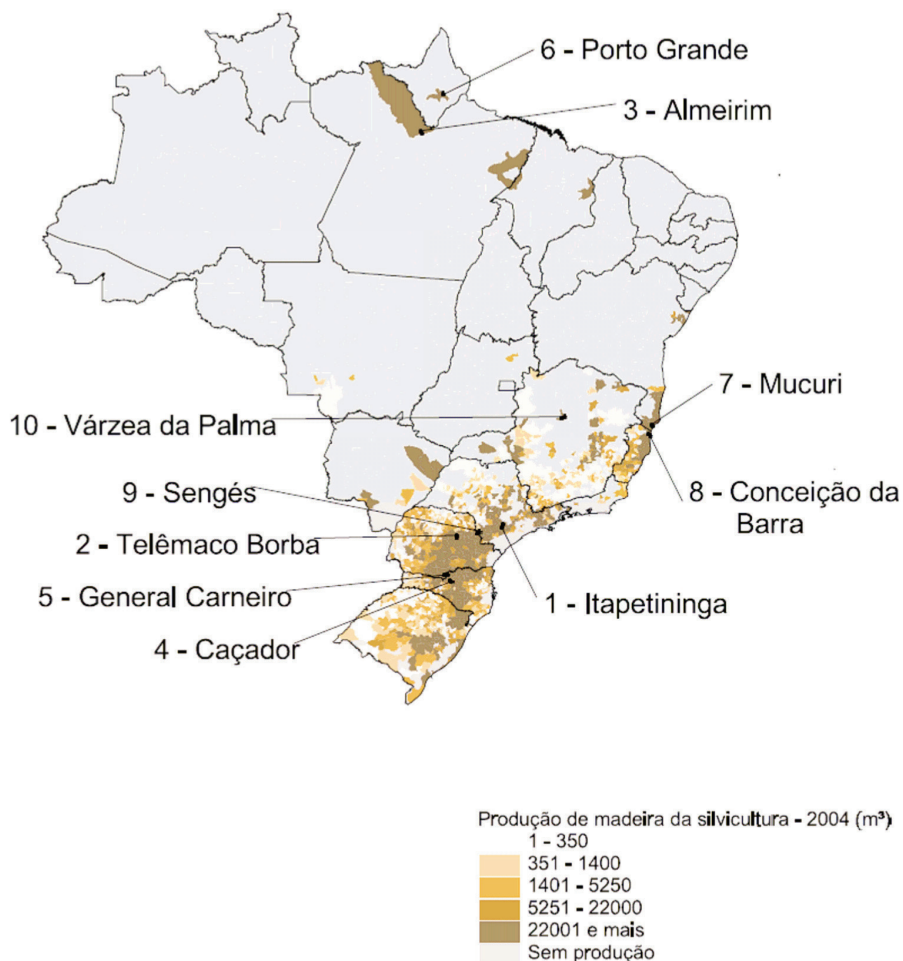
(3) Valores em milhares de toneladas, não contabilizados nos totais de Silvicultura e Brasil.

Fonte: SIDRA, 2006.

Em termos da aplicação da produção florestal de madeira em tora da silvicultura, o setor industrial responde por, aproximadamente, 60 % da demanda total desde o início da década de 1990, sendo que o setor de papel e celulose é responsável por, aproximadamente, 35 % da demanda total. Estas estabilidades demonstram que o crescimento da produção silvicultural tem sido carreado pela demanda industrial de produtos da madeira.

A quantidade total produzida em 2004, no País, de madeira em tora de florestas cultivadas (silvicultura), somou 87,5 milhões de m³, sendo que cerca de 53% deste total se destinaram para a indústria de papel e celulose, e 47% para outras indústrias, como movelaria, construção civil etc.

Figura 12 – Mapa da produção de madeira em tora da silvicultura para papel, celulose e outros fins
Brasil e os dez principais municípios produtores – 2004



Fonte: IBGE, 2005a.

Tabela 11 – Produção florestal da extração vegetal – produtos madeireiros
Brasil, Regiões e Unidades da Federação – 2004 (10³ m³/ano)

	Madeira			Outros ⁽²⁾ ⁽³⁾	Total
	Carvão vegetal ⁽¹⁾	Lenha	Madeira em tora		
Brasil	18.216	47.168	19.103	161	84.648
Norte	269	7.841	13.251	-	21.361
Roraima	-	-	1.069	-	1.069
Acre	15	563	354	-	931
Amazonas	41	2.432	887	-	3.360
Roraima	4	119	160	-	283
Pará	110	3.773	10.602	-	14.484
Amapá	4	84	95	-	182
Tocantins	96	870	86	-	1.052
Nordeste	5.864	25.368	2.145	-	33.376
Maranhão	3.589	2.968	337	-	6.894
Piauí	138	1.632	113	-	1.882
Ceará	97	4.568	54	-	4.719
Rio Grande do Norte	21	1.557	8	-	1.587
Paraíba	14	682	-	-	696
Pernambuco	73	1.308	88	-	1.469
Alagoas	1	104	0	-	105
Sergipe	9	418	13	-	440
Bahia	1.920	12.132	1.532	-	15.584
Sudeste	3.640	3.049	98	3	6.789
Minas Gerais	3.617	2.852	87	3	6.559
Espírito Santo	10	29	6	-	45
Rio de Janeiro	0	34	1	-	35
São Paulo	13	133	5	0	150
Sul	1.224	7.623	1.203	158	10.207
Paraná	1.137	2.784	909	145	4.975
Santa Catarina	75	2.344	187	9	2.615
Rio Grande do Sul	12	2.495	106	4	2.617
Centro-Oeste	7.220	3.288	2.406	-	12.914
Mato Grosso do Sul	4.307	537	28	-	4.872
Mato Grosso	116	1.999	2.343	-	4.458
Goiás	2.798	753	35	-	3.585
Distrito Federal	-	-	-	-	-

Notas: (1) Dados originais de carvão vegetal em toneladas de carvão, convertidos a m³ de lenha primária considerando eficiência de 2,5 t lenha / ton CV (TRUGILHO et al., 2005), densidade da lenha catada 300 kg/m³.

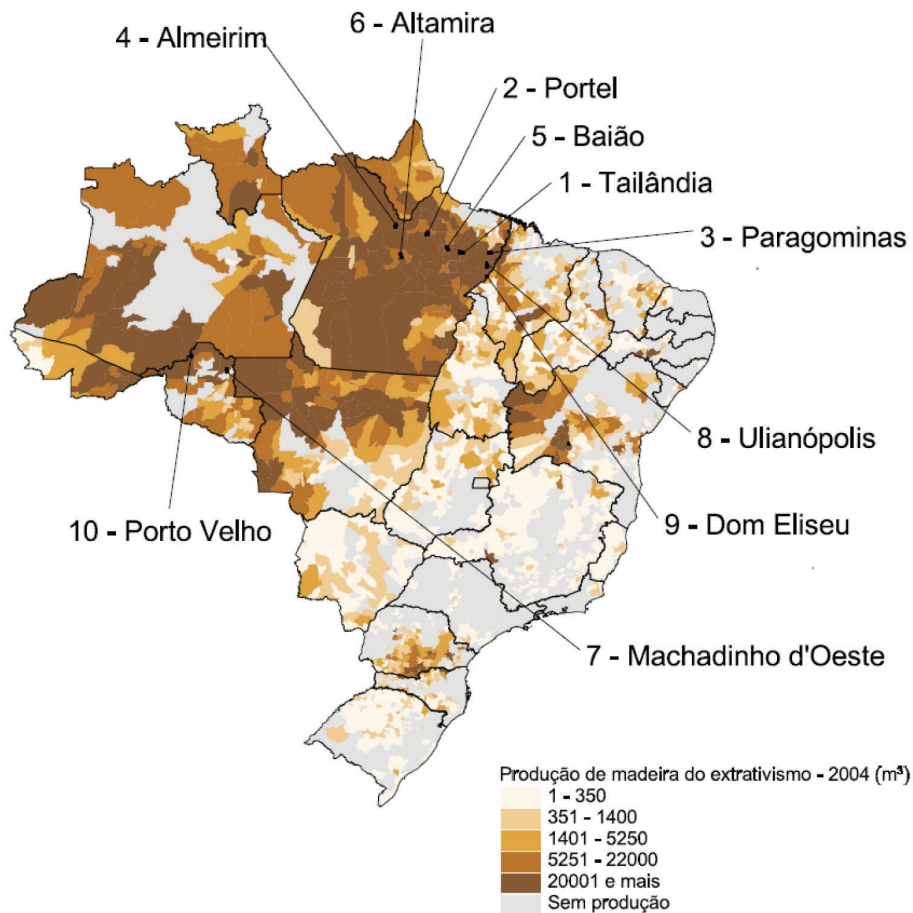
(2) Outros da Extração Vegetal são os produtos do pinheiro brasileiro - nó-de-pinho e madeira em tora.

(3) Diversos outros produtos da Extração Vegetal são quantificados pelas pesquisas do IBGE, entre eles: borrachas, gomas não-elásticas, ceras, fibras, tanantes, oleaginosos, alimentícios, aromáticos, medicinais, tóxicos e corantes; que não foram considerados aqui em função do objetivos deste trabalho.

Fonte: SIDRA, 2006.

Como se verifica na Tabela 10, São Paulo é o principal estado produtor de madeira em tora proveniente de florestas cultivadas, com a produção em 2004 representando 27% do total nacional, ao somar 23,6 milhões de m³. Na produção nacional de madeira para papel e celulose, o estado é o primeiro produtor, com 14,8 milhões de m³ produzidos em 2004, ou seja, cerca de 32% do total nacional para esse fim. Em seguida aparecem os Estados de Santa Catarina, Paraná, Bahia, Espírito Santo e Minas Gerais, respectivamente com 14 %, 13,9%, 11,8 %, 8,7 % e 7,2 %.

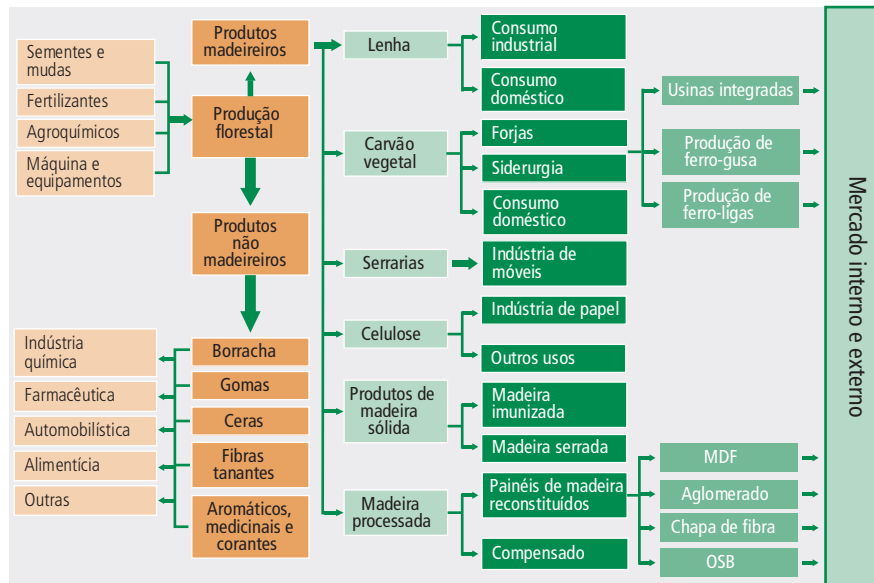
Figura 13 – Mapa da produção de madeira em tora do extrativismo vegetal para papel, celulose e outros fins Brasil e os dez principais municípios produtores – 2004



Fonte: IBGE, 2005a.

De acordo com a ABRAF (2006), o setor florestal brasileiro desenvolveu-se principalmente a partir da década de 1960 com a Lei n.º 5.106, de 2 de setembro de 1966 que viabilizou incentivos para os plantios florestais. As florestas plantadas são atualmente a principal fonte de matéria-prima florestal e importante fator de competitividade para os segmentos de celulose e papel, painéis de madeira, siderurgia a carvão vegetal, produtos sólidos de madeira, móveis de madeira, entre outros. A cadeia produtiva do setor de florestas plantadas e os diferentes segmentos que o compõem estão apresentados na Figura 14.

Figura 14 – Cadeia produtiva do setor florestal



Fonte: ABRAF, 2006 apud VIEIRA, 2004.

Os produtos madeireiros envolvem a produção de lenha, carvão vegetal, madeira em tora, produtos de madeira sólida (PMS) e madeira processada, como painéis reconstituídos de madeira e compensado. O segmento de painéis reconstituídos envolve a produção de aglomerado, MDF, OSB e chapa de fibra. Os produtos de madeira sólida incluem, entre outros, a madeira serrada, madeira imunizada, entre outros. Além dos produtos madeireiros, deve-se considerar a contribuição de produtos florestais não-madeireiros associados a florestas plantadas que incluem, entre outros, resina, mel e óleos essenciais.

Ainda segundo a ABRAF (2006), a capacidade de produção sustentável das florestas brasileiras é estimada em cerca de 390 milhões de m³/ano, sendo que deste total, as florestas plantadas com pinus e eucalipto podem contribuir com uma produção sustentável de, aproximadamente, 179 milhões de m³/ano. A produção sustentável de uma espécie é o crescimento potencial a partir da área plantada e seu Incremento Médio Anual (IMA) respectivo.

As estimativas da ABRAF (2006) para a produção silvicultural anual de madeira em tora para uso industrial no Brasil em 2005 indicam um aumento de 4,5% em relação à produção de 2004, chegando-se a um total de 91,5 milhões de m³/ano.

Ainda de acordo com a ABRAF (2006), o Brasil possuía em 2005 um total de 5,57 milhões de hectares de florestas plantados, dos quais 5,24 milhões de hectares plantados com pinus e eucalipto, como pode ser verificado pelos dados apresentados nas Tabelas 12 e 13. Devido à importância destas espécies na Silvicultura, passamos a detalhar, a seguir, algumas características particulares desta produção.

Tabela 12 - Área com florestas plantadas de pinus e eucalipto
Brasil, Regiões e Unidades da Federação – 2005 (ha)

	Pinus	Eucalipto	Total	%
Brasil	1.834.570	3.407.204	5.241.774	
Norte	27.990	166.120	194.110	3,7%
Amapá	27.841	60.087	87.928	1,7%
Pará	149	106.033	106.182	2,0%
Nordeste	54.746	588.131	642.877	12,3%
Maranhão	0	60.745	60.745	1,2%
Bahia	54.746	527.386	582.132	11,1%
Sudeste	305.918	2.066.301	2.372.219	45,3%
Minas Gerais	153.000	1.063.744	1.216.744	23,2%
Espírito Santo	4.898	204.035	208.933	4,0%
São Paulo	148.020	798.522	946.542	18,1%
Sul	1.389.931	355.852	1.745.783	33,3%
Paraná	677.772	114.996	792.768	15,1%
Santa Catarina	527.079	61.166	588.245	11,2%
Rio Grande do Sul	185.080	179.690	364.770	7,0%
Centro-Oeste	52.282	203.391	255.673	4,9%
Mato Grosso do Sul	38.909	113.432	152.341	2,9%
Mato Grosso	43	42.417	42.460	0,8%
Goiás	13.330	47.542	60.872	1,2%
Outros	3.703	27.409	31.112	0,6%

Fonte: ABRAF, 2006.

■ 2.2.1. Eucalipto

O eucalipto, introduzido no Brasil em 1904, supre as necessidades de matéria-prima no abastecimento das fábricas de papel e celulose. Apresenta-se como uma espécie vegetal de rápido crescimento e adaptada para as situações edafo-bio climáticas brasileira. O eucalipto teve um crescimento expressivo durante o período dos incentivos fiscais, nas décadas de 60, 70 e perdurou até meados dos anos 80. Esse período foi considerado um marco na silvicultura brasileira dado os efeitos positivos que gerou no setor.

A produtividade do eucalipto, dado o seu rápido crescimento, pode ser considerada como um dos principais fatores que determinaram sua expansão no mercado de papel e celulose e, também, para serraria. Embora a produtividade média anual, considerada em torno de 35 m³ por hectare, seja relativamente baixa, existem plantios com uso de eucaliptos melhor adaptados, com uso de boa tecnologia que atingem rendimentos próximos a 60 m³/ha.ano (DOSSA *et al.*, 2002b)

■ 2.2.2. Pinus

Espécies do gênero *Pinus* foram introduzidas no Brasil, no século XIX, pertencem a família das pináceas e possuem, aproximadamente, 90 espécies. Os principais usos da matéria-prima são para processamento mecânico em serrarias, laminados, aglomerados e de celulose de fibra longa.

O plantio de *Pinus* tem uma relação estreita com os segmentos industriais de processamento mecânico, embora o segmento de celulose e papel seja o principal fornecedor de matéria prima para os demais segmentos. Da produção de *Pinus*, a maior demanda é da indústria de madeira serrada, vindo a seguir, a produção de celulose de fibra longa e compensados. O segmento industrial de papel e celulose passa a utilizar de forma mais intensiva sementes provenientes de cruzamentos controlados, que resultam em ganhos de produtividade, viabilizando a colheita precoce das florestas. O atual nível de produtividade está situado entre 25 m³/ha.ano e 35 m³/ha.ano, em função do tipo de solo e do manejo florestal utilizado (DOSSA *et al.*, 2002a).

Tabela 13 – Área com florestas plantadas de outras espécies
Brasil - 2005

Espécie	ha	Participação
Acácia	178.377	54,7%
Teça	50.000	15,3%
Seringueira	67.964	20,8%
Araucária	24.235	7,4%
Populus	5.600	1,7%
Brasil	326.176	

Fonte: ABRAF, 2006.

3. A produção de resíduos combustíveis da biomassa no Brasil

A utilização dos resíduos da biomassa produzida no Brasil necessitam ainda de avaliações acuradas e precisas do seu potencial de recuperação economicamente viável e de análises completas de seus ciclos de vida como produtos energéticos. Apesar da pouca informação disponível sobre estes parâmetros, decorrente principalmente da ausência, até agora, de interesse de sua utilização como produto energético, os estudos neste sentido começam a ser desenvolvidos de forma mais consistente frente às expectativas da valorização destes resíduos para diversas aplicações sustentáveis.

Neste sentido, a quantificação da geração física de resíduos e de seu conteúdo energético relativamente às quantidades produzidas dos produtos principais são os primeiros passos na avaliação de seu potencial de uso, particularmente para a geração de energia elétrica, que será o tema tratado na Nota Técnica Potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa.

Neste item do trabalho, apresentaremos os coeficientes técnicos de produção física dos resíduos das principais culturas agrícolas e silviculturais produzidas no país, e das principais atividades agroindustriais resultantes da utilização ou beneficiamento de tais produtos, e também as características técnicas de Estimativa do Conteúdo Energético Primário destas fontes de biomassa combustível, de forma a permitir a estimativa do potencial de disponibilização física e de energia primária contidos, apresentados segundo as Unidades da Federação, as Regiões e o País, usando como referência os valores apresentados no item 2. Produção de biomassa no Brasil.

■ 3.1. Resíduos agrícolas

Os resíduos agrícolas compreendem o material resultante das colheitas das culturas e produções agrícolas. E sua retirada do terreno de cultivo para utilização em outros fins deve ser realizada de maneira racional, pois quando permanecem na zona de plantio exercem importante papel agrícola, contribuindo para a proteção dos solos entre os períodos de colheita e novo plantio, retendo a umidade do solo, protegendo a biota, evitando a erosão e restaurando os nutrientes que foram extraídos pela planta.

Estes resíduos são constituídos basicamente das folhas e as hastes das plantas, comumente chamados de palha, e têm um Poder Calorífico Inferior (PCI) médio em torno de 15,7 MJ/kg de matéria em base seca. A energia armazenada em resíduos agrícolas pode ser consideravelmente elevada, representando, em geral, duas vezes mais a contida no produto colhido (NOGUEIRA e LORA, 2002).

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.

A disponibilidade de resíduos agrícolas, para efeito deste trabalho, será estimada com base na produção agrícola das culturas apresentadas no item 2. Produção de biomassa no Brasil, e nos índices de colheita, ou coeficientes de produção de resíduos das colheitas, apresentados para cada uma delas nos itens que se seguem.

■ 3.1.1. Palha da soja

Figura 15 – Grãos de soja na vagem seca



A soja pertence à família das leguminosas e destaca-se por ser muito rica em proteínas, lipídios (fração oleosa), fibras e sais minerais, como também das vitaminas do complexo B, raramente presentes em alimentos de origem vegetal. Os grãos da soja são utilizados para muitos fins, porém, a maior importância da soja no Brasil ainda é para a produção de grandes volumes de farelo para as rações animais e de óleo para a alimentação humana.

A produtividade de grãos é função das condições de clima, tratos culturais e adaptabilidade às regiões e solos, como visto na Figura 5, e no Brasil varia de 1,49 t/ha na Região Sul até 2,74 t/ha na Região Nordeste, sendo a média nacional de 2,21 t/ha.

Em relação aos resíduos agrícolas da soja que permanecem no campo, tratados como palha, KOOP-

MANS e KOPPEJAN (1997) indicam uma produção de $2,5 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{t}_{\text{Soja}}$, com umidade de 15%, equivalente a $2,95 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{t}_{\text{Soja}}$ em base seca¹.

Em seu trabalho, NOGUEIRA e LORA (2002) indicam uma produção de palha entre $3,0 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{ha}$ e $4,0 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{ha}$, com umidade de 88,5%. Convertendo estes números de produção à base seca e utilizando como referência a produtividade média nacional de $2,21 \text{ t}_{\text{Soja}}/\text{ha}$, calculamos uma produção de $3,6 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Soja}}$, valor que adotaremos para avaliações e estimativas nesta Nota Técnica.

Em termos do poder calorífico inferior da palha de soja, o trabalho de KOOPMANS e KOPPEJAN (1997) apresenta o valor de $14,6 \text{ MJ/kg}_{\text{Bbs}}$.

Utilizando os coeficientes técnicos apresentados e a série histórica de produção anual de soja no Brasil, nas Regiões e nas Unidades da Federação, apresentados na Tabela 5, estimamos a produção física dos resíduos da cultura da soja, denominado palha da soja, cujos valores são apresentados na Tabela 14 em milhões de toneladas por ano de biomassa em base seca ($10^6 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{ano}$), e o conteúdo de energia primária na Tabela 15, em milhões de Giga Joules por ano (10^6 GJ/ano). Para auxiliar a comparação dos conteúdos energéticos apresentamos como medida de referência dois parâmetros², que destacamos no pé da tabela:

- A relação energética de 1,0 barril equivalente de petróleo (bep) que representa a Estimativa do Conteúdo Energético Primário de um barril de petróleo de referência que é de 5,95 GJ;
- A relação energética de 1,0 Megawatt-hora (MWh) que é de 3,6 GJ.

1 A partir deste ponto e ao longo desta Nota Técnica adotaremos a notação de tBbs para indicar a massa, em toneladas, de biomassa em base seca. Quando não for utilizada esta notação, significará que a quantidade mássica apresentada contém algum teor de umidade, que será especificado.

2 Estes parâmetros são usados como referências nos itens: resíduos agrícolas, agroindustriais e florestas plantadas listados nesta Nota Técnica.

Tabela 14 – Estimativa da geração de resíduos agrícolas da cultura de soja
Brasil, Regiões e Unidades da Federação – ($10^6 \text{ t}_{\text{BBR}}/\text{ano}$)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	72,36	93,36	116,44	187,26	179,25	185,23
Norte	0,19	0,16	0,54	2,01	3,29	5,06
Roraima	-	-	-	0,03	0,10	0,20
Rondônia	0,06	0,05	0,13	0,44	0,64	0,80
Acre	-	-	-	-	-	-
Amazonas	-	-	-	0,02	0,02	0,03
Amapá	-	-	-	-	-	-
Pará	-	-	0,02	0,16	0,34	0,75
Tocantins	0,14	0,12	0,40	1,36	2,18	3,28
Nordeste	0,96	4,56	7,43	9,07	12,74	14,23
Maranhão	0,02	0,61	1,58	2,36	3,33	3,59
Piauí	0,00	0,09	0,36	1,11	1,43	2,00
Ceará	-	-	-	-	-	-
Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-	-
Paraíba	-	-	-	-	-	-
Pernambuco	-	-	-	-	-	-
Alagoas	0,02	-	-	-	-	-
Sergipe	-	-	-	-	-	-
Bahia	0,92	3,86	5,49	5,60	7,99	8,64
Sudeste	6,64	8,52	9,25	14,64	16,11	16,94
Minas Gerais	3,15	4,28	5,03	8,40	9,57	10,88
Espírito Santo	-	-	-	-	-	-
Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	-
São Paulo	3,49	4,24	4,22	6,25	6,53	6,06
Sul	41,80	43,81	45,41	76,83	58,51	46,06
Paraná	16,46	19,93	25,68	39,50	36,13	34,35
Santa Catarina	2,16	1,75	1,86	2,66	2,36	2,27
Rio Grande do Sul	23,18	22,14	17,87	34,67	20,01	9,44
Centro-Oeste	22,77	36,30	53,80	84,72	88,61	102,94
Mato Grosso do Sul	6,96	8,74	8,37	14,77	11,97	13,38
Mato Grosso	10,44	19,58	30,44	46,62	54,03	63,74
Goiás	5,37	7,99	15,00	23,33	22,61	25,83

Fonte: EPE.

Tabela 15 – Energia primária contida nos resíduos agrícolas da cultura de soja
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10⁶ GJ/ano)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	1.056,5	1.363,1	1.700,0	2.734,0	2.617,1	2.704,3
Norte	2,8	2,4	7,9	29,3	48,0	73,8
Roraima	-	-	-	0,4	1,5	2,9
Rondônia	0,8	0,7	1,9	6,5	9,4	11,7
Acre	-	-	-	-	-	-
Amazonas	-	-	-	0,3	0,3	0,4
Amapá	-	-	-	-	-	-
Pará	-	-	0,3	2,3	5,0	10,9
Tocantins	2,0	1,7	5,8	19,9	31,9	47,9
Nordeste	14,1	66,6	108,5	132,4	186,0	207,8
Maranhão	0,4	8,9	23,1	34,4	48,6	52,4
Piauí	0,0	1,3	5,3	16,2	20,9	29,1
Ceará	-	-	-	-	-	-
Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-	-
Paraíba	-	-	-	-	-	-
Pernambuco	-	-	-	-	-	-
Alagoas	0,2	-	-	-	-	-
Sergipe	-	-	-	-	-	-
Bahia	13,5	56,4	80,1	81,8	116,6	126,2
Sudeste	96,9	124,4	135,1	213,8	235,2	247,3
Minas Gerais	46,0	62,4	73,4	122,6	139,8	158,8
Espírito Santo	-	-	-	-	-	-
Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	-
São Paulo	50,9	61,9	61,6	91,2	95,4	88,5
Sul	610,3	639,7	663,0	1.121,7	854,2	672,4
Paraná	240,3	290,9	375,0	576,6	527,5	501,5
Santa Catarina	31,6	25,5	27,1	38,8	34,5	33,1
Rio Grande do Sul	338,4	323,3	261,0	506,2	292,2	137,8
Centro-Oeste	332,5	530,1	785,5	1.236,9	1.293,7	1.503,0
Mato Grosso do Sul	101,7	127,5	122,1	215,7	174,8	195,3
Mato Grosso	152,5	285,9	444,4	680,6	788,9	930,6
Goiás	78,3	116,6	218,9	340,6	330,1	377,1

Notas: 1,0 barril equivalente de petróleo contém 5,95 Giga Joules de energia (1 bep = 5,95 GJ).

1,0 Megawatt-hora (MWh) equivale a 3,6 GJ.

Fonte: EPE.

■ 3.1.2 Sabugo, colmo, folha e palha do milho

O milho é uma gramínea que pode ser cultivada em qualquer clima, solo ou altura no mundo. É um dos cereais básicos para a nutrição humana e animal. Sua produtividade varia muito com relação à fertilidade de solo e à gerência das colheitas. A produção média para colheitas no Brasil é de 2,87 t/ha, entretanto, varia entre 1,08 t/ha na Região Nordeste até 4,15 t/ha na Região Sudeste, como visto na Figura 7. Usando tecnologias melhoradas é possível obter uma produtividade muito superior à média.

Figura 16 – Milho



A geração de resíduos agrícolas derivados da cultura do milho que permanecem no campo, podem ser divididos em sabugo e colmo, folha e palha, esta última sendo a cobertura da espiga. KOOPMANS e KOPPEJAN (1997) indicam uma produção de $2,2 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{t}_{\text{Milho}}$, com umidade em torno dos 11%, equivalente a $2,3 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Milho}}$.

Em seu trabalho, NOGUEIRA e LORA (2002) indicam uma geração de resíduos da cultura na forma de colmo, sabugo, folha e palha entre $5,0$ e $8,0 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{ha}$, com umidade de 90,5%. Convertendo estes números de produção à base seca e utilizando como referência a produtividade média nacional de $2,87 \text{ t}_{\text{Milho}}/\text{ha}$, calculamos uma produção de $5,0 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Milho}}$, valor que adotaremos para avaliações e estimativas nesta Nota Técnica.

Em termos do 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 $17,7 \text{ MJ/kg}_{\text{Bbs}}$.

Utilizando os coeficientes técnicos apresentados e a série histórica de produção anual de milho no Brasil, nas Regiões e nas Unidades da Federação, apresentados na Tabela 6, estimamos a produção física dos resíduos da cultura do milho, cujos valores são apresentados na Tabela 16 em milhões de toneladas por ano de biomassa em base seca ($10^6 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{ano}$), e o conteúdo de energia primária na Tabela 17, em milhões de Giga Joules por ano ($10^6 \text{ GJ}/\text{ano}$).

Tabela 16 – Estimativa da geração de resíduos agrícolas da cultura de milho
Brasil, Regiões e Unidades da Federação ($10^6 t_{BBV}/ano$)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	120,48	187,21	158,20	237,05	208,94	175,67
Norte	3,12	4,86	5,25	4,90	5,36	5,41
Roraima	0,02	0,08	0,10	0,21	1,20	1,23
Rondônia	1,02	1,91	1,12	0,92	0,34	0,30
Acre	0,24	0,29	0,26	0,25	0,12	0,17
Amazonas	0,03	0,05	0,09	0,08	0,12	0,12
Amapá	-	-	0,01	0,01	2,85	2,80
Pará	1,39	1,98	3,11	2,64	0,00	0,01
Tocantins	0,42	0,56	0,58	0,79	0,72	0,78
Nordeste	10,15	13,40	14,77	16,39	14,49	14,67
Maranhão	1,77	2,11	1,57	2,07	2,04	2,01
Piauí	1,28	2,02	1,16	1,44	0,67	0,96
Ceará	1,93	2,34	3,18	3,75	1,90	1,41
Rio Grande do Norte	0,36	0,42	0,29	0,36	0,30	0,12
Paraíba	0,69	0,78	0,75	0,62	0,36	0,31
Pernambuco	1,16	1,27	0,70	0,41	0,33	0,58
Alagoas	0,29	0,23	0,11	0,09	0,15	0,17
Sergipe	0,35	0,43	0,48	0,67	0,68	1,03
Bahia	2,31	3,79	6,53	7,00	8,05	8,08
Sudeste	40,99	42,06	35,96	50,24	53,77	52,43
Minas Gerais	18,96	20,76	20,69	26,64	29,76	31,22
Espírito Santo	1,44	0,52	0,56	0,72	0,65	0,61
Rio de Janeiro	0,23	0,16	0,16	0,11	0,12	0,13
São Paulo	20,35	20,62	14,55	22,77	23,24	20,47
Sul	43,69	95,01	70,31	115,88	87,85	63,76
Paraná	24,84	45,90	35,19	68,29	54,67	42,86
Santa Catarina	7,82	19,11	16,29	21,17	16,29	13,48
Rio Grande do Sul	11,02	30,00	18,83	26,42	16,88	7,43
Centro-Oeste	22,53	31,88	31,92	49,66	47,47	39,39
Mato Grosso do Sul	4,79	7,38	5,97	15,20	11,87	6,46
Mato Grosso	3,49	6,43	7,34	16,14	17,04	17,53
Goiás	14,24	18,06	18,61	18,32	18,55	15,40

Fonte: EPE.

Tabela 17 – Energia primária contida nos resíduos agrícolas da cultura de milho
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10⁶ GJ/ano)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	2.132,5	3.313,6	2.800,2	4.195,9	3.698,2	3.109,4
Norte	55,2	86,0	93,0	86,7	94,9	95,8
Roraima	0,3	1,4	1,7	3,8	21,3	21,7
Rondônia	18,1	33,8	19,9	16,3	6,0	5,4
Acre	4,3	5,1	4,6	4,4	2,2	3,1
Amazonas	0,6	0,9	1,5	1,4	2,1	2,1
Amapá	-	-	0,1	0,1	50,5	49,5
Pará	24,5	35,1	55,0	46,7	0,1	0,1
Tocantins	7,4	9,8	10,2	14,0	12,7	13,9
Nordeste	179,7	237,2	261,4	290,1	256,5	259,6
Maranhão	31,4	37,4	27,8	36,7	36,2	35,6
Piauí	22,7	35,8	20,5	25,4	11,9	17,0
Ceará	34,2	41,5	56,3	66,3	33,6	24,9
Rio Grande do Norte	6,3	7,4	5,2	6,3	5,4	2,0
Paraíba	12,2	13,9	13,2	10,9	6,5	5,4
Pernambuco	20,5	22,4	12,4	7,3	5,8	10,3
Alagoas	5,2	4,1	2,0	1,6	2,6	3,0
Sergipe	6,2	7,5	8,5	11,8	12,1	18,2
Bahia	41,0	67,1	115,6	123,8	142,5	143,1
Sudeste	725,5	744,5	636,4	889,2	951,7	928,1
Minas Gerais	335,6	367,5	366,3	471,5	526,8	552,6
Espírito Santo	25,6	9,1	9,8	12,8	11,5	10,8
Rio de Janeiro	4,1	2,8	2,9	2,0	2,2	2,4
São Paulo	360,3	365,0	257,5	403,0	411,3	362,3
Sul	773,3	1.681,7	1.244,5	2.051,0	1.554,9	1.128,6
Paraná	439,7	812,4	622,8	1.208,7	967,7	758,7
Santa Catarina	138,5	338,2	288,3	374,8	288,3	238,5
Rio Grande do Sul	195,1	531,1	333,4	467,6	298,9	131,4
Centro-Oeste	398,8	564,2	564,9	878,9	840,2	697,3
Mato Grosso do Sul	84,8	130,7	105,6	269,0	210,1	114,3
Mato Grosso	61,9	113,9	129,8	285,7	301,7	310,3
Goiás	252,1	319,7	329,4	324,3	328,4	272,7

Notas: 1,0 barril equivalente de petróleo contém 5,95 Giga Joules de energia (1 bep = 5,95 GJ).

1,0 Megawatt-hora (MWh) equivale a 3,6 GJ.

Fonte: EPE.

■ 3.1.3. Palha do arroz

O arroz, constituído por duas espécies - *Oryza glaberrima* e *Oryza sativa*, é uma planta da família das gramináceas que alimenta mais da metade da população humana do mundo. 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. Desenvolve-se bem, mesmo em terrenos muito inclinados.

A produtividade do arroz, função das condições de clima, tratos culturais e adaptabilidade às regiões e solos, como visto na Figura 8, no Brasil, varia de 1,53 t/ha na Região Nordeste até 5,85 t/ha na Região Sul, sendo a média nacional de 3,38 t/ha.

Em relação aos resíduos agrícolas da produção de arroz que permanecem no campo, encontra-se a palha, para a qual KOOPMANS e KOPPEJAN (1997) indicam uma produção de $1,76 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{t}_{\text{Arroz}}$, com umidade de 12%, equivalente a $2,05 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Arroz}}$.

Figura 17 – Arroz



No estudo de NOGUEIRA e LORA (2002), está indicada uma produção de palha de arroz entre $4,0 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{ha}$ e $6,0 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{ha}$, com umidade de 13 %. Convertendo estes números de produção à base seca e utilizando como referência a produtividade média nacional de $3,38 \text{ t}_{\text{Arroz}}/\text{ha}$, calculamos uma produção de $4,3 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Arroz}}$, valor que adotaremos para avaliações e estimativas nesta Nota Técnica. O poder calorífico inferior da palha de arroz indicado por KOOPMANS e KOPPEJAN (1997) é de $16,0 \text{ MJ/kg}_{\text{Bbs}}$.

Utilizando os coeficiente técnicos apresentados e a série histórica de produção anual de arroz no Brasil, nas Regiões e nas Unidades da Federação, apresentados na Tabela 7, estimamos a produção física dos resíduos da cultura do arroz, denominados palha, cujos valores são apresentados na Tabela 18, em milhões de toneladas por ano de biomassa em base seca ($10^6 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{ano}$), e o conteúdo de energia primária na Tabela 19, em milhões de Giga Joules por ano (10^6 GJ/ano).

Tabela 18 – Estimativa da geração de resíduos agrícolas da cultura de arroz - palha
Brasil, Regiões e Unidades da Federação ($10^6 t_{\text{Bb}}/\text{ano}$)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	34,26	48,32	49,12	44,58	55,17	56,88
Norte	2,60	4,77	4,95	5,42	5,72	6,58
Roraima	0,05	0,21	0,22	0,46	0,58	0,58
Rondônia	0,61	1,11	0,82	0,50	0,72	0,96
Acre	0,19	0,22	0,14	0,14	0,16	0,15
Amazonas	0,01	0,03	0,13	0,10	0,10	0,10
Amapá	0,00	0,00	0,00	0,02	0,02	0,02
Pará	0,63	1,42	1,95	2,39	2,33	2,76
Tocantins	1,11	1,78	1,69	1,83	1,82	2,01
Nordeste	3,61	7,35	5,75	4,84	5,02	5,38
Maranhão	1,78	3,98	3,08	3,04	3,10	3,09
Piauí	0,59	1,72	1,08	0,85	0,72	1,00
Ceará	0,55	0,86	0,73	0,43	0,40	0,44
Rio Grande do Norte	0,02	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01
Paraíba	0,09	0,08	0,06	0,05	0,06	0,02
Pernambuco	0,13	0,08	0,08	0,07	0,22	0,21
Alagoas	0,13	0,12	0,14	0,05	0,05	0,06
Sergipe	0,17	0,06	0,16	0,18	0,17	0,18
Bahia	0,16	0,42	0,40	0,13	0,27	0,38
Sudeste	4,55	4,07	1,88	1,34	1,45	1,63
Minas Gerais	2,51	2,60	1,25	0,82	0,91	1,10
Espírito Santo	0,44	0,29	0,08	0,03	0,04	0,05
Rio de Janeiro	0,19	0,22	0,06	0,04	0,04	0,04
São Paulo	1,40	0,96	0,49	0,45	0,45	0,44
Sul	19,35	25,86	26,10	25,46	32,15	31,84
Paraná	1,10	0,95	0,76	0,78	0,75	0,65
Santa Catarina	2,43	3,10	3,46	4,49	4,30	4,51
Rio Grande do Sul	15,82	21,80	21,88	20,19	27,10	26,68
Centro-Oeste	4,14	6,27	10,44	7,52	10,83	11,44
Mato Grosso do Sul	0,72	1,01	1,08	1,02	1,03	1,02
Mato Grosso	1,83	3,27	8,13	5,55	8,31	8,79
Goiás	1,59	1,99	1,23	0,95	1,48	1,64

Fonte: EPE.

Tabela 19 – Energia primária contida nos resíduos agrícolas da cultura de arroz - palha
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10⁶GJ/ano)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	548,19	773,17	785,91	713,26	882,66	910,05
Norte	41,67	76,30	79,18	86,79	91,54	105,25
Roraima	0,74	3,41	3,52	7,32	9,21	9,30
Rondônia	9,82	17,74	13,04	7,96	11,44	15,29
Acre	2,99	3,45	2,23	2,24	2,60	2,45
Amazonas	0,16	0,44	2,12	1,60	1,60	1,62
Amapá	0,02	0,05	0,07	0,25	0,26	0,28
Pará	10,10	22,79	31,23	38,17	37,25	44,12
Tocantins	17,83	28,42	26,97	29,25	29,18	32,19
Nordeste	57,73	117,61	92,00	77,39	80,38	86,12
Maranhão	28,50	63,72	49,35	48,63	49,54	49,40
Piauí	9,49	27,47	17,32	13,60	11,53	16,06
Ceará	8,81	13,76	11,63	6,85	6,35	6,98
Rio Grande do Norte	0,26	0,32	0,12	0,49	0,55	0,22
Paraíba	1,40	1,28	1,02	0,74	0,91	0,36
Pernambuco	2,02	1,36	1,35	1,20	3,56	3,37
Alagoas	2,02	1,96	2,22	0,83	0,82	0,89
Sergipe	2,69	1,04	2,58	2,94	2,78	2,81
Bahia	2,53	6,71	6,41	2,10	4,34	6,04
Sudeste	72,84	65,19	30,13	21,44	23,19	26,12
Minas Gerais	40,23	41,67	20,00	13,18	14,61	17,63
Espírito Santo	7,11	4,69	1,28	0,55	0,70	0,80
Rio de Janeiro	3,03	3,54	1,00	0,58	0,61	0,70
São Paulo	22,47	15,29	7,86	7,12	7,27	6,99
Sul	309,65	413,70	417,53	407,30	514,36	509,49
Paraná	17,57	15,25	12,17	12,41	12,01	10,34
Santa Catarina	38,90	49,64	55,32	71,78	68,79	72,23
Rio Grande do Sul	253,18	348,82	350,05	323,11	433,56	426,92
Centro-Oeste	66,31	100,38	167,06	120,34	173,20	183,06
Mato Grosso do Sul	11,58	16,22	17,30	16,35	16,51	16,25
Mato Grosso	29,23	52,29	130,09	88,72	132,94	140,58
Goiás	25,50	31,87	19,68	15,27	23,76	26,24

Notas: 1,0 barril equivalente de petróleo contém 5,95 Giga Joules de energia (1 bep = 5,95 GJ).

1,0 Megawatt-hora (MWh) equivale a 3,6 GJ.

Fonte: EPE.

■ 3.1.4. Folhas e ponteiros da cana-de-açúcar

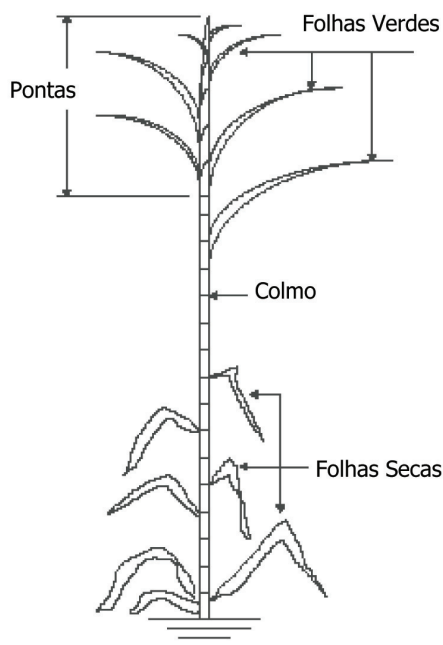
A produção de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) é uma das atividades agrícolas mais importantes e tradicionais da agricultura em diversos países tropicais. Trata-se de uma planta herbácea, cespitosa e perene, da família das gramíneas, que necessita de solo profundo e fértil, uma precipitação pluviométrica mínima bem-distribuída que varia de 1.200 a 1.300 mm/ano e temperaturas entre 20 e 24°C, e não tolera geadas. É conveniente colhê-la apenas durante certos períodos do ano por causa de seu índice máximo do açúcar.

Em geral, após a primeira colheita, a cana-de-açúcar crescerá outra vez produzindo outras 4 ou 5 colheitas anuais com a produtividade diminuindo. Na média, durante todo um ciclo da produção a produtividade varia de 50 a 100 t/ha.ano de acordo com as práticas agrícola que forem adotadas. No Brasil, a cana-de-açúcar pode ser produzida em quase todas as partes do país, especialmente entre os paralelos 8° a 24°. Como

pode ser visto na Figura 11, a produtividade varia entre 52,5 t/ha na Região Nordeste e 81,6 t/ha na Região Sudeste, sendo a média nacional de 73,9 t/ha.

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 pré-colheita, a altura dos ponteiros, a variedade da cultivar 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.

Figura 18 – Estrutura da planta cana-de-açúcar e a biomassa residual produzida



Para excluir os efeitos das condições de colheita na estimativa de resíduos produzidos pela cultura da cana-de-açúcar, tradicionalmente denominada palha, constituída pelas folhas e ponteiros da planta, HASSUANI *et al.* (2005) conduziram um experimento de campo na região canavieira de São Paulo, com diferentes cultivares, e apresentam no capítulo 1 do referido estudo resultados que indicam uma média de produção de palha na cultura da cana-de-açúcar corresponde, em base seca, a 14,1 % do peso da produção bruta de colmos, com um desvio médio de 2,0 %, equivalente a $0,141 \pm 0,02 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Cana}}$.

Como conclusão deste capítulo do estudo, os autores destacam que a introdução freqüente de novas variedades de cana-de-açúcar, com rendimento desconhecido dos resíduos, e as dificuldades de sua correlação com a produção de colmos, conduzem à adoção do valor médio da matéria seca de $140 \text{ kg}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Cana}}$ para estimar os resíduos secos potenciais da cultura da cana-de-açúcar, denominados palha, que adotaremos em nosso trabalho.

No que concerne às características físico-químicas dos resíduos da cultura da cana-de-açúcar, tratadas por HASSUANI *et al.* (2005) no capítulo 2 de seu estudo, o poder calorífico superior das folhas secas e das

folhas verdes foi determinado como 17,4 MJ/kg_{Bbs}, e dos ponteiros em 16,4 MJ/kg_{Bbs}, perfazendo uma média de 17,1 MJ/kg_{Bbs}. Considerando as perdas e outros estudos tomados como referência (COPERSUCAR 05, 1999), adotaremos neste estudo o poder calorífico inferior de 16,0 MJ/kg_{Bbs}.

Utilizando os coeficientes técnicos apresentados e a série histórica de produção anual de cana-de-açúcar no Brasil, nas Regiões e nas Unidades da Federação, apresentados na Tabela 8, estimamos a produção física dos resíduos da cultura da cana, denominados palha, cujos valores são apresentados na Tabela 20, em milhões de toneladas por ano de biomassa em base seca (10^6 t_{Bbs}/ano), e o conteúdo de energia primária na Tabela 21, em milhões de Giga Joules por ano (10^6 GJ/ano).

Tabela 20 – Estimativa da geração de resíduos agrícolas da cultura de cana-de-açúcar - palha
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10^6 t_{Bbs}/ano)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	36,78	42,52	45,66	55,44	58,13	60,39
Norte	0,11	0,10	0,12	0,12	0,13	0,15
Roraima	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00
Rondônia	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00
Acre	0,02	0,01	0,03	0,05	0,03	0,04
Amazonas	-	-	-	-	0,00	0,00
Amapá	0,05	0,06	0,06	0,05	0,07	0,08
Pará	-	-	-	-	0,00	0,00
Tocantins	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03
Nordeste	10,04	8,49	8,44	8,92	9,17	7,92
Maranhão	0,29	0,19	0,16	0,24	0,23	0,28
Piauí	0,22	0,13	0,06	0,07	0,07	0,09
Ceará	0,38	0,28	0,26	0,25	0,25	0,25
Rio Grande do Norte	0,35	0,33	0,24	0,45	0,46	0,37
Paraíba	1,16	0,91	0,54	0,86	0,89	0,67
Pernambuco	3,19	2,89	2,29	2,63	2,66	2,37
Alagoas	3,66	3,02	3,98	3,52	3,68	3,24
Sergipe	0,31	0,17	0,19	0,21	0,24	0,20
Bahia	0,48	0,56	0,72	0,69	0,69	0,47
Sudeste	22,74	28,15	30,01	36,71	38,72	42,68
Minas Gerais	2,45	2,34	2,69	2,97	3,41	3,86
Espírito Santo	0,21	0,29	0,34	0,54	0,57	0,59
Rio de Janeiro	0,78	1,02	1,02	1,03	1,21	1,06
São Paulo	19,30	24,49	25,97	32,17	33,53	37,17
Sul	1,91	3,04	3,39	4,66	4,80	4,20
Paraná	1,64	2,86	3,18	4,40	4,57	3,99
Santa Catarina	0,14	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08
Rio Grande do Sul	0,13	0,12	0,14	0,16	0,14	0,13
Centro-Oeste	1,98	2,74	3,70	5,03	5,30	5,43
Mato Grosso do Sul	0,59	0,69	0,89	1,30	1,34	1,37
Mato Grosso	0,43	0,97	1,41	1,93	2,00	1,88
Goiás	0,97	1,08	1,39	1,80	1,96	2,18

Fonte: EPE.

Tabela 21 – Energia primária contida nos resíduos agrícolas da cultura de cana-de-açúcar - palha
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10⁶ GJ/ano)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	588,40	680,29	730,51	887,07	930,06	966,30
Norte	1,76	1,62	1,89	1,96	2,14	2,41
Roraima	0,05	0,04	-	-	0,07	0,07
Rondônia	0,04	0,04	-	-	0,05	0,06
Acre	0,26	0,12	0,51	0,77	0,53	0,59
Amazonas	-	-	-	-	0,00	0,00
Amapá	0,87	0,95	1,04	0,83	1,13	1,27
Pará	-	-	-	-	0,00	0,01
Tocantins	0,53	0,48	0,35	0,36	0,36	0,40
Nordeste	160,58	135,88	134,98	142,78	146,72	126,78
Maranhão	4,57	3,06	2,55	3,87	3,70	4,41
Piauí	3,50	2,03	0,91	1,08	1,17	1,38
Ceará	6,10	4,55	4,12	3,96	3,95	3,97
Rio Grande do Norte	5,58	5,23	3,87	7,17	7,30	5,91
Paraíba	18,55	14,61	8,58	13,82	14,26	10,67
Pernambuco	51,11	46,29	36,64	42,14	42,59	37,95
Alagoas	58,58	48,32	63,64	56,34	58,88	51,77
Sergipe	4,89	2,78	3,11	3,32	3,80	3,18
Bahia	7,70	9,01	11,54	11,08	11,07	7,54
Sudeste	363,87	450,36	480,24	587,32	619,57	682,95
Minas Gerais	39,27	37,47	43,03	47,48	54,50	61,73
Espírito Santo	3,36	4,64	5,46	8,61	9,14	9,51
Rio de Janeiro	12,49	16,34	16,30	16,46	19,38	16,97
São Paulo	308,75	391,91	415,45	514,77	536,54	594,75
Sul	30,53	48,58	54,25	74,56	76,77	67,23
Paraná	26,29	45,76	50,88	70,46	73,12	63,85
Santa Catarina	2,19	0,96	1,17	1,52	1,35	1,35
Rio Grande do Sul	2,05	1,86	2,20	2,58	2,30	2,03
Centro-Oeste	31,66	43,85	59,15	80,45	84,86	86,93
Mato Grosso do Sul	9,39	11,03	14,30	20,77	21,44	21,95
Mato Grosso	6,80	15,56	22,54	30,85	32,01	30,15
Goiás	15,46	17,27	22,30	28,83	31,41	34,83

Notas: 1,0 barril equivalente de petróleo contém 5,95 Giga Joules de energia (1 bep = 5,95 GJ).

1,0 Megawatt-hora (MWh) equivale a 3,6 GJ.

Fonte: EPE.

■ 3.2. Resíduos agroindustriais

A biomassa energética produzida como resíduo agroindustrial é composta por biocombustíveis gerados em unidades industriais que processam culturas agrícolas alimentares ou agroenergéticas. No Brasil os principais resíduos agroindustriais que se mostram apropriados para pronto aproveitamento, são aqueles gerados no setor sucroalcooleiro, como resultado do processamento da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol, na indústria de celulose, resultante do processamento da madeira para a produção de pasta celulósica, e na indústria de beneficiamento de arroz, que tem como material residual a casca do cereal.

■ 3.2.1. Bagaço da cana-de-açúcar

O bagaço de cana é a principal biomassa residual do processamento industrial da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol, a se apresenta como um material constituído por fibras celulósicas moídas, tradicionalmente denominado bagaço.

O colmo da cana-de-açúcar contém a matéria prima básica necessária para a produção de açúcar e etanol, a glicose, e sua obtenção para processamento se faz na moagem, um processo de extração do caldo em que o colmo da cana passa entre dois rolos, com uma pressão pré-estabelecida aplicada a eles. Na moenda, não ocorre só a extração do caldo, mas também a separação da parcela fibrosa do colmo, extraíndo açúcares com eficiência que varia de 94 a 97,5%, e produzindo ao final do processo um bagaço com umidade em torno de 50%.

Figura 19 – Pátio de manejo do bagaço de cana em usina do setor sucroalcooleiro



A quantidade de bagaço produzida após a moagem depende fundamentalmente da matéria-prima recebida na moenda, ou seja, do colmo de cana-de-açúcar, cujas características físico-químicas variam, assim como a palha da cana-de-açúcar, segundo fatores como a variedade da cultivar 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.

Em média, o bagaço da cana-de-açúcar corresponde, em base seca, a 12,5 % e 15,0 % do peso da produção bruta de colmos, equivalente a $0,125$ e $0,150 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Cana}}$ (COPERSUCAR 03, 1998), sendo que seu poder calorífico inferior pode variar entre $16,7 \text{ MJ/kg}_{\text{Bbs}}$ e $17,2 \text{ MJ/kg}_{\text{Bbs}}$ (COPERSUCAR 05, 1999). Neste estudo adotaremos a produção de $0,135 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Cana}}$ de biomassa residual da cultura da cana-de-açúcar e o poder calorífico inferior de $17,0 \text{ MJ/kg}_{\text{Bbs}}$.

Figura 20 - Usina de produção de etanol e pátio de bagaço de cana-de-açúcar

Tabela 22 – Estimativa da geração de resíduos agroindustriais da produção de açúcar e etanol de cana-de-açúcar - bagaço
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10⁶ t/ano)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	35,46	41,00	44,03	53,46	56,05	58,24
Norte	0,11	0,10	0,11	0,12	0,13	0,15
Roraima	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00
Rondônia	0,00	0,00	-	-	0,00	0,00
Acre	0,02	0,01	0,03	0,05	0,03	0,04
Amazonas	-	-	-	-	0,00	0,00
Amapá	0,05	0,06	0,06	0,05	0,07	0,08
Pará	-	-	-	-	0,00	0,00
Tocantins	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
Nordeste	9,68	8,19	8,13	8,61	8,84	7,64
Maranhão	0,28	0,18	0,15	0,23	0,22	0,27
Piauí	0,21	0,12	0,05	0,07	0,07	0,08
Ceará	0,37	0,27	0,25	0,24	0,24	0,24
Rio Grande do Norte	0,34	0,32	0,23	0,43	0,44	0,36
Paraíba	1,12	0,88	0,52	0,83	0,86	0,64
Pernambuco	3,08	2,79	2,21	2,54	2,57	2,29
Alagoas	3,53	2,91	3,84	3,40	3,55	3,12
Sergipe	0,29	0,17	0,19	0,20	0,23	0,19
Bahia	0,46	0,54	0,70	0,67	0,67	0,45
Sudeste	21,93	27,14	28,94	35,40	37,34	41,16
Minas Gerais	2,37	2,26	2,59	2,86	3,28	3,72
Espírito Santo	0,20	0,28	0,33	0,52	0,55	0,57
Rio de Janeiro	0,75	0,98	0,98	0,99	1,17	1,02
São Paulo	18,61	23,62	25,04	31,02	32,34	35,84
Sul	1,84	2,93	3,27	4,49	4,63	4,05
Paraná	1,58	2,76	3,07	4,25	4,41	3,85
Santa Catarina	0,13	0,06	0,07	0,09	0,08	0,08
Rio Grande do Sul	0,12	0,11	0,13	0,16	0,14	0,12
Centro-Oeste	1,91	2,64	3,56	4,85	5,11	5,24
Mato Grosso do Sul	0,57	0,66	0,86	1,25	1,29	1,32
Mato Grosso	0,41	0,94	1,36	1,86	1,93	1,82
Goiás	0,93	1,04	1,34	1,74	1,89	2,10

Fonte: EPE.

Utilizando os coeficientes técnicos apresentados e a série histórica de produção anual de cana-de-açúcar no Brasil, nas Regiões e nas Unidades da Federação, apresentados na Tabela 8, estimamos a produção física dos resíduos agroindustriais do processamento da cana-de-açúcar para a produção de açúcar e etanol, denominado bagaço, cujos valores são apresentados na Tabela 22, em milhões de toneladas por ano de biomassa em base seca ($10^6 t_{Bbs}/ano$), e o conteúdo de energia primária na Tabela 23, em milhões de Giga Joules por ano ($10^6 GJ/ano$).

Tabela 23 – Estimativa do conteúdo energético primário dos resíduos agroindustriais da produção de açúcar e etanol de cana-de-açúcar - bagaço
Brasil, Regiões e Unidades da Federação ($10^6 GJ/ano$)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	602,8	697,0	748,4	908,8	952,9	990,0
Norte	1,8	1,7	1,9	2,0	2,2	2,5
Roraima	0,1	0,0	-	-	0,1	0,1
Rondônia	0,0	0,0	-	-	0,1	0,1
Acre	0,3	0,1	0,5	0,8	0,5	0,6
Amazonas	-	-	-	-	0,0	0,0
Amapá	0,9	1,0	1,1	0,9	1,2	1,3
Pará	-	-	-	-	0,0	0,0
Tocantins	0,5	0,5	0,4	0,4	0,4	0,4
Nordeste	164,5	139,2	138,3	146,3	150,3	129,9
Maranhão	4,7	3,1	2,6	4,0	3,8	4,5
Piauí	3,6	2,1	0,9	1,1	1,2	1,4
Ceará	6,3	4,7	4,2	4,1	4,0	4,1
Rio Grande do Norte	5,7	5,4	4,0	7,3	7,5	6,1
Paraíba	19,0	15,0	8,8	14,2	14,6	10,9
Pernambuco	52,4	47,4	37,5	43,2	43,6	38,9
Alagoas	60,0	49,5	65,2	57,7	60,3	53,0
Sergipe	5,0	2,9	3,2	3,4	3,9	3,3
Bahia	7,9	9,2	11,8	11,3	11,3	7,7
Sudeste	372,8	461,4	492,0	601,7	634,8	699,7
Minas Gerais	40,2	38,4	44,1	48,6	55,8	63,2
Espírito Santo	3,4	4,8	5,6	8,8	9,4	9,7
Rio de Janeiro	12,8	16,7	16,7	16,9	19,9	17,4
São Paulo	316,3	401,5	425,6	527,4	549,7	609,4
Sul	31,3	49,8	55,6	76,4	78,7	68,9
Paraná	26,9	46,9	52,1	72,2	74,9	65,4
Santa Catarina	2,2	1,0	1,2	1,6	1,4	1,4
Rio Grande do Sul	2,1	1,9	2,3	2,6	2,4	2,1
Centro-Oeste	32,4	44,9	60,6	82,4	86,9	89,1
Mato Grosso do Sul	9,6	11,3	14,7	21,3	22,0	22,5
Mato Grosso	7,0	15,9	23,1	31,6	32,8	30,9
Goiás	15,8	17,7	22,9	29,5	32,2	35,7

Notas: 1,0 barril equivalente de petróleo contém 5,95 Giga Joules de energia (1 bep = 5,95 GJ).

1,0 Megawatt-hora (MWh) equivale a 3,6 GJ.

Fonte: EPE.

■ 3.2.2. Casca do arroz

No beneficiamento do arroz ocorre a retirada de sua casca e este resíduo industrial se apresenta em quantidades $0,267 t_{Biomassa}/t_{Arroz}$ segundo KOOPMANS e KOPPEJAN (1997), com 2,4 % de umidade e poder calorífico inferior de $16,6 MJ/kg_{Bbs}$. Já o estudo de NOGUEIRA e LORA (2002), indica uma produção de casca de arroz em

torno de $0,18 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Arroz}}$ e poder calorífico inferior de $16,0 \text{ MJ/kg}_{\text{Bbs}}$, valores que adotaremos para avaliações e estimativas nesta Nota Técnica.

Utilizando os coeficientes técnicos apresentados e a série histórica de produção anual de arroz no Brasil, nas Regiões e nas Unidades da Federação, apresentados na Tabela 7, estimamos a produção física dos resíduos agroindustriais do beneficiamento do arroz, denominado casca, cujos valores são apresentados na Tabela 24, em milhões de toneladas por ano de biomassa em base seca ($10^6 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{ano}$), e o conteúdo de energia primária na Tabela 25, em milhões de Giga Joules por ano (10^6 GJ/ano).

Tabela 24 – Estimativa da geração de resíduos agroindustriais do beneficiamento da cultura de arroz - casca
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10^6 t/ano)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	1,434	2,023	2,056	1,866	2,309	2,381
Norte	0,109	0,200	0,207	0,227	0,239	0,275
Roraima	0,002	0,009	0,009	0,019	0,024	0,024
Rondônia	0,026	0,046	0,034	0,021	0,030	0,040
Acre	0,008	0,009	0,006	0,006	0,007	0,006
Amazonas	0,000	0,001	0,006	0,004	0,004	0,004
Amapá	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001
Pará	0,026	0,060	0,082	0,100	0,097	0,115
Tocantins	0,047	0,074	0,071	0,077	0,076	0,084
Nordeste	0,151	0,308	0,241	0,202	0,210	0,225
Maranhão	0,075	0,167	0,129	0,127	0,130	0,129
Piauí	0,025	0,072	0,045	0,036	0,030	0,042
Ceará	0,023	0,036	0,030	0,018	0,017	0,018
Rio Grande do Norte	0,001	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001
Paraíba	0,004	0,003	0,003	0,002	0,002	0,001
Pernambuco	0,005	0,004	0,004	0,003	0,009	0,009
Alagoas	0,005	0,005	0,006	0,002	0,002	0,002
Sergipe	0,007	0,003	0,007	0,008	0,007	0,007
Bahia	0,007	0,018	0,017	0,005	0,011	0,016
Sudeste	0,191	0,171	0,079	0,056	0,061	0,068
Minas Gerais	0,105	0,109	0,052	0,034	0,038	0,046
Espírito Santo	0,019	0,012	0,003	0,001	0,002	0,002
Rio de Janeiro	0,008	0,009	0,003	0,002	0,002	0,002
São Paulo	0,059	0,040	0,021	0,019	0,019	0,018
Sul	0,810	1,082	1,092	1,066	1,346	1,333
Paraná	0,046	0,040	0,032	0,032	0,031	0,027
Santa Catarina	0,102	0,130	0,145	0,188	0,180	0,189
Rio Grande do Sul	0,662	0,913	0,916	0,845	1,134	1,117
Centro-Oeste	0,173	0,263	0,437	0,315	0,453	0,479
Mato Grosso do Sul	0,030	0,042	0,045	0,043	0,043	0,043
Mato Grosso	0,076	0,137	0,340	0,232	0,348	0,368
Goias	0,067	0,083	0,051	0,040	0,062	0,069

Fonte: EPE.

Tabela 25 - Estimativa do conteúdo energético primário dos resíduos agroindustriais do beneficiamento da cultura de arroz - casca
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10⁶ GJ/ano)

	1990	1995	2000	2003	2004	2005
Brasil	22,95	32,37	32,90	29,86	36,95	38,10
Norte	1,74	3,19	3,31	3,63	3,83	4,41
Roraima	0,03	0,14	0,15	0,31	0,39	0,39
Rondônia	0,41	0,74	0,55	0,33	0,48	0,64
Acre	0,13	0,14	0,09	0,09	0,11	0,10
Amazonas	0,01	0,02	0,09	0,07	0,07	0,07
Amapá	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01
Pará	0,42	0,95	1,31	1,60	1,56	1,85
Tocantins	0,75	1,19	1,13	1,22	1,22	1,35
Nordeste	2,42	4,92	3,85	3,24	3,36	3,61
Maranhão	1,19	2,67	2,07	2,04	2,07	2,07
Piauí	0,40	1,15	0,73	0,57	0,48	0,67
Ceará	0,37	0,58	0,49	0,29	0,27	0,29
Rio Grande do Norte	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01
Paraíba	0,06	0,05	0,04	0,03	0,04	0,02
Pernambuco	0,08	0,06	0,06	0,05	0,15	0,14
Alagoas	0,08	0,08	0,09	0,03	0,03	0,04
Sergipe	0,11	0,04	0,11	0,12	0,12	0,12
Bahia	0,11	0,28	0,27	0,09	0,18	0,25
Sudeste	3,05	2,73	1,26	0,90	0,97	1,09
Minas Gerais	1,68	1,74	0,84	0,55	0,61	0,74
Espírito Santo	0,30	0,20	0,05	0,02	0,03	0,03
Rio de Janeiro	0,13	0,15	0,04	0,02	0,03	0,03
São Paulo	0,94	0,64	0,33	0,30	0,30	0,29
Sul	12,96	17,32	17,48	17,05	21,53	21,33
Paraná	0,74	0,64	0,51	0,52	0,50	0,43
Santa Catarina	1,63	2,08	2,32	3,00	2,88	3,02
Rio Grande do Sul	10,60	14,60	14,65	13,53	18,15	17,87
Centro-Oeste	2,78	4,20	6,99	5,04	7,25	7,66
Mato Grosso do Sul	0,48	0,68	0,72	0,68	0,69	0,68
Mato Grosso	1,22	2,19	5,45	3,71	5,56	5,88
Goiás	1,07	1,33	0,82	0,64	0,99	1,10

Notas: 1,0 barril equivalente de petróleo contém 5,95 Giga Joules de energia (1 bep = 5,95 GJ).

1,0 Megawatt-hora (MWh) equivale a 3,6 GJ.

Fonte: EPE.

■ 3.2.3. Lixívia e resíduos de madeira

Na produção da pasta celulósica para a indústria de papel, a madeira é a matéria-prima utilizada, digerida através de um processo de cozimento chamado processo Kraft, que consiste em tratar os cavacos de madeira, a certa temperatura, pressão e tempo, com uma mistura de hidróxido de sódio e sulfito de sódio, comumente chamada de licor branco. O cozimento é interrompido quando se atinge o ponto de máxima dissolução de material não celulósico, composto principalmente de lignina e extrativos, sem comprometer a qualidade e o rendimento da celulose.

Esta tecnologia de separação da celulose da matéria-prima lenhosa por meio de produtos químicos gera, como subproduto, uma lixívia escura, também conhecida como licor negro. Este efluente é concentrado até um teor de sólidos entre 60 % e 80 %, quando então é queimado em uma caldeira de recuperação química,

liberando calor e sais inorgânicos. Estes sais são misturados com água resultando o licor verde, que por um processo de caustificação permite a recuperação dos produtos químicos iniciais (hidróxido de sódio/sulfito de sódio), que retornam novamente ao processo para a separação da celulose, fechando o ciclo.

A concentração e a queima do licor negro são etapas necessárias ao processo, e a liberação do calor na caldeira de recuperação química, caldeira de lixívia ou licor negro, proporciona o atendimento da demanda térmica do processo e de parte da sua demanda por energia elétrica. A lixívia apresenta, um poder calorífico que varia segundo a concentração, sendo de cerca de 13,4 MJ/kg com 75% de concentração, conforme MUNIZ e ANDRADE (1999), com uma taxa de produção entre 1,0 e 1,4 kg de lixívia concentrada por kg de celulose produzida.

Em sua tese de mestrado, VELÁZQUEZ (2000) apresenta um conjunto de informações obtidas junto a 6 fabricantes de pasta celulósica e papel, do qual se apreende uma taxa de produção média de 1,28 kg de lixívia concentrada por kg de celulose produzida, com um desvio médio de $0,2 \frac{t_{\text{lixívia}}}{t_{\text{Celulose}}}$, com poder calorífico médio de 12,15 MJ/kg, e desvio médio de 1,30 MJ/kg, portanto variando entre 10,9 MJ/kg e 13,5 MJ/kg, com referência de concentração entre 60 e 70%. CLEMENT *et al.* (1995) referem-se ao licor negro com concentração entre 70% e 72% de resíduos sólidos, contendo entre 13,4 MJ/kg e 14,2 MJ/kg.

Além da lixívia, ou licor negro, efluente combustível inerente ao processo de fabricação da celulose, o setor conta com outros insumos energéticos agregados como cascas, lascas e resíduos de madeira, e cavacos de lenha, que são utilizados como combustíveis complementares para atender às necessidades energéticas do processo.

Os resíduos sólidos gerados nas fabricas de celulose e papel dependem das características do processo e das técnicas de reaproveitamento empregadas, que afetam significativamente a sua quantidade. Podem variar muito de uma unidade fabril para outra, mesmo nos casos em que os produtos finais sejam semelhantes. Os principais resíduos de interesse gerados são o resíduo do manuseio de madeira e refugos de cavacos nas peneiras classificatórias. Do conjunto de informações de 6 fabricantes de pasta celulósica e papel apresentado por VELÁZQUEZ (2000), a quantidade média de resíduos desta natureza é de $595 \frac{\text{kg}_{\text{Bbs}}}{t_{\text{Celulose}}}$, com desvio médio de $115 \frac{\text{kg}_{\text{Bbs}}}{t_{\text{Celulose}}}$, portanto variando entre $475 \frac{\text{kg}_{\text{Bbs}}}{t_{\text{Celulose}}}$ e $715 \frac{\text{kg}_{\text{Bbs}}}{t_{\text{Celulose}}}$. Em termos do poder calorífico médio destes resíduos, o trabalho indica 12,6 MJ/kg_{Bbs}, e desvio médio de 1,2 MJ/kg_{Bbs}, portanto variando entre 11,4 MJ/kg_{Bbs} e 13,8 MJ/kg_{Bbs}.

Tabela 26 – Série histórica de produção de celulose ⁽¹⁾
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10³ t/ano)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005 ⁽²⁾
Brasil ⁽³⁾	7.463	7.412	8.021	9.069	9.620	10.352
Norte	277,9	276,0	298,7	337,7	358,2	385,5
Roraima	-	-	-	-	-	-
Rondônia	-	-	-	-	-	-
Acre	-	-	-	-	-	-
Amazonas	-	-	-	-	-	-
Amapá	-	-	-	-	-	-
Pará	277,9	276,0	298,7	337,7	358,2	385,5
Tocantins	-	-	-	-	-	-
Nordeste	783,3	777,9	841,8	951,8	1.009,6	1.086,4
Maranhão	41,8	41,5	44,9	50,7	53,8	57,9
Piauí	-	-	-	-	-	-
Ceará	-	-	-	-	-	-
Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-	-
Paraíba	-	-	-	-	-	-
Pernambuco	20,2	20,0	21,7	24,5	26,0	28,0
Alagoas	-	-	-	-	-	-
Sergipe	-	-	-	-	-	-
Bahia	721,3	716,4	775,3	876,6	929,8	1.000,6
Sudeste	4.572,9	4.541,5	4.914,7	5.557,0	5.894,5	6.342,9
Minas Gerais	1.654,1	1.642,7	1.777,7	2.010,0	2.132,1	2.294,3
Espírito Santo	709,9	705,0	763,0	862,7	915,1	984,7
Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	-
São Paulo	2.209,0	2.193,8	2.374,1	2.684,3	2.847,4	3.064,0
Sul	1.829,1	1.816,6	1.965,9	2.222,7	2.357,8	2.537,1
Paraná	745,4	740,3	801,1	905,8	960,8	1.033,9
Santa Catarina	341,0	338,6	366,5	414,3	439,5	472,9
Rio Grande do Sul	742,8	737,7	798,3	902,6	957,4	1.030,3
Centro-Oeste	-	-	-	-	-	-
Mato Grosso do Sul	-	-	-	-	-	-
Mato Grosso	-	-	-	-	-	-
Goiás	-	-	-	-	-	-

Notas: (1) Químicas e semiquímicas, de fibra longa e curta, branqueadas e não branqueadas, e pastas de alto rendimento.

(2) Valores segmentados por Unidade da Federação apresentados em VALOR (2006).

(3) Valores segmentados por Unidade da Federação para 2000 a 2004 mantendo-se a proporção do ano de 2005, a partir dos dados de BRACELPA (2006a).

Fonte: BRACELPA, 2006a, BRACELPA, 2006b e VALOR, 2006.

Considerando os trabalhos tomados como referência e citados anteriormente, adotaremos neste estudo o poder calorífico da lixívia de 12,5 MJ/kg e uma produção específica 1,3 t_{lixívia}/t_{Celulose}, bem como uma produção de 600 kg_{Bbs}/t_{Celulose} com poder calorífico de 12,6 MJ/kg_{Bbs}.

Na Tabela 26, apresentamos a série histórica de produção anual de celulose no Brasil desde 2000, segmentada segundo as Regiões e Unidades da Federação, agrupados os tipos de celulose químicas e semiquímicas, de fibra longa e curta, branqueadas e não branqueadas, e pastas de alto rendimento, conforme BRACELPA (2006a), BRACELPA (2006b) e VALOR (2006).

Utilizando os coeficientes técnicos apresentados e a série histórica de produção anual de celulose no Brasil, nas Regiões e nas Unidades da Federação, apresentados na Tabela 26, estimamos a produção física dos resíduos agroindustriais da produção de celulose, separando o quantitativo físico de lixívia e de resíduos de

madeira, cujos valores são apresentados, respectivamente, na Tabela 27 em milhões de toneladas por ano (10^6 t/ano), e na Tabela 29, em milhões de toneladas por ano de biomassa em base seca (10^6 t_{Bbs}/ano). As estimativas do quantitativo energético primário da lixo e dos resíduos de madeira são apresentados, respectivamente, na Tabela 28 e na Tabela 30, em milhões de Giga Joules por ano (10^6 GJ/ano).

Tabela 27 – Estimativa da geração de resíduos agroindustriais da produção de celulose – lixo
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10^6 t/ano)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Brasil	9,70	9,64	10,43	11,79	12,51	13,46
Norte	0,36	0,36	0,39	0,44	0,47	0,50
Roraima	-	-	-	-	-	-
Rondônia	-	-	-	-	-	-
Acre	-	-	-	-	-	-
Amazonas	-	-	-	-	-	-
Amapá	-	-	-	-	-	-
Pará	0,36	0,36	0,39	0,44	0,47	0,50
Tocantins	-	-	-	-	-	-
Nordeste	1,02	1,01	1,09	1,24	1,31	1,41
Maranhão	0,05	0,05	0,06	0,07	0,07	0,08
Piauí	-	-	-	-	-	-
Ceará	-	-	-	-	-	-
Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-	-
Paraíba	-	-	-	-	-	-
Pernambuco	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04
Alagoas	-	-	-	-	-	-
Sergipe	-	-	-	-	-	-
Bahia	0,94	0,93	1,01	1,14	1,21	1,30
Sudeste	5,94	5,90	6,39	7,22	7,66	8,25
Minas Gerais	2,15	2,14	2,31	2,61	2,77	2,98
Espírito Santo	0,92	0,92	0,99	1,12	1,19	1,28
Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	-
São Paulo	2,87	2,85	3,09	3,49	3,70	3,98
Sul	2,38	2,36	2,56	2,89	3,07	3,30
Paraná	0,97	0,96	1,04	1,18	1,25	1,34
Santa Catarina	0,44	0,44	0,48	0,54	0,57	0,61
Rio Grande do Sul	0,97	0,96	1,04	1,17	1,24	1,34
Centro-Oeste	-	-	-	-	-	-
Mato Grosso do Sul	-	-	-	-	-	-
Mato Grosso	-	-	-	-	-	-
Goiás	-	-	-	-	-	-

Fonte: EPE.

Tabela 28 – Estimativa do conteúdo energético primário dos resíduos agroindustriais da produção de celulose – lixívia
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10⁶ GJ/ano)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Brasil	121,3	120,4	130,3	147,4	156,3	168,2
Norte	4,5	4,5	4,9	5,5	5,8	6,3
Roraima	-	-	-	-	-	-
Rondônia	-	-	-	-	-	-
Acre	-	-	-	-	-	-
Amazonas	-	-	-	-	-	-
Amapá	-	-	-	-	-	-
Pará	4,5	4,5	4,9	5,5	5,8	6,3
Tocantins	-	-	-	-	-	-
Nordeste	12,7	12,6	13,7	15,5	16,4	17,7
Maranhão	0,7	0,7	0,7	0,8	0,9	0,9
Piauí	-	-	-	-	-	-
Ceará	-	-	-	-	-	-
Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-	-
Paraíba	-	-	-	-	-	-
Pernambuco	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,5
Alagoas	-	-	-	-	-	-
Sergipe	-	-	-	-	-	-
Bahia	11,7	11,6	12,6	14,2	15,1	16,3
Sudeste	74,3	73,8	79,9	90,3	95,8	103,1
Minas Gerais	26,9	26,7	28,9	32,7	34,6	37,3
Espírito Santo	11,5	11,5	12,4	14,0	14,9	16,0
Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	-
São Paulo	35,9	35,6	38,6	43,6	46,3	49,8
Sul	29,7	29,5	31,9	36,1	38,3	41,2
Paraná	12,1	12,0	13,0	14,7	15,6	16,8
Santa Catarina	5,5	5,5	6,0	6,7	7,1	7,7
Rio Grande do Sul	12,1	12,0	13,0	14,7	15,6	16,7
Centro-Oeste	-	-	-	-	-	-
Mato Grosso do Sul	-	-	-	-	-	-
Mato Grosso	-	-	-	-	-	-
Goiás	-	-	-	-	-	-

Notas: 1,0 barril equivalente de petróleo contém 5,95 Giga Joules de energia (1 bep = 5,95 GJ).

1,0 Megawatt-hora (MWh) equivale a 3,6 GJ.

Fonte: EPE.

Tabela 29 – Estimativa da geração de resíduos agroindustriais da produção de celulose – resíduos de madeira ⁽¹⁾
Brasil, Regiões e Unidades da Federação – em milhões de toneladas por ano (10⁶t/ano)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Brasil	4,48	4,45	4,81	5,44	5,77	6,21
Norte	0,17	0,17	0,18	0,20	0,21	0,23
Roraima	-	-	-	-	-	-
Rondônia	-	-	-	-	-	-
Acre	-	-	-	-	-	-
Amazonas	-	-	-	-	-	-
Amapá	-	-	-	-	-	-
Pará	0,17	0,17	0,18	0,20	0,21	0,23
Tocantins	-	-	-	-	-	-
Nordeste	0,47	0,47	0,51	0,57	0,61	0,65
Maranhão	0,03	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03
Piauí	-	-	-	-	-	-
Ceará	-	-	-	-	-	-
Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-	-
Paraíba	-	-	-	-	-	-
Pernambuco	-	-	-	-	-	-
Alagoas	-	-	-	-	-	-
Sergipe	-	-	-	-	-	-
Bahia	0,43	0,43	0,47	0,53	0,56	0,60
Sudeste	2,74	2,72	2,95	3,33	3,54	3,81
Minas Gerais	0,99	0,99	1,07	1,21	1,28	1,38
Espírito Santo	0,43	0,42	0,46	0,52	0,55	0,59
Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	-
São Paulo	1,33	1,32	1,42	1,61	1,71	1,84
Sul	1,10	1,09	1,18	1,33	1,41	1,52
Paraná	0,45	0,44	0,48	0,54	0,58	0,62
Santa Catarina	0,20	0,20	0,22	0,25	0,26	0,28
Rio Grande do Sul	0,45	0,44	0,48	0,54	0,57	0,62
Centro-Oeste	-	-	-	-	-	-
Mato Grosso do Sul	-	-	-	-	-	-
Mato Grosso	-	-	-	-	-	-
Goiás	-	-	-	-	-	-

Nota: (1) Lenha, resíduos de madeira e casca de árvore.

Fonte: EPE.

Tabela 30 – Estimativa do conteúdo energético primário dos resíduos agroindustriais da produção de celulose – resíduos de madeira ⁽¹⁾
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10⁶ GJ/ano)

	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Brasil	56,4	56,0	60,6	68,6	72,7	78,3
Norte	2,1	2,1	2,3	2,6	2,7	2,9
Roraima	-	-	-	-	-	-
Rondônia	-	-	-	-	-	-
Acre	-	-	-	-	-	-
Amazonas	-	-	-	-	-	-
Amapá	-	-	-	-	-	-
Pará	2,1	2,1	2,3	2,6	2,7	2,9
Tocantins	-	-	-	-	-	-
Nordeste	5,9	5,9	6,4	7,2	7,6	8,2
Maranhão	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
Piauí	-	-	-	-	-	-
Ceará	-	-	-	-	-	-
Rio Grande do Norte	-	-	-	-	-	-
Paraíba	-	-	-	-	-	-
Pernambuco	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Alagoas	-	-	-	-	-	-
Sergipe	-	-	-	-	-	-
Bahia	5,5	5,4	5,9	6,6	7,0	7,6
Sudeste	34,6	34,3	37,2	42,0	44,6	48,0
Minas Gerais	12,5	12,4	13,4	15,2	16,1	17,3
Espírito Santo	5,4	5,3	5,8	6,5	6,9	7,4
Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	-
São Paulo	16,7	16,6	17,9	20,3	21,5	23,2
Sul	13,8	13,7	14,9	16,8	17,8	19,2
Paraná	5,6	5,6	6,1	6,8	7,3	7,8
Santa Catarina	2,6	2,6	2,8	3,1	3,3	3,6
Rio Grande do Sul	5,6	5,6	6,0	6,8	7,2	7,8
Centro-Oeste	-	-	-	-	-	-
Mato Grosso do Sul	-	-	-	-	-	-
Mato Grosso	-	-	-	-	-	-
Goiás	-	-	-	-	-	-

Notas: (1) Lenha, resíduos de madeira e casca de árvore.

1,0 barril equivalente de petróleo contém 5,95 Giga Joules de energia (1 bep = 5,95 GJ).

1,0 Megawatt-hora (MWh) equivale a 3,6 GJ.

Fonte: EPE.

■ 3.3. Florestas plantadas

Existem muitas referências que associam a dizimação do Pau-Brasil à demanda de madeira de Portugal. Entretanto, o fato é que o Brasil, por vários séculos, foi um grande importador, e não exportador, de produtos florestais, e a exportação nunca teve impacto importante sobre os recursos florestais nacionais. Efetivamente, a indústria florestal brasileira começou a existir no sul do país, com base nas florestas de Araucária e fez com que o Brasil, gradualmente, se tornasse um exportador de produtos florestais (STCP, 2005).

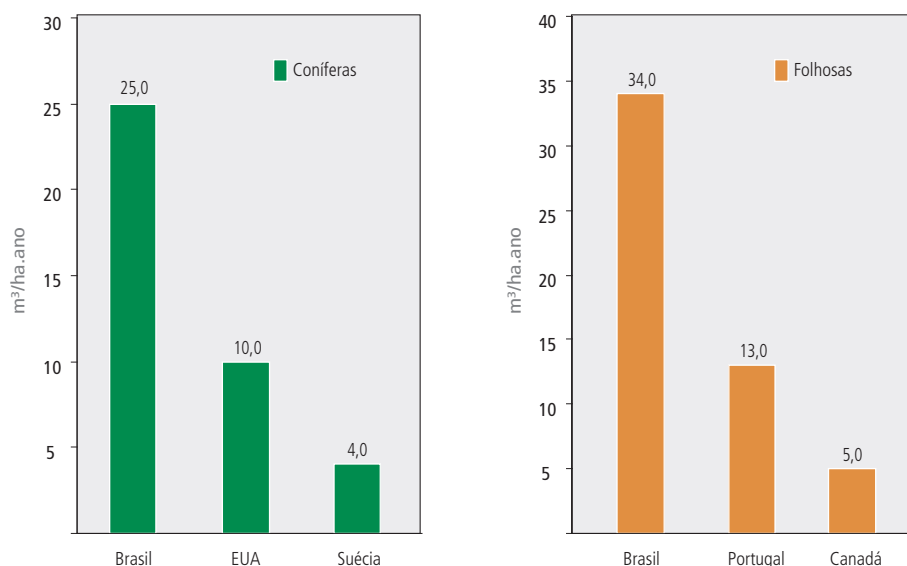
Figura 21 – Floresta plantada – eucalipto



De acordo com RODRIGUES (1991), por volta da metade deste século XX, os recursos florestais naturais das regiões Sul e Sudeste do Brasil foram fortemente depreciados, levando a um efetivo programa de reflorestamento, que teve início pelo estado de São Paulo, focado no restabelecimento de uma oferta segura de oferta de matéria-prima para as expansões planejadas da indústria de celulose e aço.

Em 1966, uma lei de incentivos fiscais foi decretada para estimular o reflorestamento no Brasil, permitindo que mais de 25% do imposto devido fosse aplicado em projetos de florestamento e reflorestamento, situados em regiões específicas e prioritárias ou distritos florestais.

Figura 22 - Comparação da produtividade florestal de coníferas e folhosas no Brasil com países selecionados



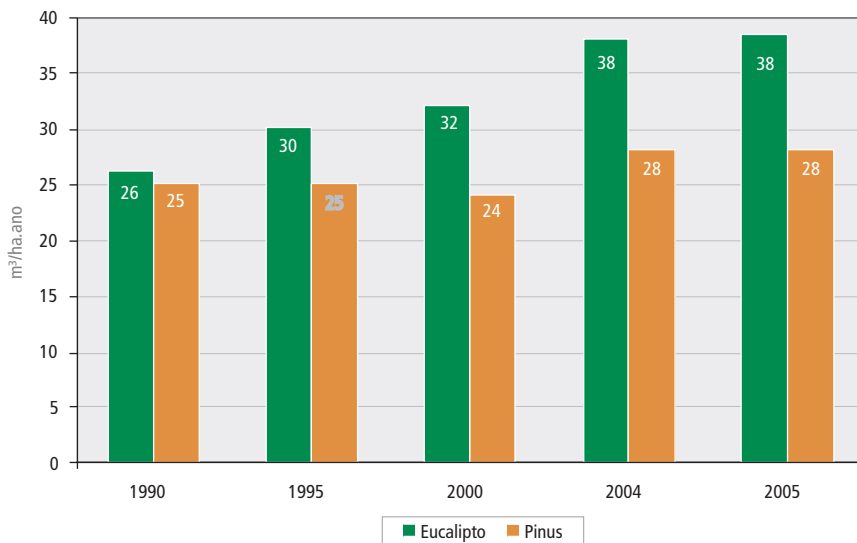
Nota: Folhosas no Brasil refere-se a eucalipto.

Fonte: ABRAF, 2006.

Como resultado desses incentivos, o reflorestamento se acelerou rapidamente, saindo a área plantada de um total de 500 mil ha plantados em 1964 e chegando a algo em torno de 5,8 milhões de ha em 1987. Como se verifica nas Tabelas 12 e 13, esta área se manteve estabilizada desde então, sendo um dos motivos principais apontados, a extinção destes incentivos uma vez que se considerou atingidos os objetivos originais que os justificavam.

O sucesso dos programas de reflorestamento podem ser atribuídos à relativa alta produtividade das florestas plantadas, baixo custo da mão-de-obra e baixo preço da terra. Altas produtividades têm sido alcançadas ao se dar preferência pelo plantio de espécies exóticas de rápido crescimento do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*, como pode ser visto na Figura 22 e na evolução apresentada pela Figura 23.

Figura 23 - Evolução do Incremento Médio Anual (IMA) dos plantios florestais⁽¹⁾
Brasil – 1990 a 2005



Nota: (1) Valores referentes apenas às associadas da Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF.

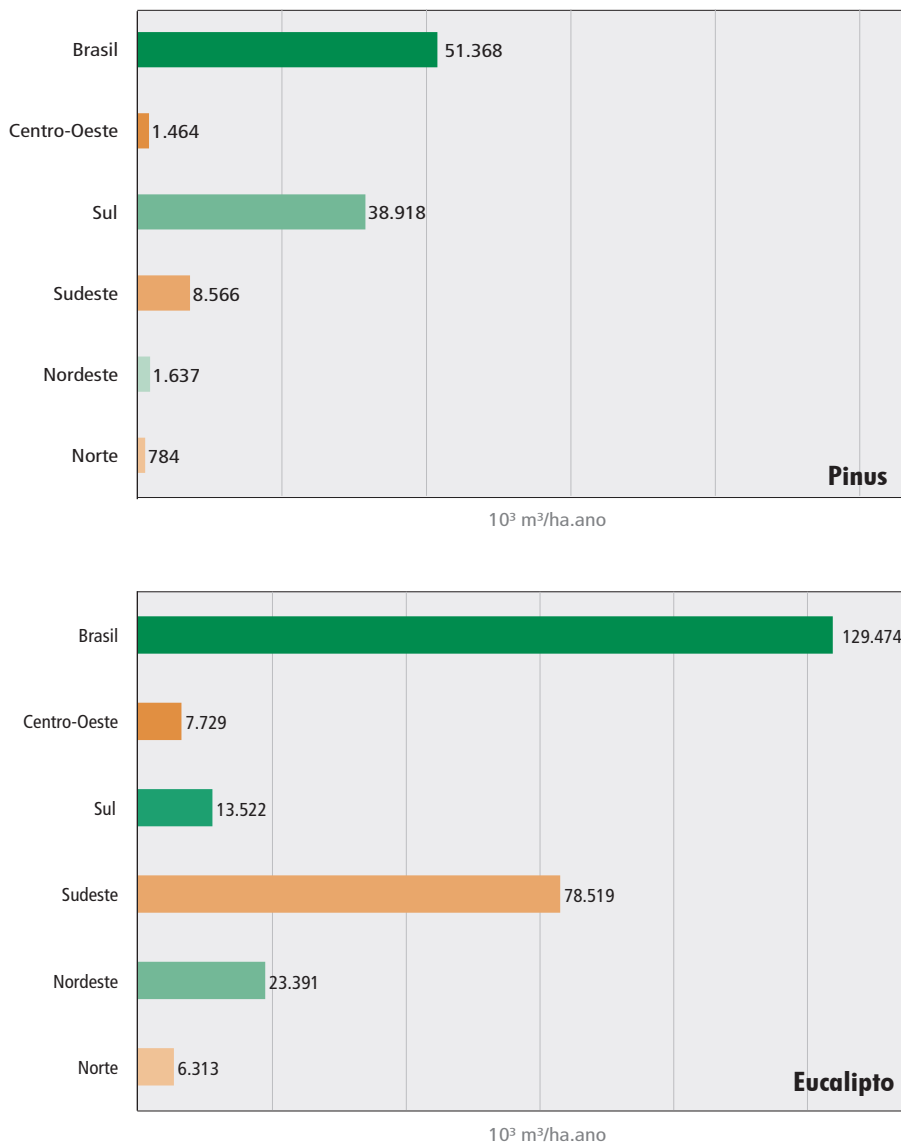
Fonte: ABRAF, 2006.

Os plantios de eucaliptos cobriram mais de 3,41 milhões de hectares em 2005, enquanto foi de 1,83 milhões de ha a área plantada com pinus. As espécies mais plantadas são: *Pinus elliottii*, *P. taeda* e *Eucalyptus viminalis* no Sul. O pinheiro do Paraná (*Araucária angustifolia*) é plantado somente em pequenas áreas e totaliza, aproximadamente, 0,5 % da área total plantada com outras espécies. No Sudeste, as espécies mais plantadas são *Pinus oocarpa*, *P. caribaea* (variedades *hondurensis*, *bahamensis*, e *caribaea*), *P. patula*, *P. strobus* var. *chiapensis*, *Eucalyptus saligna*, *E. grandis*, *E. urophylla*, *E. citriodora* e *E. tereticornis*.

As espécies nativas tem sido suplantadas devido principalmente à sua pequena taxa de crescimento e também porque são necessários mais estudos relacionados com a produção de sementes, tratamentos silviculturais e sistemas de exploração. O ciclo mais comum é de 21 anos, dividido em 3 cortes rasos a cada 7 anos.

A produtividade dos plantios artificiais é muito dependente dos sistemas silviculturais e de exploração adotados. As taxas de crescimento destas espécies são influenciadas pelas condições favoráveis de solo e clima, sendo possível para o pinus chegar-se a mais de 30 m³/ha.ano, enquanto são possíveis para o eucalipto produtividades de mais de 60 m³/ha.ano, se corretamente implantado em bons sítios com boas sementes, adubados, e com perfeito combate ao mato e às formigas. As empresas detentoras de florestas plantadas no Brasil adotam avançados padrões de manejo e atingiram reconhecimento mundial com os resultados em melhoramento genético.

Figura 24 - Estimativa da produção sustentável em florestas plantadas
Pinus e Eucalipto - Brasil e Regiões - 2005



Fonte: ABRAF, 2006.

Atualmente, grande parcela das florestas plantadas de eucalipto é originária de plantios clonais de alta produtividade (ou de semente melhorada, no caso dos pinus) com adaptação e tolerância a fatores adversos de clima, solo, água, entre outros. Ao longo dos últimos trinta anos, os ganhos em produtividade volumétrica, resultado dos trabalhos de pesquisa e melhoramento genético nas florestas de eucalipto quase que triplicaram, e nas florestas de pinus praticamente dobraram (ABRAF, 2006).

Cabe destacar a destinação atual da produção silvicultural, conforme apresentado na Tabela 32, apesar de toda a potencialidade de produção de floresta para destinação energética, apenas 21 % tem este fim, na produção de carvão vegetal, cuja finalidade principal é como matéria-prima na indústria siderúrgica.

Tabela 31 - Produção sustentada de florestas plantadas - pinus e eucalipto.
Brasil, Regiões e Unidades da Federação – 2005 (10³ m³/ha.ano)

	Pinus ⁽¹⁾	Eucalipto ⁽²⁾	Total
Brasil	51.368	129.474	180.842
Norte	784	6.313	7.096
Amapá	780	2.283	3.063
Pará	4	4.029	4.033
Nordeste	1.637	23.391	25.027
Maranhão	0	2.308	2.308
Bahia	1.637	21.082	22.719
Sudeste	8.566	78.519	87.085
Minas Gerais	4.284	40.422	44.706
Espírito Santo	137	7.753	7.890
São Paulo	4.145	30.344	34.488
Sul	38.918	13.522	52.440
Paraná	18.978	4.370	23.347
Santa Catarina	14.758	2.324	17.083
Rio Grande do Sul	5.182	6.828	12.010
Centro-Oeste	1.464	7.729	9.193
Mato Grosso do Sul	1.089	4.310	5.400
Mato Grosso	1,204	1.612	1.613
Goiás	373	1.807	2.180

Notas: (1) Utilizando-se para o cálculo as áreas com florestas plantadas de Pinus da Tabela 12 e o IMA 28 m³/ha.ano.

(2) Utilizando-se para o cálculo as áreas com florestas plantadas de Eucalipto da Tabela 12 e o IMA 38 m³/ha.ano.

Fonte: EPE a partir de informações da ABRAF, 2006.

Tabela 32 - Consumo de madeira em tora para uso industrial oriundo de florestas plantadas
Brasil por segmento e espécie. 2005 (10³ m³/ano)

Destinação	Pinus	Eucalipto	Total
Painéis reconstituídos	5.275	1.795	7.070
Compensado	6.950	150	7.100
Serrados	25.647	3.118	28.765
Papel e celulose	7.139	38.893	46.032
Carvão	-	31.934	31.934
Outros	6.358	23.537	29.895
Total	51.369	99.427	150.796

Fonte: ABRAF, 2006.

Portanto, a título de estimativa, a oferta de biomassa potencialmente aplicável como recurso para a geração de energia elétrica originária da silvicultura foi quantificada, nesta etapa do estudo, como o excedente da capacidade de produção sustentável da área hoje ocupada com a silvicultura, conforme apresentado em ABRAF (2006), utilizando-se para o cálculo as áreas com florestas plantadas de Pinus da Tabela 12 e o Incremento Médio Anual (IMA) de 28 m³/ha.ano do Pinus e as áreas com florestas plantadas de Eucalipto da Tabela 12 e o Incremento Médio Anual (IMA) de 38 m³/ha.ano para o Eucalipto, seguindo a formulação da Equação 1, cujos resultados são apresentados na Tabela 33.

Equação 1 - Quantificação da oferta de excedentes da silvicultura

$$\text{Excedente da silvicultura} = [(Área_{\text{eucalipto}} * IMA_{\text{eucalipto}}) + (Área_{\text{pinus}} * IMA_{\text{pinus}})] - \text{Consumo}_{2005}$$

Este excedente resulta da diferença entre a quantificação teórica da produção potencial nas áreas ocupadas pela silvicultura e o consumo de madeira em tora para uso industrial oriundo de florestas plantadas, apresentado no Tabela 32.

Optou-se por quantificar esta oferta de biomassa florestal a partir do excedente teórico atual em virtude da necessidade de avaliação da destinação da produção das florestas cultivadas à produção energética no futuro. As perspectivas de crescimento da demanda nacional e mundial por celulose e papel, a competitividade desta indústria brasileira marcadamente favorecida pelas condições de produção de matéria-prima, bem como a diversidade e quantidade de outras fontes de biomassa para combustível na geração energia elétrica exigem uma avaliação do potencial de florestas plantadas para fins de geração de energia elétrica.

Tabela 33 - Produção sustentada de excedentes de madeira de florestas - plantadas de eucalipto
Brasil, Regiões e Unidades da Federação – 2005 (10⁶ tBbs/ano)

	Eucalipto
Brasil	15,0
Norte	0,7
Amapá	0,3
Pará	0,5
Nordeste	2,7
Maranhão	0,3
Bahia	2,4
Sudeste	9,1
Minas Gerais	4,7
Espírito Santo	0,9
São Paulo	3,5
Sul	1,6
Paraná	0,5
Santa Catarina	0,3
Rio Grande do Sul	0,8
Centro-Oeste	0,9
Mato Grosso do Sul	0,5
Mato Grosso	0,2
Goiás	0,2

Fonte: EPE a partir de informações da ABRAF, 2006.

Em relação às características físico-químicas da madeira de pinus, SIQUEIRA *et al.* (2001) destacam que o *Pinus merkusii* é uma das poucas espécies pinus verdadeiramente tropical no mundo, sendo a única com distribuição natural abaixo da linha do equador, no hemisfério sul, e apresentam como características poder calorífico superior 19,3 MJ/kg, sendo a densidade básica média da madeira de 480 kg/m³ para árvores com idades variando entre 16 e 18 anos, podendo variar 550 kg/m³a 650 kg/m³.

Para o eucalipto, PEREIRA *et al.* (2000) assinalam que o gênero *Eucalyptus* compreende um grande número de espécies, com madeiras de características físico-mecânicas e estéticas bastante diferenciadas, o que permite a substituição de várias espécies latifoliadas nativas, mas poucas espécies têm sido plantadas em escala comercial. Em relação às características físico-químicas da madeira, apresentam uma elevada variabilidade da densidade básica da madeira, podendo variar 380 kg/m³a 750 kg/m³, sendo uma densidade básica média em torno de 500 kg/m³. O poder calorífico superior situa-se em torno de 19,0 MJ/kg.

Em seu trabalho, NOGUEIRA e LORA (2002) indicam um poder calorífico inferior da biomassa em base seca de eucalipto e pinus, respectivamente, de 19,4 MJ/kg_{Bbs} e 20,0 MJ/kg_{Bbs}.

Em se tratando da caracterização da madeira, cabe apresentar neste ponto o conceito da densidade básica, que é uma das principais características a serem consideradas, uma vez que está relacionada com alguns aspectos tecnológicos e econômicos muito importantes como o rendimento e a qualidade. A densidade é um importante fator na determinação das propriedades físicas e mecânicas que caracterizam diferentes espécies de madeiras, diferentes árvores de uma dada espécie e diferentes regiões de uma mesma árvore.

Dentre as várias maneiras de se expressar a densidade da madeira, uma das mais práticas é a densidade básica, que é a relação entre o peso da massa absolutamente seca da madeira e seu volume quando em estado de completa saturação de água.

A densidade básica da madeira não é uma característica natural das espécies vegetais, mas um artifício técnico aplicado para permitir a comparação entre as características produtivas das mais variadas espécies de árvores. Para sua determinação, amostras da madeira são submersas em água até atingirem a saturação, quando então são efetuadas as determinações volumétricas utilizando-se balanças hidrostáticas. Após a determinação deste volume, as amostras são levadas à estufa para secagem até atingirem peso constante, sendo a seguir determinada a densidade básica da madeira pela relação apresentada na Equação 2.

Equação 2 - Relação de determinação da densidade básica da madeira

$$\text{Densidade Básica} = \frac{\text{Peso Seco}}{\text{Volume Saturado}}$$

Quanto mais densa é uma madeira, maior o poder calorífico por unidade volumétrica. Madeiras mais leves possuem, aproximadamente, o mesmo poder calorífico por unidade de peso, mas possuem menor poder calorífico por unidade de volume.

O uso de madeiras de maiores densidades para fins energéticos apresenta vantagens como: menor área de estocagem e manuseio da madeira; maior rendimento energético no transporte; maior rendimento nos processos termoquímicos de transformação, como combustão direta e gaseificação.

Considerando os trabalhos tomados como referência e citados acima, adotaremos neste estudo valores de densidade básica e poder calorífico para o eucalipto de, respectivamente, 500 kg/m³ e 19,4 MJ/kg_{Bbs}, e para o pinus, respectivamente, 480 kg/m³ e 20 MJ/kg_{Bbs}.

Na Tabela 33, apresentamos a estimativa da produção sustentada de excedentes de madeira de florestas plantadas de eucalipto no ano de 2005 no Brasil, segmentada segundo as Regiões e Unidades da Federação, e utilizando os coeficientes técnicos apresentados, estimamos o quantitativo energético primário deste excedente de madeira, que é apresentado na Tabela 34, em milhões de Giga Joules por ano (10⁶ GJ/ano).

Tabela 34 - Estimativa do conteúdo energético primário da produção sustentada de excedentes de madeira de florestas plantadas de eucalipto. Brasil, Regiões e Unidades da Federação – 2005 (10⁶ GJ/ano)

Eucalipto	
Brasil	287,6
Norte	14,2
Amapá	5,1
Pará	9,1
Nordeste	52,7
Maranhão	5,2
Bahia	47,5
Sudeste	176,8
Minas Gerais	91,0
Espírito Santo	17,5
São Paulo	68,3
Sul	30,4
Paraná	9,8
Santa Catarina	5,2
Rio Grande do Sul	15,4
Centro-Oeste	13,5
Mato Grosso do Sul	9,7
Mato Grosso	3,6
Goiás	0,2

Notas: 1,0 barril equivalente de petróleo contém 5,95 Giga Joules de energia (1 bep = 5,95 GJ).

1,0 Megawatt-hora (MWh) equivale a 3,6 GJ.

Fonte: EPE.

As estimativas de excedente foram realizadas apenas para o eucalipto, pois, segundo a ABRAF (2006), as florestas plantadas de pinus encontram-se no seu patamar máximo de aproveitamento e produtividade para as técnicas atualmente disponíveis.

4. Expansão da produção agrícola, agroindustrial e silvicultural no Brasil

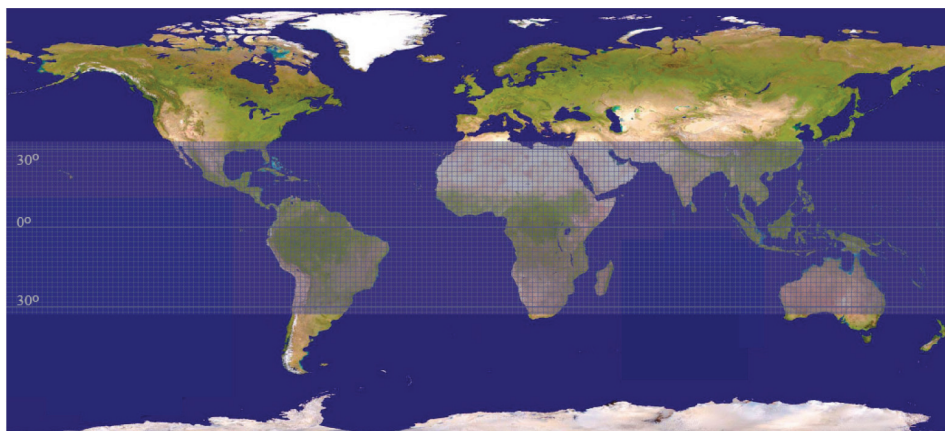
As condições naturais e geográficas são favoráveis no Brasil, além de grande quantidade de terra agrícola com características adequadas do solo e condições climáticas, fazendo deste o país que reúne o maior quantitativo de vantagens comparativas para liderar a agricultura, entre as quais, a perspectiva de incorporação de novas áreas com impactos ambientais circunscritos ao socialmente aceitos e a possibilidade de múltiplos cultivos dentro do ano calendário (EMBRAPA/MAPA, 2005).

Situado, predominantemente, na faixa tropical e subtropical do planeta, a região mais propensa à produção de biomassa do mundo, entre os Trópico de Câncer, a 30° de latitude Norte, e o Trópico de Capricórnio, a 30° de latitude Sul, com pode ser visto na Figura 25, o Brasil recebe intensa radiação solar ao longo do ano, a fonte de energia fundamental da produção de biomassa, seja sua finalidade a produção agrícola e pecuária para alimentação humana ou a produção de culturas com fins agroindustriais.

Dentre os países situados na faixa tropical e subtropical, o Brasil é o que apresenta maior potencial de produção agrícola, pois na África a maior parte do território é caracterizada por áreas desérticas, portanto, inviáveis para a produção, a mesma situação que ocorre na Austrália. Dessa forma, os países que tem maiores

possibilidades de produção agrícola são alguns do sul da Ásia, países da América Central, que geralmente não dispõem de áreas agricultáveis disponíveis, o Norte da América do Sul e o Brasil (SPA/ MAPA, 2006).

Figura 25 - Mapa-múndi planificado - faixa tropical e subtropical do planeta



O Brasil, com sua dimensão continental e diversidade geográfica, consegue produzir praticamente todos os principais produtos agrícolas comercializados mundialmente, apresentando diversidade de clima, exuberância de biodiversidade, além de deter um quarto das reservas superficiais e sub-superficiais de água doce. Além disso, o Brasil é reconhecido por haver assumido a liderança na geração e implantação de tecnologia de agricultura tropical, associada à uma pujante agroindústria, em que um dos paradigmas é a agroindústria de etanol, reconhecida como a mais eficiente do mundo, em termos de tecnologia de processo e de gestão (EMBRAPA/MAPA, 2005).

■ 4.1. A disponibilidade de áreas agriculturáveis

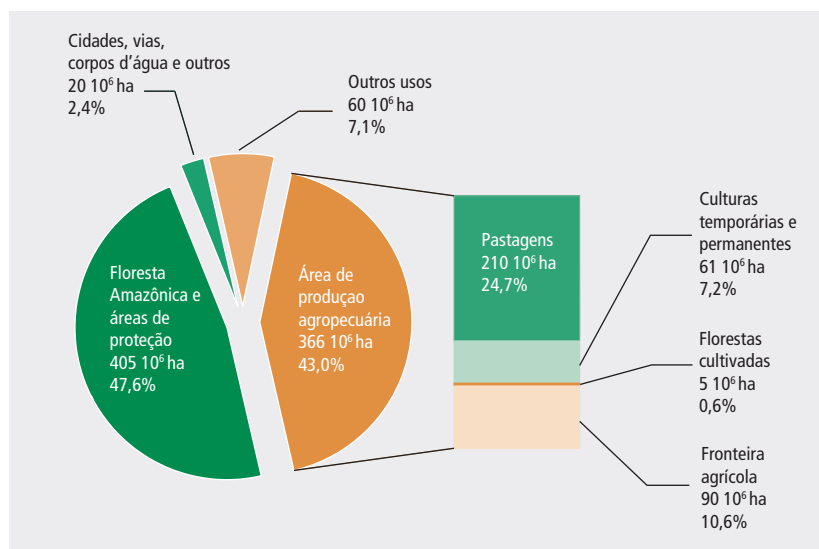
Devido às suas dimensões continentais, o Brasil possui uma elevada diversidade de classes de solos e de tipos climáticos que resultam em uma grande variação no potencial produtivo de suas terras. Esta diversidade, aliada às limitações de uso da terra, como as regiões sensíveis da Floresta Amazônica e outras reservas e áreas de proteção, como o Pantanal, a Mata Atlântica, etc., e a declividade do solo, cria a necessidade de sobrepor tais informações georreferenciadas e determinar as regiões que apresentam diferentes potenciais de produtividade e uso para as atividades agropecuárias desenvolvidas no país.

Tabela 35 - Ocupação do solo e distribuição por área - Brasil

	Milhões de ha	Distribuição
Floresta Amazônica e Áreas de proteção	405	47,6%
Cidades, vias, corpos d'água e outros	20	2,4%
Área de produção agropecuária	366	43,0%
<i>Pastagens</i>	210	24,7%
<i>Culturas temporárias e permanentes</i>	61	7,2%
<i>Florestas cultivadas</i>	5	0,6%
<i>Fronteira agrícola</i>	90	10,6%
Outros usos	60	7,1%
Brasil	851	100%

Fonte: SPA/ MAPA, 2006

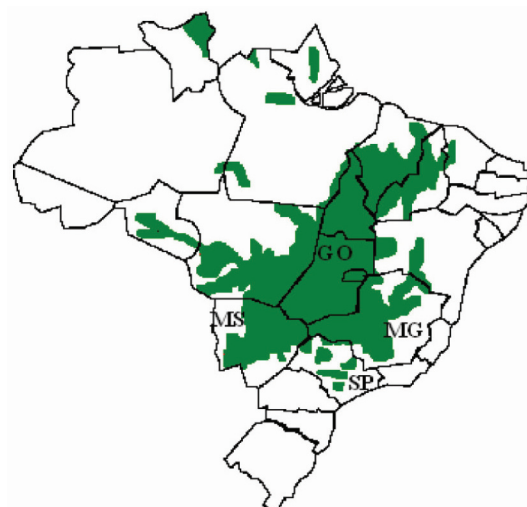
Figura 26 - Ocupação do solo e distribuição por área. Brasil – 2005



Embora conte com uma atividade agrícola bastante intensa, o Brasil ainda dispõe de muita terra agrícola disponível, sem prejudicar as florestas e áreas de preservação, como pode ser verificado pelos números de ocupação do solo e distribuição por área no Brasil, apresentados na Tabela 35 e graficamente representados na Figura 26.

A área de expansão da fronteira agrícola no Brasil hoje é representada pela região do bioma Cerrado, que possui uma área total de, aproximadamente, 204 milhões de hectares, dos quais 137 milhões são considerados agricultáveis. Este bioma perpassa, principalmente, a Região Centro-Oeste, mas também as Regiões Nordeste e Sudeste, como se verifica através da Figura 27.

Figura 27 - Cerrado brasileiro



Fonte: EMBRAPA/MAPA, 2006.

Como pode ser visto na Tabela 36, a ocupação do solo nesta região já apresenta 35 milhões de hectares destinados à pastagem, 10 milhões de hectares a culturas anuais e 2 milhões de hectares a culturas perenes e florestas, restando uma área disponível estimada em 90 milhões de hectares.

Tabela 36 - Cerrado brasileiro. ocupação do solo na área de expansão da fronteira agrícola Brasil (10⁶ ha)

Área total	204
Área agricultável	137
Pastagem	(35)
Culturas anuais	(10)
Culturas perenes e florestas	(2)
Área disponível	90

Nota: Valores entre parênteses significam áreas já em uso.

Fonte: EMBRAPA/MAPA, 2006.

■ 4.2. Expansão da produção agrícola

■ 4.2.1. Soja

Conforme publicado no *U.S. and World Agricultural Outlook 2006* (FAPRI, 2006), a queda no preço da *commodity* soja em grão na safra 2005/06 deveu-se a uma sobreoferta, que perdurará na safra 2006/07, apesar do ajuste de produção realizado. Esta correção da oferta conduz a uma previsível elevação de preço em 2007/08, que permanecerá constante no período da projeção, que se encerra em na safra 20015/16.

O FAPRI (2006) projeta para o Brasil uma produção de 95 milhões de toneladas em 2014/15, devido à expansão de área e conversão de pastagens, aliadas a aumento de produtividade e melhores alternativas de transporte. Isto significará 35% da produção mundial, a Argentina terá um aumento de produção de 36% e o setor permanecerá orientado para as exportações.

O Brasil deverá aumentar a sua produção de oleaginosas numa taxa de 3% ao ano, enquanto os EUA deverão lograr alcançar somente 1% ao ano. Dois terços do aumento provêm da expansão da área agricultável do País. Segundo a OCDE, o grau de expansão da área agrícola brasileira será fundamental para se determinar o preço futuro da soja nos mercados internacionais. Nos Estados Unidos, a tendência é de redução da área com soja e aumento da produtividade.

O consumo mundial de soja deverá permanecer concentrado, sendo o Brasil um dos principais consumidores internacionais do produto, ficando atrás, porém, dos EUA e da China (22%). No comércio internacional, o Brasil deverá galgar mais posições em suas exportações mundiais de soja em grão e farelo. Os preços da soja no mercado internacional deverão permanecer ligeiramente constantes até 2020, crescendo de US\$ 247 por tonelada em 1997 para US\$ 250 em 2020.

As projeções para a produção de soja realizadas pela AGE/MAPA (2006) para o Brasil, no período 1997/98 a 2014/15, mostram valores abaixo daqueles apresentados pelo FAPRI (2006). Uma das razões das diferenças é que essa instituição partiu de estimativas de produção de soja para a safra 2004/2005 que, por problemas climáticos ocorridos no Sul do Brasil e parte do Centro-Oeste, não se confirmaram. As estimativas realizadas indicam uma produção brasileira de 83,9 milhões de toneladas de soja em 2014/15, as exportações de soja projetadas são de 31,7 milhões de toneladas, 54,6 % superiores às exportações de 2004/05.

Com respeito aos períodos compreendidos entre 2015 e 2020 e 2020 e 2030, não foram encontrados

previsões ou estudos sobre a produção, nacional ou mundial. Pela necessidade de se projetar um cenário para os períodos em referência, este estudo adotou uma taxa de crescimento médio de 3,5 % a.a. no primeiro intervalo e de 3,0 % a.a. no segundo, tomando como referência os valores de taxa de crescimento verificados entre os anos 1995 e 2005, que foi de 6,5 % a.a., e na projeção da AGE/MAPA (2006) entre 2005 e 2015, que foi de 5,0 % a.a.

Tabela 37 - Projeções de produção de soja
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10³ t/ano)

	2010	2015	2020	2030
Brasil	69.628	83.865	99.605	133.860
Norte	1.901	2.290	2.720	3.655
Roraima	76	91	108	146
Rondônia	302	363	431	580
Acre	-	-	-	-
Amazonas	11	14	16	22
Amapá	-	-	-	-
Pará	280	337	401	539
Tocantins	1.232	1.484	1.763	2.369
Nordeste	5.350	6.443	7.653	10.285
Maranhão	1.350	1.626	1.931	2.595
Piauí	750	904	1.073	1.442
Ceará	-	-	-	-
Rio Grande do Norte	-	-	-	-
Paraíba	-	-	-	-
Pernambuco	-	-	-	-
Alagoas	-	-	-	-
Sergipe	-	-	-	-
Bahia	3.249	3.914	4.648	6.247
Sudeste	6.368	7.670	9.110	12.243
Minas Gerais	4.089	4.925	5.849	7.861
Espírito Santo	-	-	-	-
Rio de Janeiro	-	-	-	-
São Paulo	2.279	2.745	3.260	4.381
Sul	17.312	20.852	24.766	33.283
Paraná	12.912	15.552	18.471	24.823
Santa Catarina	853	1.027	1.220	1.639
Rio Grande do Sul	3.548	4.273	5.075	6.821
Centro-Oeste	38.697	46.609	55.357	74.395
Mato Grosso do Sul	5.029	6.058	7.194	9.669
Mato Grosso	23.960	28.859	34.275	46.063
Goiás	9.708	11.693	13.888	18.664

Fonte: AGE/MAPA, 2006 até 2015.

Nota: Estimativas de 3,5 % a.a. entre 2015 e 2020 e de 3,0 % a.a. entre 2020 e 2030.

■ 4.2.2. Milho

O relatório FAPRI (2006), indica que a produção mundial de milho em 2005/06 diminuiu, retornando a seus níveis médios. Os níveis conservados de estoque elevados, resultantes da produção elevada em 2004/05, aumentaram a fonte do milho do mundo, diminuindo o seu preço a US\$ 90,16 por tonelada. Em 2006/07, prevê-se que o consumo mundial aumentará mais do que a produção e o preço FOB do milho do golfo deverá apresentar aumento, chegando a US\$ 98,41 por tonelada. O consumo deverá crescer pelo menos mais 98 milhões de toneladas nos próximos 10 anos, relacionados a um aumento do uso na alimentação de animais domésticos.

Tabela 38 - Projeções de produção de milho
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10³ t/ano)

	2010	2015	2020	2030
Brasil	50.197	60.779	72.187	97.013
Norte	1.547	1.873	2.224	2.990
Roraima	350	424	504	677
Rondônia	87	105	125	168
Acre	50	60	72	96
Amazonas	34	42	49	66
Amapá	800	968	1.150	1.545
Pará	2	2	3	4
Tocantins	224	271	322	432
Nordeste	4.191	5.074	6.026	8.099
Maranhão	575	697	827	1.112
Piauí	274	332	394	530
Ceará	402	487	579	778
Rio Grande do Norte	33	40	47	64
Paraíba	88	106	126	169
Pernambuco	166	201	238	320
Alagoas	49	60	71	95
Sergipe	294	356	422	568
Bahia	2.309	2.796	3.321	4.463
Sudeste	14.983	18.141	21.546	28.957
Minas Gerais	8.921	10.801	12.829	17.241
Espírito Santo	175	211	251	337
Rio de Janeiro	39	47	55	74
São Paulo	5.849	7.082	8.411	11.304
Sul	18.220	22.061	26.201	35.212
Paraná	12.247	14.829	17.613	23.670
Santa Catarina	3.851	4.662	5.538	7.442
Rio Grande do Sul	2.122	2.569	3.051	4.100
Centro-Oeste	11.257	13.630	16.188	21.755
Mato Grosso do Sul	1.846	2.235	2.654	3.567
Mato Grosso	5.009	6.065	7.204	9.681
Goiás	4.402	5.330	6.330	8.507

Fonte: AGE/MAPA, 2006 até 2015

Nota: Estimativas de 3,5 % a.a. entre 2015 e 2020 e de 3,0 % a.a. entre 2020 e 2030.

As projeções de produção de milho no Brasil indicam um aumento de 25,6 milhões de toneladas até 2015, que representa um aumento de 5,6 % ao ano. Em 2014/15, a produção deverá situar-se em 60,8 milhões de toneladas como pode ser visto na Tabela 38, com um consumo de 57,1 milhões de toneladas por ano. Esses resultados indicam que o País deverá fazer ajustes no seu quadro de suprimentos de modo a garantir o abastecimento do mercado interno e obter algum excedente para exportação, estimado em 2,8 milhões de toneladas em 2014/15 (AGE/MAPA, 2006).

O Brasil está colocado entre os países que terão aumentos significativos de suas exportações de milho, ao lado do Canadá, Hungria, Cazaquistão, Ucrânia, Rússia e África do Sul (FAO). Este crescimento das exportações brasileiras de milho far-se-á possível por meio de ganhos de produção e produtividade. O FAPRI (2006) apresenta resultado semelhante ao da FAO no que toca ao comércio internacional do milho brasileiro, projetando exportações líquidas entre 2,0 e 2,8 milhões de toneladas anuais, no período 2005/06 a 2014/15.

É importante destacar que a produção brasileira de milho já havia atingido o patamar de 47,7 milhões de toneladas por ano em 2003, como resultado de um crescimento médio de 5,3% a.a. desde 1990, mas a super oferta mundial do período fez a produção cair cerca de 25% em 2005. Portanto, a taxa de crescimento médio anual de 7,4% a.a. prevista para o período 2005/10 reflete uma parcela da recuperação desta queda e devem ser consideradas de forma cautelosa para a previsão do período entre 2015 e 2030. Entre 2010 e 2015 a taxa de crescimento médio anual de 3,9% a.a.

Com respeito aos períodos compreendidos entre 2015 e 2020, e 2020 e 2030, não foram encontrados previsões ou estudos sobre a produção, nacional ou mundial. Pela necessidade de se projetar um cenário para os períodos em referência, este estudo adotou uma taxa de crescimento médio de 3,5% a.a. no primeiro intervalo e de 3,0% a.a. no segundo, tomando como referência os valores de taxa de crescimento citados no parágrafo anterior.

■ 4.2.3. Arroz

A oferta de arroz asiático disponível para exportação foi bastante reduzida nos períodos de safra 2004/05 e 2005/06, que somada à um estoque mundial muito baixo, resultaram em preços de exportação acentuadamente elevados no período. Espera-se uma redução do preço em 2006/07 porque as fontes do arroz do mundo aumentaram FAPRI (2006).

A produção mundial projetada deve aumentar 452 milhões de toneladas durante o período até 2015, com a produção em países recuperando-se frente aos anos precedente. Quase 66% do crescimento líquido projetado na produção total do arroz sobre a década virá da China, da Índia, de Bangladesh, da Tailândia e do Vietnã.

O consumo per capita global total de arroz deve continuar a declinar, influenciado pela urbanização, pelo crescimento da renda, pelo envelhecimento, e pela diversificação da dieta em inúmeros países asiáticos.

De acordo com as projeções do FAPRI (2006), o Brasil apresentará um aumento de produtividade e uma moderada queda no consumo per capita de arroz ao longo do período projetado, entre 2004/05 e 2014/15. O País permanecerá na posição de importador líquido de arroz até o ano de 2015. A partir de 2007, a taxa de crescimento das importações do País iniciará uma trajetória de decréscimo, a ponto de se tornar negativa a partir de 2008, confirmando, de certa maneira, a tendência de diminuição do consumo per capita.

As projeções de produção e consumo de arroz da AGE/MAPA (2006) mostram uma situação muito apertada entre essas duas variáveis, havendo necessidade de importações de arroz nos próximos anos. A produção

projetada para 2014/15 revela um acréscimo de 1,7 milhão de toneladas em relação a 2004/05. Assim a produção projetada em 2015 é de 14,6 milhões de toneladas de arroz, conforme a Tabela 39.

Tabela 39 - Projeções de produção de arroz
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10³ t/ano)

	2010	2015	2020	2030
Brasil	13.637	14.518	15.259	16.039
Norte	1.577	1.679	1.765	1.855
Roraima	139	148	156	164
Rondônia	229	244	256	270
Acre	37	39	41	43
Amazonas	24	26	27	29
Amapá	4	4	5	5
Pará	661	704	740	778
Tocantins	482	514	540	567
Nordeste	1.291	1.374	1.444	1.518
Maranhão	740	788	828	871
Piauí	241	256	269	283
Ceará	105	111	117	123
Rio Grande do Norte	3	3	4	4
Paraíba	5	6	6	6
Pernambuco	50	54	56	59
Alagoas	13	14	15	16
Sergipe	42	45	47	50
Bahia	91	96	101	107
Sudeste	391	417	438	460
Minas Gerais	264	281	296	311
Espírito Santo	12	13	13	14
Rio de Janeiro	10	11	12	12
São Paulo	105	112	117	123
Sul	7.635	8.128	8.543	8.979
Paraná	155	165	173	182
Santa Catarina	1.082	1.152	1.211	1.273
Rio Grande do Sul	6.397	6.811	7.158	7.524
Centro-Oeste	2.743	2.920	3.069	3.226
Mato Grosso do Sul	244	259	272	286
Mato Grosso	2.107	2.243	2.357	2.478
Goiás	393	419	440	462

Fonte: AGE/MAPA, 2006 até 2015

Nota: Estimativas de 1,0 % a.a. entre 2015 e 2020 e de 0,50 % a.a. entre 2020 e 2030.

A produção de arroz no Brasil se manteve bastante estável durante toda a década de 90, em torno dos 11 milhões de toneladas por ano. Em 2004 e 2005, pelos fatores de preços internacionais expostos anteriormente, verificou-se uma elevação de produção para o patamar de 13 milhões de toneladas por ano, com um incremento de, aproximadamente, 27%. A taxa de crescimento médio anual de 0,6% a.a. prevista para o período 2005-10, apresentada em AGE/MAPA (2006), reflete a estabilidade desta cultura no país, com uma ascensão esperada para o período compreendido entre 2010-15, quando o estudo considera uma taxa de crescimento médio anual de 1,3% a.a. Nestas condições, a necessidade de se projetar um cenário para os períodos com-

preendidos entre 2015 e 2020, e 2020 e 2030, a despeito de previsões ou estudos sobre a produção, nacional ou mundial, adotou uma taxa de crescimento médio de 1,0% a.a. no primeiro intervalo e de 0,5% a.a. no segundo, tomando como referência os valores de taxa de crescimento citados anteriormente.

■ 4.2.4. Cana-de-açúcar

A produção de cana-de-açúcar no Brasil é determinada pela demanda interna e externa por açúcar e etanol. Considerando as perspectivas de demanda apresentadas detalhadamente nos itens 4.3.1 e 4.3.2 desta Nota Técnica.

Conforme indicado no estudo EMBRAPA/MAPA (2005), as projeções permitem estimar que, nos próximos 5 anos, a demanda interna por cana-de-açúcar salte de 240 milhões de toneladas, 70 milhões de toneladas de cana para açúcar e 170 milhões para álcool, para algo em torno de 334 milhões de toneladas, 84 milhões para açúcar e o restante para álcool. A este incremento de, praticamente, 100 milhões de toneladas na produção para atender o mercado doméstico, soma-se a demanda externa, que também é crescente.

Internacionalmente, os contratos firmados entre a Petrobras e as companhias petrolíferas da Venezuela e da Nigéria, somados às expectativas quanto ao mercado japonês e à consolidação dos investimentos no reprocessamento no Caribe, exportações para o mercado americano utilizando a cota destinada aos países daquela região, podem representar um incremento de quatro a cinco bilhões de litros de etanol nas exportações.

Esta demanda externa deverá representar a necessidade de incremento de outros 120 milhões de toneladas de cana, atingindo-se uma demanda de, aproximadamente, 520 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em 2010, como visto na Tabela 40.

No caso do mercado de álcool, embora o crescimento deva ser expressivo, a natureza estratégica do produto deverá retardar as decisões de alguns importantes atores, como a União Européia, os quais privilegiarão a estruturação da base produtiva doméstica antes de recorrer às importações.

De todo modo, estima-se a necessidade de uma produção de, aproximadamente, 715 milhões de toneladas de cana-de-açúcar em 2015, como indicado em COGEN/UNICA (2006). Estes valores significam taxas de crescimento médio anual de 3,7% entre 2005/10 e de 6,6 % entre 2010/15.

Com respeito aos períodos compreendidos entre 2015 e 2020, e 2020 e 2030, não foram encontrados previsões ou estudos sobre a produção. Pela necessidade de se projetar um cenário para os períodos em referência, este estudo adotou uma taxa de crescimento médio de 3,5 % a.a. no primeiro intervalo e de 3,0% a.a. no segundo, tomando como referência os valores de taxa de crescimento verificados entre os anos 1990 e 2005, que foi de 3,4% a.a., e na projeção da COGEN/UNICA (2006) entre 2005 e 2015, que foi de 5,2% a.a.

Tabela 40 - Projeções de produção de cana-de-açúcar
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10³ t/ano)

	2010	2015	2020	2030
Brasil	518.369	714.975	849.166	1.141.208
Norte	554	1.076	1.279	1.718
Roraima	17	33	40	53
Rondônia	13	26	31	41
Acre	136	265	315	423
Amazonas	1	1	2	2
Amapá	292	568	674	906
Pará	1	2	3	4
Tocantins	93	180	214	288
Nordeste	72.206	113.782	135.137	181.613
Maranhão	3.163	10.006	11.884	15.971
Piauí	316	614	729	980
Ceará	912	1.773	2.106	2.830
Rio Grande do Norte	3.849	7.408	8.798	11.824
Paraíba	5.799	8.407	9.984	13.418
Pernambuco	19.562	27.335	32.465	43.631
Alagoas	32.607	46.226	54.903	73.784
Sergipe	1.872	3.504	4.162	5.593
Bahia	4.125	8.509	10.106	13.581
Sudeste	349.145	451.749	536.536	721.060
Minas Gerais	39.815	68.924	81.860	110.013
Espírito Santo	4.210	5.907	7.016	9.428
Rio de Janeiro	6.276	7.877	9.355	12.573
São Paulo	298.844	369.041	438.305	589.045
Sul	34.996	48.348	57.422	77.171
Paraná	34.220	46.840	55.632	74.764
Santa Catarina	310	602	714	960
Rio Grande do Sul	466	906	1.076	1.446
Centro-Oeste	61.468	100.020	118.793	159.647
Mato Grosso do Sul	19.530	29.339	34.845	46.829
Mato Grosso	17.034	26.377	31.328	42.102
Goiás	24.905	44.304	52.619	70.716

Fonte: COGEN/UNICA, 2006 até 2015.

Nota: Estimativas de 3,5 % a.a. entre 2015 e 2020 e de 3,0 % a.a. entre 2020 e 2030.

■ 4.3. Expansão da produção agroindustrial

■ 4.3.1 Açúcar

O Brasil, juntamente com a Austrália, Cuba, Tailândia e 15 países membros da União Européia (EU-15), foram responsáveis por 90,7% de todo o comércio mundial de açúcar no biênio 2004/05. O País aumentou sua produção em 7,5 %, ou 2 milhões de toneladas, em 2004/05, e continua com perspectivas de produção recorde, segundo o FAPRI (2006). A OCDE afirma que o Brasil continuará ocupando a posição de produtor com maior competitividade, apresentando um aumento da produção em 9,5 milhões de toneladas, atingindo um montante de 34 milhões de toneladas em 2013, a uma taxa média de crescimento de 1,7% ao ano (AGE/MAPA, 2006). De acordo com estudos realizados pelo FAPRI (2006), as exportações brasileiras deverão passar dos 18,1 milhões de toneladas para 21,9 milhões em 2014-2015 (+ 21%), detendo 56% do comércio internacional.

Tabela 41 - Série histórica e projeções de produção, consumo e exportação de açúcar ^{(1) (2)}
Brasil (10⁶ t/ano)

Ano	Produção	Crescimento (% a.a.)	Consumo	Exportação
2000	20,1	-	9,1	11,3
2001	17,1	-14,9%	9,3	7,7
2002	20,4	19,3%	9,5	11,6
2003	23,8	16,7%	9,8	14,0
2004	26,4	10,9%	10,4	15,2
2005	28,2	6,8%	10,7	17,8
2010	33,0	3,2%	14,7	21,0
2015	45,2	6,5%	21,3	24,0
2020	57,7	5,0%	27,2	30,6
2030	66,9	3,0%	31,5	35,5

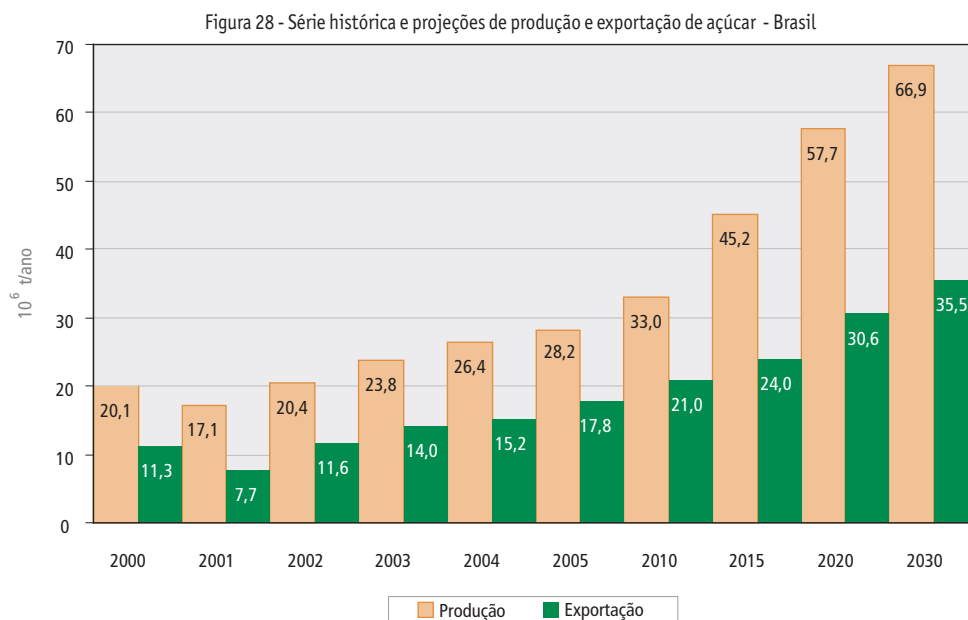
Fonte: AGE/MAPA, 2006.

Notas: (1) Elaborado pela Assessoria de Gestão Estratégica do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento com dados do USDA e MAPA.

(2) As taxas de crescimento utilizadas foram de 3,2 % a.a. no período 2005/06 a 2009/10 e de 6,5% a.a no período 2010/11 a 2014/15 para produção, 7,8 % a.a. para o consumo e de 2,8% a.a. ao ano para a exportação. De 2015 a 2020 e 2020 a 2030, valores médios de crescimento anual, respectivamente, de 5,0 % e 3,0 % adotados pela EPE.

Ganhos de produtividade e eficiência na produção de açúcar no Brasil e na Índia, responsáveis por, respectivamente, 18% e 17% de toda a produção mundial de açúcar na década 2000 a 2010, podem levar a uma queda dos preços deste produto no mercado internacional. O Brasil será um país-chave na determinação do futuro dos preços mundiais do açúcar, permanecendo como o líder em produtividade e em exportação do produto.

As estimativas obtidas pela AGE/MAPA (2006) para a produção brasileira de açúcar indicam uma taxa média anual de crescimento de 3,2 % no período 2005/06 a 2009/10 e de 6,5% no período 2010/11 a 2014/15. Essa taxa deve conduzir a uma produção de 45,2 milhões de toneladas do produto em 2014/15, como visto na Tabela 41. Essa produção corresponde a um acréscimo de 17,1 milhões de toneladas em relação ao projetado para 2005/06. A estimativa obtida para 2014-2015, situa-se num nível superior à estimada pelo FAPRI (2006), de 33 milhões de toneladas. Para as exportações, a projeção para 2014/15 é de um volume de exportações de 24 milhões de toneladas. Além de aparecerem na Tabela 41, os valores históricos de produção e exportação de açúcar estão apresentados na Figura 28.



Fonte: AGE/MAPA, 2006.

Com respeito aos períodos compreendidos entre 2015 e 2020, e 2020 e 2030, não foram encontrados previsões ou estudos sobre a produção, nacional ou mundial. Pela necessidade de se projetar um cenário para os períodos em referência, este estudo adotou uma taxa de crescimento médio de 5,0 % a.a. no primeiro intervalo e de 3,0 % a.a. no segundo, tomando como referência os valores de taxa de crescimento médios anuais verificados na Tabela 41.

■ 4.3.2 Etanol

O etanol é o biocombustível dominante nos mercados mundiais, e está ganhando ainda mais importância como fonte energética combustível em iniciativas adotadas por inúmeros de países. Não só como fonte de energia combustível, por suas vantagens ambientais, o etanol está ganhando importância como fonte alternativa de matéria-prima na indústria química.

O Brasil é pioneiro na produção em larga escala de etanol e em seu uso como combustível alternativo, utilizando a cana-de-açúcar como matéria-prima. O Brasil e os Estados Unidos são atualmente os maiores produtores de etanol, embora os Estados Unidos extraiam esse produto do milho, e não da cana-de-açúcar como no Brasil, seguidos por China e Índia.

Segundo FAPRI (2006), o preço do etanol, que aumentou 26,2% em 2005, refletindo a elevação da demanda e preços elevados da gasolina, deve declinar nos anos que se seguem, em função do declínio projetado dos preços da gasolina. Entretanto, uma nova elevação dos preços deve ser verificada a partir de 2010, quando se prevê que a demanda cresça mais rapidamente do que a produção, atingindo em 2015 o patamar de US\$ 0,35 por litro.

A produção de etanol no Brasil se concentra nas regiões Centro-Sul, Norte e Nordeste, a partir da cana-de-açúcar. O etanol é considerado pelos especialistas como o álcool etílico de biomassa, para uso combustível.

ou industrial, inclusive na produção de bebidas industrializadas. Neste sentido, a produção de etanol é composta pelo álcool anidro e álcool hidratado.

Tabela 42 - Série histórica e projeções de produção, consumo e exportação de etanol ⁽¹⁾⁽²⁾
Brasil (10⁶ l/ano)

Ano	Produção	Crescimento (% a.a.)	Consumo ⁽³⁾	Exportação ⁽⁴⁾
2000	10.773	-	10.708	65
2001	11.481	6,6%	11.052	429
2002	12.625	10,0%	11.908	717
2003	13.690	8,4%	13.034	656
2004	15.638	14,2%	13.317	2.321
2005	16.216	3,7%	13.555	2.661
2010	25.384	9,4%	20.116	5.268
2015	36.849	7,7%	28.365	8.484
2020	47.030	5,0%	36.202	10.828
2030	54.520	3,0%	41.968	12.553

Notas: (1) Elaborado pela Câmara Setorial Açúcar e Alcool na Assessoria de Gestão Estratégica do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

(2) As taxas de crescimento utilizadas foram até 2010, taxa anual de 9,4 %, a partir de 2011, usou-se 7,7% a.a. De 2015 a 2020 e 2020 a 2030, valores médios de crescimento anual, respectivamente, de 5,0 % e 3,0 % adotados pela EPE.

(3) Inclui álcool combustível e álcool industrial.

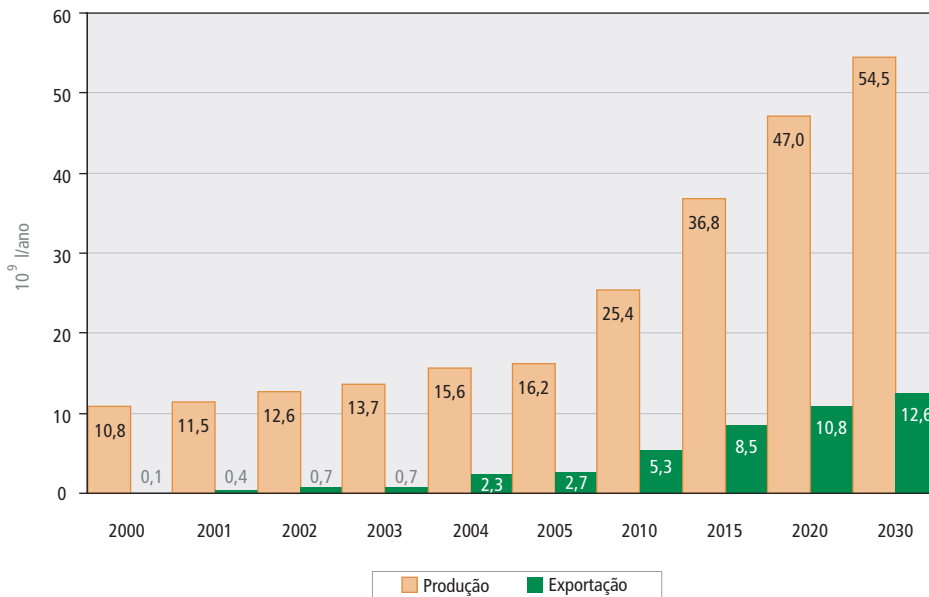
(4) Não inclui abertura de mercado de álcool para fins combustíveis em países importadores.

Fonte: AGE/MAPA, 2006.

As projeções do etanol, referentes a produção, consumo e exportação apresentadas na Tabela 42, refletem grande dinamismo desse produto devido, especialmente, ao crescimento do consumo interno e as exportações de etanol. A AGE/MAPA (2006) projeta, para 2010, vendas de 1,0 milhão de veículos Flex, quase o dobro a mais que os automóveis a gasolina, cujas vendas projetadas são de 467 mil unidades. Essa expansão do setor automobilístico e o uso crescente dos carros flex é atualmente o principal fator responsável pelo crescimento da produção de etanol no Brasil.

As estimativas obtidas pela AGE/MAPA (2006) para a produção brasileira de etanol indicam uma taxa média anual de crescimento de 9,4 % no período 2005/06 a 2009/10 e de 7,7 % no período 2010/11 a 2014/15. Essa taxa deve conduzir a uma produção de etanol projetada para 2015 de 36,8 bilhões de litros, mais que o dobro da produção de 2005. O consumo interno para 2015 está projetado em 28,4 bilhões de litros e as exportações em 8,5 bilhões, como visto na Tabela 42. Essa produção corresponde a um acréscimo de 20,6 bilhões de litros em relação ao projetado para 2005/06. Além de aparecerem na Tabela 42, os valores históricos de produção e exportação de etanol estão apresentados na Figura 29.

Figura 29 - Série histórica e projeções de produção e exportação de etanol - Brasil



Fonte: AGE/MAPA (2006)

■ 4.3.3 Celulose

Conforme destacado por POU (2003), o Brasil tem a seu favor, na competição mundial da produção de celulose, as vantagens em custos de produção, qualidade de produtos e tecnologia do setor florestal, sendo que esta indústria é uma das que mais crescerá no horizonte do estudo, segundo TOMASELLI (2004). Para este, as vantagens comparativas para a produção de celulose no Brasil estão relacionadas aos solos e clima favoráveis, disponibilidade de mão-de-obra, conhecimento científico e tecnológico, produtividade, capacidade organizacional da iniciativa privada, experiências bem sucedidas com fomento.

Um dos indicadores mais utilizados para medir a competitividade de uma indústria é o volume de exportações. Segundo números da Secretaria de Comércio Exterior do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (Secex-MDIC), as exportações brasileiras de pastas celulósicas cresceram, aproximadamente, 180% em volume entre 1995 e 2005, passando de 1,984 milhões de toneladas para 5,547 milhões de toneladas, o que corresponde a uma média anual de 10,8 %. A média anual de crescimento do comércio internacional de pastas celulósicas tem sido de 4 %, portanto, é cada vez maior a presença brasileira no comércio mundial de pastas celulósicas.

Já no setor de papéis, o desempenho não é o mesmo. Na década de 90, segundo o estudo “A Década de 90 - Mercado Mundial de Papéis”, publicado pelo BNDES em 2001, a participação brasileira no comércio internacional de papéis chegou a cair de 2% em 1990 para 1% em 1999. De 2001 para cá, no entanto, tem havido uma forte tendência de aumento. De 2000 a 2005, as exportações brasileiras de papéis saltaram de 1,229 milhão de toneladas para 2,039 milhões, crescimento de 66,5% em cinco anos, o que representou uma média de 10,7% ao ano.

Tabela 43 - Projeções de produção de celulose ^{(1) (2) (3)}
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (10³ t/ano)

	2010	2015	2020	2030
Brasil	13.281	16.209	19.500	26.206
Norte	494,5	603,6	726,1	975,9
Roraima	-	-	-	-
Rondônia	-	-	-	-
Acre	-	-	-	-
Amazonas	-	-	-	-
Amapá	-	-	-	-
Pará	494,5	603,6	726,1	975,9
Tocantins	-	-	-	-
Nordeste	1.393,8	1.701,2	2.046,5	2.750,4
Maranhão	74,3	90,7	109,1	146,6
Piauí	-	-	-	-
Ceará	-	-	-	-
Rio Grande do Norte	-	-	-	-
Paraíba	-	-	-	-
Pernambuco	35,9	43,8	52,7	70,8
Alagoas	-	-	-	-
Sergipe	-	-	-	-
Bahia	1.283,6	1.566,7	1.884,7	2.532,9
Sudeste	8.137,4	9.931,8	11.948,2	16.057,3
Minas Gerais	2.943,3	3.592,4	4.321,7	5.808,0
Espírito Santo	1.263,2	1.541,8	1.854,8	2.492,7
Rio de Janeiro	-	-	-	-
São Paulo	3.930,8	4.797,6	5.771,6	7.756,6
Sul	3.254,9	3.972,6	4.779,2	6.422,8
Paraná	1.326,4	1.618,9	1.947,6	2.617,4
Santa Catarina	606,7	740,5	890,9	1.197,3
Rio Grande do Sul	1.321,7	1.613,2	1.940,7	2.608,2
Centro-Oeste	-	-	-	-
Mato Grosso do Sul	-	-	-	-
Mato Grosso	-	-	-	-
Goiás	-	-	-	-

Nota: (1) Químicas e semi-químicas, de fibra longa e curta, branqueadas e não branqueadas, e pastas de alto rendimento.

(2) Extrapolação até 2015, baseada na previsão da BRACELPA de produção de 14,5 milhões de toneladas em 2012, produção de 19,5 milhões de toneladas em 2020 (TOMASELLI, 2004), e estimativa de crescimento médio de 3,0 % a.a. entre 2020 e 2030.

(3) Valores segmentados por Unidade da Federação mantendo-se a proporção do ano de 2005, conforme apresentado em VALOR (2006).

Fonte: BRACELPA, 2006b; TOMASELLI, 2004; VALOR, 2006.

Em seu estudo, TOMASELLI (2004) destaca o crescimento da produção de celulose no Brasil a taxas superiores a 5,0 % a.a. na última década, e os novos desenvolvimentos que deverão ocorrer nesta indústria, com investimentos previstos para o período até 2012, no valor de US\$ 14,4 bilhões, destinados à ampliação da capacidade produtiva, levarão a uma produção de 19,5 milhões de toneladas em 2020, conforme mostrado na Tabela 43, com foco no aumento das exportações, que triplicaram na última década e atingiram 5,5 milhões de toneladas em 2005, devem alcançar a cifra dos 8,5 milhões de toneladas em 2015. Os principais mercados para exportação de celulose em 2005 foram a Europa com 50%, seguida da Ásia com 25% e da América do Norte com 23%.

As projeções para a produção de celulose foram realizadas com base na previsão de BRACELPA (2006b) de que o Brasil produzirá 14,5 milhões de toneladas em 2012, permitindo a extrapolação linear desta ex-

pansão até 2015. Já para 2020, o estudo de TOMASELLI (2004) estima uma produção de 19,5 milhões de toneladas no país.

Com respeito ao período compreendido entre 2020 e 2030, não foram encontrados previsões ou estudos sobre a produção nacional ou mundial. Pela necessidade de se projetar um cenário para os períodos em referência, este estudo adotou uma taxa de crescimento médio de 3,0% a.a. no intervalo, tomando como referência os valores de taxa de crescimento verificados entre os anos de 1995 e 2005, que foi de 5,7% a.a., na projeção da BRACELPA (2006b), entre 2005 e 2012, de 4,9% a.a., e na projeção de TOMASELLI (2004), entre 2005 e 2020, de 4,3% a.a.

■ 4.4 Expansão da produção da silvicultura

O estudo *Tendencias y Perspectivas del Sector Forestal en América Latina y el Caribe* (FAO, 2006b) demonstra que a produção de madeira industrial no Brasil deverá atingir cerca de 275 milhões de m³ por ano em 2020, dos quais 135 milhões de m³ serão de eucalipto, 85 milhões de pinus e 50 milhões de madeira tropical. Dentro desse cenário, a madeira tropical perderia participação e cairia dos 30% atuais para menos de 20% em 2020.

Os estudos indicam ainda que todos os segmentos deverão continuar a crescer nos próximos anos, mas taxas mais acentuadas deverão ocorrer na indústria baseada em florestas plantadas. Um dos maiores crescimentos será o da indústria de painéis de madeira, cuja produção deverá atingir cerca de 12 milhões de m³ por ano em 2020, um crescimento de 100% tomando como base a produção de 2002. As projeções de exportações de produtos florestais indicam que os totais deverão atingir, em 2020, cerca de US\$ 11,6 bilhões, um crescimento superior a 65% em relação ao exportado em 2002. Os maiores crescimentos em exportação deverão ocorrer em polpa e papel e na indústria de móveis e produtos de madeira sólida de maior valor agregado (PMVA), refletindo a tendência de investimentos nestes segmentos.

O fato de que os preços atuais de toras de reflorestamento no Brasil encontram-se próximos aos praticados em países concorrentes e a previsão de um relativo equilíbrio entre oferta e demanda no médio prazo trazem uma perspectiva de estabilidade desses preços para os próximos anos. Essa estabilidade favorecerá a implantação de novas áreas florestais e o próprio desempenho da indústria de base florestal brasileira, a qual, naturalmente, aumentará a sua participação no comércio internacional, onde os principais produtos são a madeira serrada, os painéis de madeira, móveis e PMVA, celulose e papel.

O aumento rápido da participação dos produtos florestais no comércio internacional na última década foi, em parte, dirigido pelo crescimento econômico rápido de industrialização de países como Brasil, Rússia, Índia e China. Conforme destaca WHITEMAN (2005), as tendências recentes nos mercados de produtos florestais mostra a mudança da relação tradicional, onde a indústria e o comércio internacional foram dirigidos pela má distribuição geográfica da oferta dos recursos e países com elevados níveis de demanda. Atualmente, as vantagens naturais tornaram-se menos importantes e o desenvolvimento da indústria de produtos florestais está sendo determinada pelos fatores de vantagem econômica, como por exemplo, custos de mão-de-obra, desenvolvimento de pesquisa e avanço tecnológico, e acesso ao capital. Também operam um papel relevante as políticas governamentais, pois muitas das mudanças descritas acima foram influenciadas por políticas no desenvolvimento industrial, no comércio, no uso de terra, na tecnologia e no meio ambiente.

Conforme apresentado por TOMASELLI (2004), no Informe Nacional Brasil do Estudo de Tendências e Perspectivas do Setor Florestal na América Latina, da FAO Forestry, o consumo de madeira industrial em tora no

país, considerando-se as florestas plantadas de pinus e eucalipto, manterá as taxas elevadas de crescimento verificadas nas últimas décadas, em virtude das perspectivas de crescimento da indústria de base florestal e da preferência por esta fonte em contraposição ao uso de madeira originária de florestas naturais, cujas restrições e limitações têm aumentado em função da intensificação dos aspectos regulatórios, das pressões ambientais e da perda de competitividade da madeira de floresta natural frente a outras fontes e substitutos.

Tabela 44 - Projeções da produção de florestas plantadas com pinus, eucalipto e madeira tropical
Brasil ($10^3 \text{ m}^3/\text{ha.ano}$)

	1990	1995	2000	2005 ⁽¹⁾	2010 ⁽²⁾	2015 ⁽²⁾	2020 ⁽²⁾	2030 ⁽³⁾
Pinus	-	-	-	55.000	65.000	75.000	80.000	85.000
Eucalipto	-	-	-	90.000	110.000	140.000	160.000	170.000
Madeira tropical	-	-	-	35.000	35.000	35.000	35.000	35.000
Total	81.548	112.262	127.479	180.000	210.000	250.000	275.000	290.000
Crescimento (% a.a.)		6,6%	2,6%	7,1%	3,1%	3,5%	1,9%	1,0%

Fonte: (1) Estimado a partir de dados da ABRAF, 2006 e IBGE, 1990 a 2005.

(2) TOMASELLI, 2004.

(3) Projeção EPE.

Consideradas tais perspectivas, o consumo projetado de madeira industrial para 2020 por TOMASELLI (2004) será superior a 275 milhões de m^3 por ano, sendo que deste total, a maior parte, cerca de 49 %, será representada por madeira de eucalipto, como pode ser visto na Tabela 44, que também apresenta as taxas de crescimento anualizadas para cada período considerado, desde a série histórica originada em 1990 até a projeção no horizonte de 2030.

Tabela 45 - Série histórica e projeções da área com florestas plantadas de pinus, eucalipto e madeira tropical
Brasil (10^3 ha)

	1990 ⁽¹⁾	2000 ⁽¹⁾	2005 ⁽²⁾	2010 ⁽³⁾	2015 ⁽³⁾	2020 ⁽³⁾	2030 ⁽⁴⁾
Pinus	2.434	2.534	1.835	2.100	2.300	2.550	2.800
Eucalipto	2.636	2.745	3.407	3.300	3.650	4.050	4.250
Madeira tropical	-	-	-	1.350	1.400	1.400	1.400
Total	5.070	5.279	5.242	6.750	7.350	8.000	8.450
Crescimento (% a.a.)	-	0,4%	-0,1%	5,2%	1,7%	1,7%	1,0%

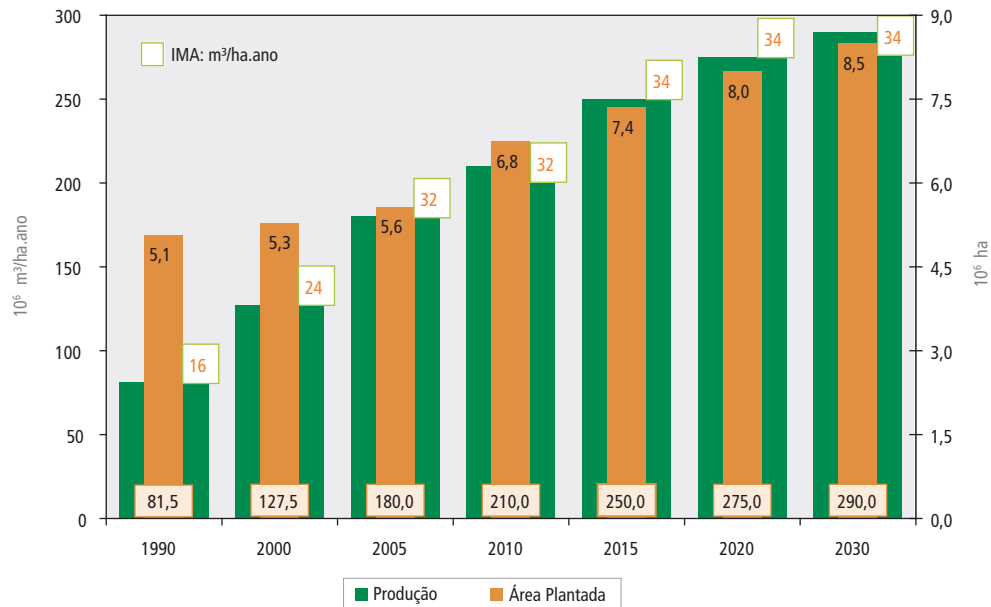
Fonte: (1) FAO, 2006a.

(2) ABRAF, 2006.

(3) STCP, 2005.

(4) Projeção EPE.

Figura 30 - Série histórica e projeções da produção, área de florestas plantadas com pinus, eucalipto e madeira tropical e IMA - Brasil



Nota: IMA - Incremento médio anual dos plantios florestais.

Com respeito ao período compreendido entre 2020 e 2030, não foram encontrados previsões ou estudos sobre a produção, nacional ou mundial. Pela necessidade de se projetar um cenário para os períodos em referência, este estudo adotou uma taxa de crescimento médio de 1,0 % a.a. no intervalo, tomando como referência os valores de taxa de crescimento verificados entre os anos 1995 e 2005, que foi de 4,8 % a.a., na projeção de TOMASELLI (2004), entre 2005 e 2010, de 3,1 % a.a., e entre 2010 e 2020, de 2,7 % a.a.

Na Tabela 45, podemos verificar o desenvolvimento da área ocupada com florestas plantadas de pinus, eucalipto e madeira tropical, desde 1990, e as projeções desta área, segundo STCP (2005), para o período até 2020, alcançando um quantitativo em torno dos 8,0 milhões de hectares. Vê-se, também, as taxas de crescimento anualizadas para cada período considerado, desde a série histórica originada em 1990 até a projeção no horizonte de 2030.

Uma visualização da evolução da relação entre a área ocupada pela silvicultura no Brasil e a produção física podem ser observadas na Figura 30, que traz ainda as referências do incremento médio anual - IMA dos plantios florestais.

■ 4.5 Consolidação da oferta de biomassa combustível pela produção agrícola, agroindustrial e silvicultural no Brasil

Como resultado das estimativas de produção e oferta de resíduos de biomassa como fonte de energia primária para uso como combustível na geração de energia elétrica, apresentamos, na Tabela 46, a oferta mássica por resíduo agrícola, agroindustrial e silvicultural, no Brasil em 2005, e nas projeções para os anos 2010, 2015, 2020 e 2030. Esta oferta mássica está quantificada em milhões de toneladas de biomassa em base seca por ano.

Tabela 46 - Oferta mássica de biomassa por resíduo agrícola, agroindustrial e silvicultural
Brasil (10⁶ t/ano)

	2005	2010	2015	2020	2030
Total	558	731	898	1.058	1.402
Resíduos agrícolas	478	633	768	904	1.196
Soja	185	251	302	359	482
Milho	176	251	304	361	485
Arroz (palha)	57	59	62	66	69
Cana-de-açúcar (palha)	60	73	100	119	160
Resíduos agroindustriais	80	98	130	154	207
Cana-de-açúcar (bagaço)	58	70	97	115	154
Arroz (casca)	2	2	3	3	3
Lixívia ⁽¹⁾	13	17	21	25	34
Madeira ⁽²⁾	6	8	10	12	16
Florestas energéticas	13	30	31	43	46
Madeira excedente ⁽³⁾	13	30	31	43	46

Notas: (1) Licor Negro com concentração entre 75 e 80 % de sólidos secos

(2) Resíduos de madeira da indústria de celulose: lenha, resíduos de madeira e cascas de árvore.

(3) Representa a diferença entre a quantificação teórica da produção potencial nas áreas ocupadas pela silvicultura e o consumo de madeira em tora para uso industrial oriundo de florestas plantadas.

Avaliando-se os resultados em quantidade física, verificamos que a oferta desta biomassa deve dobrar até 2020 e quase triplicar até 2030. Os resíduos agrícolas representam a parcela mais importante deste montante, totalizando aproximadamente 85% do total. Verifica-se que os resíduos de soja e milho giram em torno de 65% do total e palha da cana-de-açúcar representa aproximadamente 11%. Dos quase 15% restantes, o bagaço de cana-de-açúcar produzido no processo de fabricação de etanol e açúcar responde por, aproximadamente, 10%.

Em termos energéticos, as participações relativas variam pouco, uma vez que o quantitativo mássico foi referenciado à base seca da biomassa, e portanto quantifica um poder calorífico equivalente para as matérias celulósicas em geral. Estes valores sofrem alterações significativas em função de seu teor de umidade, cujo impacto fundamental ocorre sobre as opções de preparo, transporte e seu custo. Na Tabela 47, apresenta-se os valores estimados do conteúdo energético primário da biomassa, segmentado por resíduo agrícola, agroindustrial e silvicultural, no Brasil, em milhões de Giga Joules por ano, em 2005 e nas projeções para os anos 2010, 2015, 2020 e 2030.

Tabela 47 - Estimativa do conteúdo energético primário da biomassa por resíduo agrícola, agroindustrial e silvicultural
Brasil (10⁶ GJ/ano)

	2005	2010	2015	2020	2030
Total	9.207	12.329	15.061	17.857	23.468
Resíduos agrícolas	7.690	10.201	12.387	14.576	19.281
Soja	2.704	3.660	4.408	5.235	7.036
Milho	3.109	4.442	5.379	6.389	8.586
Arroz (palha)	910	938	999	1.050	1.103
Cana-de-açúcar (palha)	966	1.161	1.602	1.902	2.556
Resíduos agroindustriais	1.275	1.545	2.069	2.457	3.289
Cana-de-açúcar (bagaço)	990	1.190	1.641	1.949	2.619
Arroz (casca)	38	39	42	44	46
Lixívia ⁽¹⁾	168	216	263	317	426
Madeira ⁽²⁾	78	100	123	147	198
Florestas energéticas	243	582	605	825	897
Madeira excedente ⁽³⁾	243	582	605	825	897

Notas: (1) Licor Negro com concentração entre 75 e 80 % de sólidos secos

(2) Resíduos de madeira da indústria de celulose: lenha, resíduos de madeira e cascas de árvore.

(3) Representa a diferença entre a quantificação teórica da produção potencial nas áreas ocupadas pela silvicultura e o consumo de madeira em tora para uso industrial oriundo de florestas plantadas.

Para proporcionar maior sensibilidade na comparação das estimativas do conteúdo energético primário da biomassa com os quantitativos da matriz energética nacional e da sua importância em termos relativos e absolutos, a Tabela 48 apresenta este conteúdo energético, segmentado por resíduo agrícola, agroindustrial e silvicultural, no Brasil, em milhões de barris equivalentes de petróleo por dia, em 2005 e nas projeções para os anos 2010, 2015, 2020 e 2030.

Com se pode verificar, os valores são significativamente expressivos, da ordem de 4,24 milhões de bep/dia em 2005 e de 10,8 milhões de bep/dia. Gerando-se uma figura de entendimento, estes valores equivalem à descobertas anuais de reservas de petróleo capazes de produzir estes quantitativos. Entretanto, estes valores representam a reserva, sendo portanto, necessário ainda os investimentos em exploração e produção, que no caso dos resíduos agrícolas, referem-se ao maquinário capaz de recuperar de forma adequada esta biomassa que fica no campo, bem como os custos desta operação e do seu transporte até um ponto de aplicação como combustível para geração de energia elétrica ou matéria-prima celulósica.

Por sua vez, os resíduos agroindustriais encontram-se já concentrados em unidades industriais, como usinas de etanol e açúcar e unidades de produção de celulose, sendo a maximização do aproveitamento de seu conteúdo energético dependente de tecnologia industrial de minimização de consumo energético dos processos produtivos e de tecnologia de geração termelétrica de maior eficiência.

Como se pode ver, estes resíduos agroindustriais, em sua maioria já aproveitados, contribuem para que a matriz energética brasileira sejam expressivamente renovável, equivalendo esta oferta a nada menos que 580 mil bep/dia. No caso do setor sucroalcooleiro, este quantitativo refere-se apenas ao bagaço de cana, podendo-se acrescentar mais 150 mil bep/dia referentes ao etanol.

Tabela 48 - Estimativa do conteúdo energético primário da biomassa por resíduo agrícola, agroindustrial e silvicultural
Brasil (10⁶ bep/dia) ⁽⁴⁾

	2005	2010	2015	2020	2030
Total	4,24	5,68	6,93	8,22	10,81
Resíduos agrícolas	3,54	4,70	5,70	6,71	8,88
Soja	1,25	1,69	2,03	2,41	3,24
Milho	1,43	2,05	2,48	2,94	3,95
Arroz (palha)	0,42	0,43	0,46	0,48	0,51
Cana-de-açúcar (palha)	0,44	0,53	0,74	0,88	1,18
Resíduos agroindustriais	0,59	0,71	0,95	1,13	1,51
Cana-de-açúcar (bagaço)	0,46	0,55	0,76	0,90	1,21
Arroz (casca)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Lixívia ⁽¹⁾	0,08	0,10	0,12	0,15	0,20
Madeira ⁽²⁾	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09
Florestas energéticas	0,11	0,27	0,28	0,38	0,41
Madeira excedente ⁽³⁾	0,11	0,27	0,28	0,38	0,41

Notas: (1) Licor Negro com concentração entre 75 e 80 % de sólidos secos

(2) Resíduos de madeira da indústria de celulose: lenha, resíduos de madeira e cascas de árvore.

(3) Representa a diferença entre a quantificação teórica da produção potencial nas áreas ocupadas pela silvicultura e o consumo de madeira em tora para uso industrial oriundo de florestas plantadas.

(4) 1,0 barril equivalente de petróleo contém 5,95 Giga Joules de energia (1 bep = 5,95 GJ)

5. Conclusões

Ao longo desta Nota Técnica se verifica quão variada e expressiva é a oferta de biomassa como recurso energético, no período histórico recente e numa perspectiva de longo prazo, e sua condição de disponibilidade está essencialmente vinculada a sistemas integrados de produção agrícola, agroindustrial e silvicultural, como de grãos e oleaginosas, da cana-de-açúcar e seus derivados, e de florestas plantadas.

O Brasil é um país que já apresenta uma produção de biomassa com enorme potencial de aproveitamento, tanto para energia elétrica, como para outras formas de produção de energia derivada das biomassa celulósica. As condições naturais e geográficas são favoráveis, há grande quantidade de terra agricultável com características adequadas do solo e condições climáticas, fazendo deste o país que reúne o maior quantitativo de vantagens comparativas para liderar a agricultura.

O desenvolvimento de uma indústria tecnológica voltada para a biomassa energética é fundamental para o aproveitamento deste potencial. O setor sucroalcooleiro apresenta-se bastante avançado em termos das opções economicamente viáveis de desenvolvimento de rotas tecnológicas de recuperação e transporte da biomassa residual das culturas, podendo servir de núcleo primordial para a consolidação de um mercado deste tipo de equipamento e alavancando a economicidade da recuperação de resíduos de outras culturas agrícolas, como a da soja e a do milho, cujos quantitativos de oferta são expressivos.

Além disso, as novas rotas tecnológicas de produção de combustíveis derivados da celulose, seja através da hidrólise para etanol, seja através dos processos de gaseificação e síntese, que permitem a produção de líquidos sintéticos de gasolina e diesel, aliados ao desenvolvimento da biotecnologia voltada às culturas, potencializaram as alternativas de utilização dos resíduos, contribuindo com o fator de escala para a redução geral de custos.

Com respeito ao aproveitamento desta biomassa para produção de energia elétrica, esta convergência tecnológica deverá trazer sinergia positiva também a esta aplicação, trazendo o desenvolvimento de sistemas de gaseificação comerciais de maior escala e mais eficientes.

Tomando a questão silvicultural como exemplo de análise, destaca-se que, neste setor, as perspectivas de expansão das florestas plantadas já estão vinculadas à produção de produtos de alto valor agregado, como a madeira serrada, os painéis de madeira, móveis e PMVA, celulose e papel, cujas previsões indicam uma demanda mundial em expansão no horizonte do estudo, exigindo que plantios dedicados ao aproveitamento energético sejam realizados independentemente das expansões previstas, com valorização do aproveitamento dos resíduos desta agroindústria, considerando os resíduos silviculturais e agroindustriais.

Assim, vemos que o aproveitamento do potencial energético da biomassa disponível para geração de energia elétrica dependerá do desenvolvimento das tecnologias eficiente de geração em média escala, entre as quais os gaseificadores de até 10 MW, e do fortalecimento dos mecanismos que favoreçam a geração distribuída e a injeção de excedentes de produção de energia elétrica nas redes de distribuição, favorecendo a cogeração e otimização energética das plantas industriais, pois devido à descentralização da oferta deste recurso energético, verifica-se o encarecimento do seu transporte para uso em unidades centralizadas.

Por fim, atentamos para o fato de que o aproveitamento deste potencial deve ser, necessariamente, casado com a geração de alternativas de desenvolvimento sustentável, que preservem a perenidade do aproveitamento dos recursos naturais e humanos, destacando-se a interposição de sistemas de produção que permitam fixar as populações nas áreas rurais, oferecendo condições de geração de emprego, renda e qualidade de vida, preservação e manutenção das condições de adequação de solos, evitando a exaustão dos mesmos e a potencial desertificação, preservando as áreas para manutenção e pesquisa da biodiversidade, preservação das fontes de realimentação dos reservatórios hídricos, para que a irrigação e a oferta de água para agricultura, o maior consumidor atual deste recurso natural, sejam preservados e fortalecidos.

6. Referências bibliográficas

6.1 Reuniões temáticas na EPE: Outras fontes renováveis

Albert Cordeiro G. de Melo, Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL e ex-Coordenador do Comitê Técnico de Fontes Alternativas do GCPS/CCPE;

Luciano Basto Oliveira, Doutor em Planejamento Energético e pesquisador da COPPE e do Instituto Virtual de Mudanças Globais – IVIG;

Onório Kitayama, Consultor, Assessor da Presidência da União da Agroindústria Canavieira de São Paulo

Osvaldo Stella Martins, Doutor em Energia e Recursos Naturais, Pesquisador do Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO;

Pedro Villalobos, Consultor, M.Sc. Em Química, ex-pesquisador da COPPE/UFRJ;

Carlos Roberto Silvestrin, Vice-presidente Executivo da Associação Paulista de Cogeração de Energia – COGEN.

6.2 Documentos consultados

ABRAF, 2006, Anuário Estatístico da ABRAF 2006: ano base 2005, Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas – ABRAF, Brasília, DF.

AGE/MAPA, 2006, *Projeções do Agronegócio – Mundial e Brasil*, Assessoria de Gestão Estratégica / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, Brasília, DF.

BRACELPA, 2006a, Celulose: Evolução Histórica da Produção, Associação Brasileira de Celulose e Papel – BRACELPA, disponível em <http://www.bracelpa.org.br/br/numeros/pasta/01cel.pdf>, acessado em 15/07/2006.

BRACELPA, 2006b, O Setor Brasileiro de Celulose e Papel - Perfil do Setor 2006, Associação Brasileira de Celulose e Papel – BRACELPA, disponível em http://www.bracelpa.org.br/br/anual/perfil_setor2006.pdf, acessado em 15/08/2006.

CLEMENT, J. L., COX, C., HINER, L. A., et al., 1995, Fundamental Approach to Black Liquor Combustion Improves Boiler Operation, 1995 International Chemical Recovery Conference, April, Toronto, Ontario, Canada.

COGEN/ÚNICA, 2006, Produção de Cana-de-Açúcar – Brasil, União da Agroindústria Canavieira de São Paulo / Associação Paulista de Cogeração de Energia – COGEN.

CONAB, 2006a, Série Histórica de Grãos - Safra 1976/77 a 2005/06, Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, disponível em <http://www.conab.gov.br/download/safra/BrasilProdutoSerieHist.xls>, acessado em 31/07/2006.

CONAB, 2006b, Avaliação da Safra Agrícola de Cana-de-açúcar 2005/2006 – Primeiro Levantamento – maio/2005, Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, disponível em http://www.conab.gov.br/download/safra/Primeiro_Levantamento_Cana_2006-07_maio06.pdf, acessado em 04/08/2006.

COPERSUCAR 03, 1998, *Economia de Vapor em Usinas de Açúcar; Qualidade da Palha; Enfardamento da Palha; Recuperação e Transporte dos Fardos*. In: Geração de Energia por Biomassa - Bagaço da Cana-de-açúcar e Resíduos, Informativo do Centro de Tecnologia Copersucar, Projeto BRA/96/G31, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

COPERSUCAR 05, 1999, *Gaseificação de Bagaço e Palha de Cana-de-açúcar; Potencial de Biomassa da Cana na Forma de Resíduos da Colheita; Colheita de Cana Sem Queimar; Ensaio de Variedades de Cana com Alta Biomassa*. In: Geração de Energia por Biomassa - Bagaço da Cana-de-açúcar e Resíduos, Informativo do Centro de Tecnologia Copersucar, Projeto BRA/96/G31, Piracicaba, São Paulo, Brasil.

DOSSA, D., SILVA, H. D., BELLOTE, A. F. J., RODIGHER, H. R., 2002a, Produção e Rentabilidade de Pinus em Empresas Florestais, Colombo: Embrapa Florestas, 6p. (Embrapa Florestas. Documentos, 82), PR.

DOSSA, D., SILVA, H. D., BELLOTE, A. F. J., RODIGHER, H. R., 2002b, Produção e Rentabilidade do Eucalipto em Empresas Florestais, Colombo: Embrapa Florestas, 4p. (Embrapa Florestas. Documentos, 83), PR.

EMBRAPA/MAPA, 2005, Plano Nacional de Agroenergia 2006 - 2011, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, Brasília, DF.

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.

FAO, 2006b, *Tendencias y Perspectivas del Sector Forestal en América Latina y el Caribe*, FAO Forestry Paper 148, Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO-UN, Rome.

FAPRI, 2006, *U.S. and World Agricultural Outlook 2006*, In: FAPRI Staff Report 06-FSR 1, Food and Agricultural Policy Research Institute, Iowa State University / University of Missouri-Columbia, Iowa, USA, disponível em <http://www.fapri.iastate.edu/Outlook2006/>, acessado em 14/08/2006.

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, 2003, *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – 2002*, volume 17, Coordenação de Agropecuária - Diretoria de Pesquisas - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MP, Rio de Janeiro, Brasil.

IBGE, 2004a, *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – 2003*, volume 18, Coordenação de Agropecuária - Diretoria de Pesquisas - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MP, Rio de Janeiro, Brasil.

IBGE, 2004b, *Indicadores Agropecuários 1996 - 2003*, Série Estudos e Pesquisas - Informação Econômica, n.º 3, Coordenação de Agropecuária - Diretoria de Pesquisas - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MP, Rio de Janeiro, Brasil.

IBGE, 2005a, *Produção da Extração Vegetal e da Silvicultura – 2004*, volume 19, Coordenação de Agropecuária - Diretoria de Pesquisas - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MP, Rio de Janeiro, Brasil.

IBGE, 2005b, *Produção Agrícola Municipal - Culturas Temporárias e Permanentes 2004*, volume 31, Coordenação de Agropecuária - Diretoria de Pesquisas - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MP, Rio de Janeiro, Brasil.

IBGE, 2006, *Produção Agrícola Municipal - Cereais, Leguminosas e Oleaginosas 2005*, Coordenação de Agropecuária - Diretoria de Pesquisas - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MP, Rio de Janeiro, Brasil.

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, Jan.

LEITE, N. B., 2003, *A Questão Florestal e o Desenvolvimento*, Sociedade Brasileira de Silvicultura – SBS, Seminário Setorial Papel e Celulose, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES, Rio de Janeiro, julho.

LEITE, R. C. C., CORTEZ, L. A. B., SOBRAL, M., et al., 2005, *Estudo Sobre as Possibilidades e Impactos da Produção de Grandes Quantidades de Etanol Visando à Substituição Parcial de Gasolina no Mundo*, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE / Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP.

MAPA, 2006, *Dados Estatísticos – Culturas*, baseado em *Produção Agrícola Municipal e Levantamento Sistemático da Produção Agrícola (dez/05)* 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 04/07/2006.

MUNIZ, A. L., ANDRADE, J. F. M., 1999, “Potencial Técnico de Cogeração do Setor de Papel e Celulose no Brasil: Presente e Futuro”, In.: *XV Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Grupo II - Produção Térmica e Fontes Não Convencionais GPT14, Foz do Iguaçu, Paraná.

NOGUEIRA, L. A. H., LORA, E. E., 2002, *Wood Energy: Principles and Applications*, Núcleo de Excelência em Geração Termoeletrônica 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, em 28/06/2006.

OLIVEIRA, J. T. S., SILVA, J. C., 2003, "Variação Radial da Retratibilidade e Densidade Básica da Madeira de *Eucalyptus saligna*", *Revista Árvore*, v. 27, n. 3, pp. 381-385, Sociedade de Investigações Florestais, Viçosa-MG.

PAM – IBGE, 2006, Produção Agrícola Municipal 1990 a 2004 - Produção, Área e Rendimento Médio, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V., SHIMIZU, J.Y., 2000, "Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil", *Documentos Embrapa Florestas*, v. 38, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, disponível em <http://www.cnpf.embrapa.br/publica/seriedoc/edicoes/docum38.pdf>, acessado em 31/07/2006.

POU, M. S., 2003, *A Indústria de Papel no Brasil*, Klabin, Seminário Setorial Papel e Celulose, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES, Rio de Janeiro, julho.

RODRIGUES, L. C. E., 1991, "Tópicos de Economia Florestal", *Documentos Florestais*, Piracicaba 12 (fev.), pp. 1-49, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - Universidade de São Paulo ESALQ/USP.

SHIMIZU, J. Y., MEDRADO, M. J. S., DOSSA, D., et al., 2005, Cultivo do Pinus - Sistemas de Produção 5 Versão Eletrônica, Embrapa Florestas, disponível em <http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Pinus/CultivodoPinus/index.htm>, acessado em 29/07/2006.

SIDRA, 2006, Sistema IBGE de Recuperação Automática - Banco de Dados Agregados de Silvicultura e Extração Vegetal, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão – MP, disponível em <http://www.sidra.ibge.gov.br/>, acessado em 19/08/2006.

SIQUEIRA, M. M., PEREIRA, J. C. D., MATTOS, P. P., SHIMIZU, J., 2001, "Características Físicas, Químicas e Anatômicas da Madeira de *Pinus merkusii*", *Comunicado Técnico Embrapa Florestas*, n.º 65, Nov, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa, disponível em http://www.cnpf.embrapa.br/publica/comuntec/edicoes/com_tec65.pdf, acessado em 31/07/2006.

SPA/E/MAPA, 2006, *Açúcar e Alcool no Brasil*, Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia - Secretaria de Produção e Agroenergia / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, Brasília, DF.

STCP, 2005, *O Apagão e o Brasil Florestal 2020*, Informativo STCP, n. 8, pp. 04-09, STCP Engenharia de Projetos Ltda., Curitiba, PR.

TOMASELLI, I., 2004, "Informe Nacional Brasil", In.: Estudio de Tendencias y Perspectivas del Sector Forestal en América Latina - Documento de Trabajo ESFAL/N/6, Ministerio de Medio Ambiente de Brasil, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma.

TORQUATO, S. A., 2005, Alcool: projeção da produção e exportação no período 2005/06 a 2015/16, Instituto de Economia Agrícola - Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios - Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, disponível em <http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=4010>, acessado em 16/08/2006.

TRUGILHO, P. F., SILVA, J. R. M., MORI, F. A., et al., 2005, "Rendimentos e Características do Carvão Vegetal em Função da Posição Radial de Amostragem em Clones de *Eucalyptus*", *Cerne*, v. 11, n. 2 (abr./jun.), p. 178-186, Centro de Estudos em Recursos Naturais Renováveis - Departamento de Ciências Florestais da Universidade Federal de Lavras/UFLA.

VALOR, 2006, A Indústria de Celulose e Papel, Análise Setorial, pp. 8 a 11, Valor Econômico.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G., 2000, *A Cogeração de Energia no Segmento de Papel e Celulose: Contribuição à Matriz Energética do Brasil*. Tese de M.Sc., IEE/USP, São Paulo, SP, Brasil.

VIEIRA, L., 2004, Setor Florestal em Minas Gerais: Caracterização e Dimensionamento, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, MG.

WHITEMAN, A., 2005, "Recent Trends and Developments in Global Markets for Pulp and Paper", Forestry Department Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO Forestry. *Paperex'2005 – International Technical Conference on Pulp and Paper Industry*, New Delhi, Índia, 3-5 December 2005.

Participantes da Empresa de Pesquisa Energética – EPE

Coordenação Geral

Mauricio Tiomno Tolmasquim
Amílcar Guerreiro

Coordenação Executiva

Renato Pinto de Queiroz
Juarez Castrillon Lopes

Coordenação Técnica

Ricardo Gorini de Oliveira

Equipe Técnica

Vicente Correa Neto
Raymundo M. Aragão Neto

GERAÇÃO TERMELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA: CARACTERIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA

SUMÁRIO

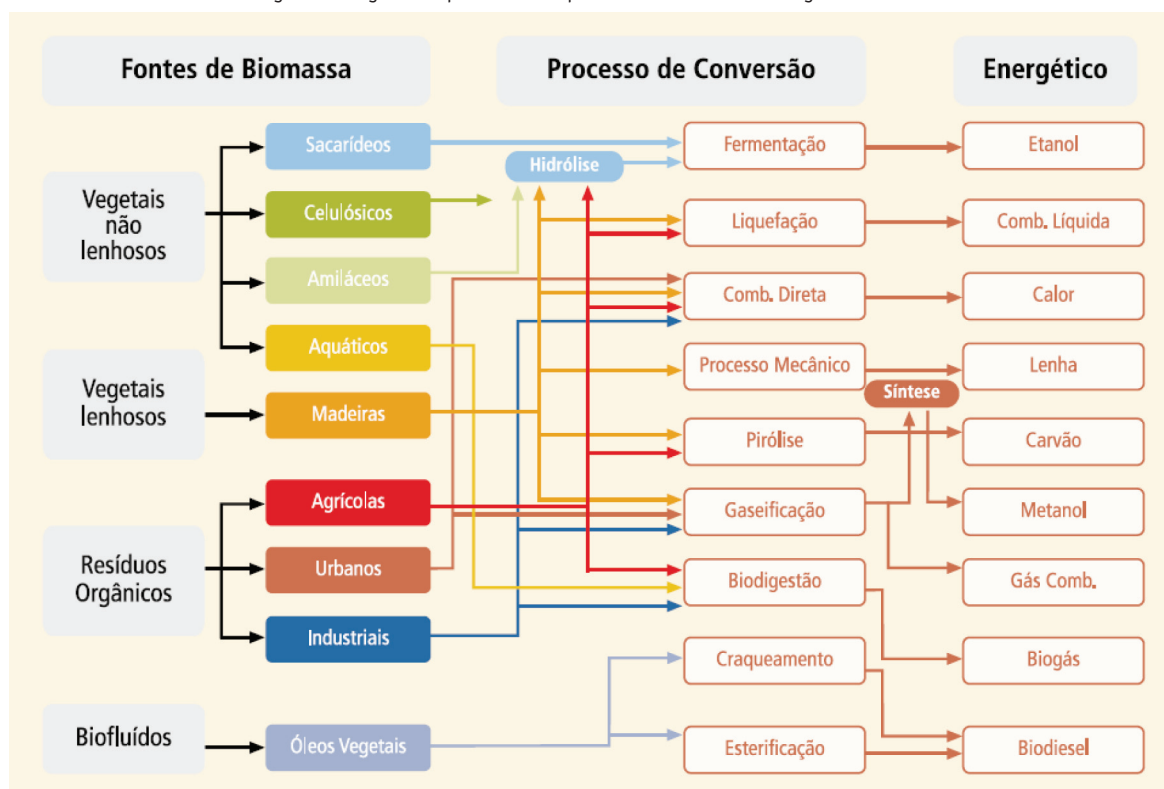
1.	Introdução	99
2.	Panorama da geração termelétrica a biomassa	101
2.1.	Panorama mundial.....	101
2.2.	Parque termelétrico a biomassa brasileiro	102
3.	Caracterização da biomassa energética.....	103
3.1.	A conversão energética da biomassa	104
3.1.1.	Conversão termoquímica	106
3.1.2.	Conversão bioquímica	106
3.1.3.	Conversão físico-química.....	107
3.2.	Conversão termoquímica de combustíveis sólidos.....	107
3.2.1.	Combustão de sólidos em leito fixo	108
3.2.2.	Combustão de sólidos pulverizados em suspensão.....	109
3.2.3.	Combustão de sólidos em leito fluidizado.....	110
3.2.4.	Gaseificação de combustíveis sólidos.....	112
4.	Tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa.....	114
4.1.	Os princípios da integração de sistemas de co-geração ao processo produtivo.....	115
4.2.	Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	116
4.3.	Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração.....	118
4.4.	Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	120
5.	Custos	123
5.1.	Custos de investimento.....	123
5.2.	Custos de operação e manutenção	125
5.3.	Custos da biomassa combustível.....	125
5.3.1.	Consolidação das estimativas de custo da biomassa no Brasil	129
5.4.	Custos de transmissão	130
5.5.	Impostos.....	131
6.	Avaliação econômica.....	131
6.1.	Base de cálculo	131
6.2.	Resultados.....	133
6.2.1.	Ciclo a vapor de contrapressão	134
6.2.2.	Ciclo a vapor de condensação e extração.....	135
6.2.3.	Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa.....	136
7.	Considerações finais.....	136
8.	Referências bibliográficas	139
8.1.	Reuniões temáticas na EPE: Outras fontes renováveis	139
8.2.	Documentos consultados.....	139

1. Introdução

A biomassa para fins energéticos em geral, e também particularmente como fonte para geração de energia elétrica, está entre as fontes renováveis com maiores possibilidades em termos de natureza, origem, tecnologia de conversão e produtos energéticos, exigindo para o alcance dos objetivos de caracterização deste relatório, que se faça primeiramente uma definição do escopo a ser considerado.

A biomassa energética apresenta rotas significativamente diversificadas, como pode ser visto na Figura 1, com extensa variedade de fontes, que vão desde os resíduos agrícolas, industriais e urbanos até as culturas dedicadas, com grande quantidade de tecnologias para os processos de conversão, incluindo desde a simples combustão para obtenção da energia térmica até processos físico-químicos e bioquímicos complexos para a obtenção de combustíveis líquidos e gasosos e outros produtos, que variam desde micro até a larga escala, com significativa amplitude na maturidade do sistema energético e no desenvolvimento das tecnologias.

Figura 1 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil 2003 – ANEEL

A própria utilização do termo biomassa é bastante ampla e encontra grande variação de significados na literatura, cabendo inclusive uma definição do que se pretende incluir neste termo quando se realiza qualquer trabalho ou estudo, como verificado na Tabela 1.

Tabela 1 - Rotas tecnológicas para conversão da biomassa em produtos e serviços energéticos

Fontes de biomassa	Rotas tecnológicas	Bioenergéticos	Serviço final
Produção agrícola e resíduos florestais	Densificação Esterificação	Peletes de madeira Briquetes Biodiesel	Calor Eletricidade Transporte
Cultura de energéticas: biomassa vegetal, madeira, óleos vegetais	Combustão Gaseificação Pirólise, fermentação/ destilação	Carvão vegetal Gás combustível Bioóleo Bioetanol	Calor Eletricidade Transporte
Resíduos de processamento da biomassa	Digestão Hidrólise	Biogás Bioetanol Solventes	Calor Eletricidade Transporte
Resíduos urbanos	Digestão Combustão Gaseificação	Biogás Combustível residual	Calor Eletricidade

Fonte: HALL et al. 2005

Considerando o contexto em que se insere esta caracterização técnico-econômica das tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa, cujo papel é subsidiar um plano de energia com foco na geração de energia elétrica para o Brasil, concentraremos nossa atenção nas fontes de biomassa de escala compatível com a integração ao sistema elétrico e nas tecnologias que atendem ao perfil de processo do país, considerando tanto as tecnologias para centrais de geração termelétrica associadas a processos produtivos através de sistemas integrados de co-geração quanto as alternativas para sistemas autônomos exclusivamente dedicados à geração termelétrica para prestação de serviço público.

Esta distinção pouco afeta a descrição objetivada neste relatório, pois as bases tecnológicas neste universo avaliado são genericamente similares em ambos os sistemas considerados, variando principalmente em escala, e em alguns parâmetros de integração da unidade de geração termelétrica com o sistema produtivo. O aspecto de maior significância neste caso seria a fonte de biomassa, cuja disponibilidade é um fator primordial, seja como resíduo ou produção dedicada, tanto para a escolha do sistema quanto para a sua viabilidade.

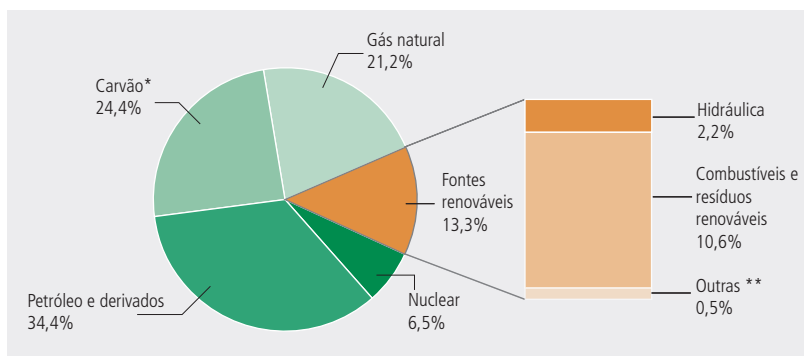
Neste sentido, este trabalho cobre as tecnologias de geração termelétrica aplicáveis ao contexto já descrito, sem tecer maiores considerações sobre as fontes de biomassa, pois este aspecto será abordado em outro documento, abordaremos as tecnologias de combustão e gaseificação, integradas ou não em co-geração a sistemas produtivos.

2. Panorama da geração termelétrica a biomassa

■ 2.1. Panorama mundial

As fontes renováveis de energia tiveram uma participação de 13,3 % na oferta total de energia primária¹ do mundo em 2003, que alcançou a marca de 10.579 milhões de tep. Os combustíveis renováveis em geral, inclusive resíduos diversos, responderam por 80 % desta participação, com a biomassa (comercial e não comercial) representando 97 %. A energia hidráulica foi responsável por 16,2 %, cabendo o restante às fontes geotérmica, solar, eólica, ondas/marés/oceanos.

Figura 2 - Participação das fontes no total da oferta de energia primária – 10.579 10⁶ tep
Mundo – 2003 (coluna refere-se a % do total)



Nota: * Inclui resíduos não renováveis;

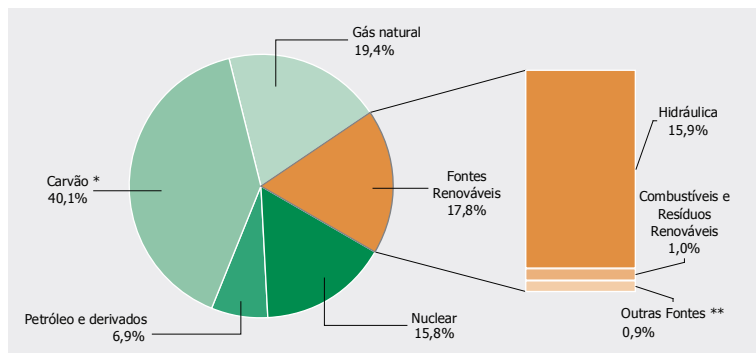
** Inclui fonte geotérmica, solar, eólica, ondas/marés/oceanos

Fonte: IEA 2006, IEA 2005

Na geração de energia elétrica no mundo, as fontes renováveis aparecem em terceiro lugar, respondendo por 18% do total de 2003, atrás do carvão (40%) e do gás natural (19%), mas à frente da fonte nuclear (19%) e do petróleo e seus derivados (7%). As unidades geradoras hidrelétricas foram responsáveis por 90 % desta geração de origem renovável, seguida pelos combustíveis e resíduos renováveis (6%). Embora apresentando um rápido crescimento, as fontes geotérmica, solar, eólica, ondas/marés/oceanos, representaram menos de 4 % da eletricidade gerada no mundo naquele ano.

¹ Calculada pela metodologia de conteúdo energético da Agência Internacional de Energia (IEA, 2005), incluindo bunker marítimo e energéticos comerciais e não comerciais e excluindo comércio de eletricidade e calor

Figura 3 - Participação das fontes no total da geração de energia elétrica – 16.661 TWh
Mundo – 2003 (coluna refere-se a % do total)



Nota: * Inclui resíduos não renováveis;

** Inclui fonte geotérmica, solar, eólica, ondas/marés/oceanos

Fonte: IEA 2006, IEA 2005

■ 2.2. Parque termelétrico a biomassa brasileiro

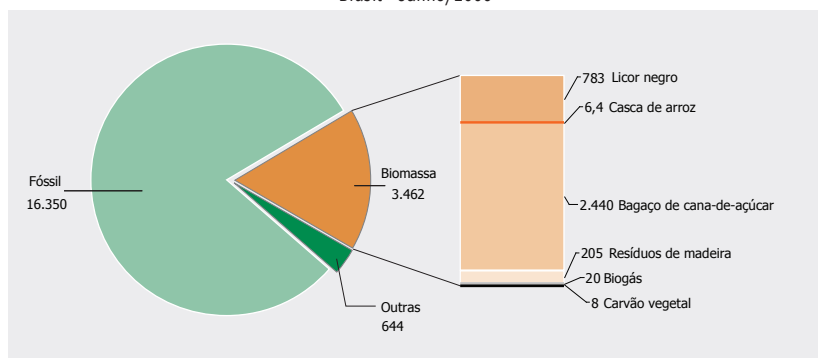
Conforme o Banco de Informações de Geração – BIG (ANEEL, 2006) o Brasil possuía, ao final de junho de 2006, 1.545 empreendimentos de geração de energia elétrica em operação, totalizando uma capacidade instalada 94.858,5 MW de potência.

Desta potência em operação, 20.456 MW correspondem a 922 usinas termelétricas, ou seja, 21,6% do total, sendo as fontes combustíveis divididas em 3 classes: fósseis, biomassa e outros². Na classe biomassa, aparecem como fontes combustíveis o carvão vegetal, resíduos de madeira, bagaço de cana-de-açúcar, casca de arroz, licor negro e biogás.

As termelétricas cujo combustível é da classe biomassa têm uma potência em operação de 3.462,2 MW, representando 16,9% da capacidade termelétrica e apenas 3,6% do total do país. Entre os combustíveis da classe biomassa, destaca-se o bagaço de cana-de-açúcar, cuja capacidade em operação corresponde a 70,5% do total termelétrico, ou seja, 2.440 MW, distribuídos em 255 usinas. O licor negro, resíduo industrial do processo de produção de papel e celulose, é o segundo combustível da classe biomassa em termos de potência em operação, com 22,6% do total (782,6 MW em 13 instalações). Por fim, cabe destacar os resíduos de madeira que respondem por 5,9%, ou seja, 205 MW em operação em 24 instalações. Os demais combustíveis da classe biomassa apresentam potências negligenciáveis.

² Outros inclui efluentes combustíveis de diferentes processos produtivos

Figura 4 - Potência em operação em usinas termelétricas por fonte - MW
Brasil – Junho/2006



Fonte: Banco de Informações de Geração – BIG, ANEEL, 2006.

Evidente é a importância das fontes bagaço de cana-de-açúcar, licor negro e resíduos de madeira, que correspondem, respectivamente, a instalações de co-geração integradas aos processos produtivos no setor de açúcar e etanol e no setor de papel e celulose, pontuando assim, de forma clara, o direcionamento das tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa estudadas neste trabalho.

Um detalhe a destacar sobre os números apresentados é a possibilidade de estes estarem subdimensionados. Isto porque sua fonte, o Banco de Informações de Geração – BIG, da ANEEL, resulta do cadastro de unidades de geração termelétrica em conformidade à lei nº 9.074, de 07/07/1995, que determina através de seu artigo 8º “O aproveitamento de potenciais hidráulicos, iguais ou inferiores a 1.000 kW, e a implantação de usinas termelétricas de potência igual ou inferior a 5.000 kW, estão dispensadas de concessão, permissão ou autorização, devendo apenas ser comunicados ao poder concedente.”

Só no setor sucroalcooleiro, existem 340 usinas cadastradas no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, frente às 255 usinas registradas no BIG – ANEEL. Como este é um setor tradicionalmente autoprodutor de energia, cujo parque produtivo é em sua maioria anterior à entrada em vigor da referida lei, com o agravante de que as características produtivas e técnicas de muitas destas usinas implicam em instalações de geração termelétrica com capacidade instalada inferior à de obrigatoriedade de autorização como definido na lei, consideramos possível que a comunicação de alguma destas não tenha ainda ocorrido.

3. Caracterização da biomassa energética

O termo biomassa compreende a matéria vegetal gerada pela fotossíntese e seus diversos produtos e subprodutos derivados, tais como as florestas, as culturas e os resíduos agrícolas, os dejetos animais e a matéria orgânica que é contida nos rejeitos industrial e urbano. Esta matéria contém a energia química acumulada através da transformação energética da radiação solar e pode ser diretamente liberada por meio da combustão, ou ser convertida através de diferentes processos em produtos energéticos de natureza distinta, tais como: carvão vegetal, etanol, gases combustíveis e de síntese, óleos vegetais combustíveis e outros.

Na visão de NOGUEIRA e LORA (2002), a biomassa como recurso energético pode ser apresentada em três grupos principais, diretamente relacionados com a origem da matéria que constitui os biocombustíveis. Estes grupos seriam:

a) Biomassa energética florestal: são os biocombustíveis provenientes dos recursos florestais, seus produtos e subprodutos, que incluem basicamente biomassa lenhosa, produzida de forma sustentável a partir de florestas cultivadas ou de florestas nativas, obtida por desflorestamento de floresta nativa para abertura de áreas para agropecuária, ou ainda originada em atividades que processam ou utilizam a madeira para fins não energéticos, destacando-se a indústria de papel e celulose, indústria moveleira, serrarias etc.

O conteúdo energético desta classe de biomassa está associado à celulose e lignina contidas na matéria e seu baixo teor de umidade. Seu aproveitamento no uso final energético se realiza, principalmente, através das rotas tecnológicas de transformação termoquímica mais simples, como combustão direta e carbonização, mas rotas mais complexas também são empregadas para a produção de combustíveis líquidos e gasosos, como metanol, etanol, gases de síntese, licor negro (um subproduto da indústria de celulose), entre outros;

b) Biomassa energética agrícola: são os biocombustíveis provenientes das plantações não florestais, tipicamente originados de colheitas anuais, cujas culturas são selecionadas segundo as propriedades de teores de amido, celulose, carboidratos e lipídios, contidos na matéria, em função da rota tecnológica a que se destina. Podem ser divididos em duas subcategorias:

i. Culturas agroenergéticas: utilizando principalmente rotas tecnológicas de transformações biológicas e físico-químicas, como fermentação, hidrólise e esterificação, empregadas para a produção de combustíveis líquidos, como o etanol, o biodiesel e óleos vegetais diversos. Integram estas culturas a cana-de-açúcar, o milho, o trigo, a beterraba, a soja, o amendoim, o girassol, a mamona e o dendê, existindo uma grande variedade de oleaginosas a serem exploradas;

ii. Subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal: uma expressiva quantidade de subprodutos resultantes das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal é tratada como resíduo, porém possui potencial energético importante, que varia segundo a rota tecnológica empregada, que pode variar desde a transformação termoquímica, com combustão direta, pirólise ou gaseificação, passando pelas transformações biológicas e físico-químicas, incluindo a digestão anaeróbica. Como exemplos destas culturas, temos a casca de arroz, a castanha de caju e esterco animal;

c) Rejeitos urbanos: a biomassa contida em resíduos sólidos e líquidos urbanos tem origem diversa, e se encontra no lixo e no esgoto. O lixo urbano é uma mistura heterogênea de metais, plásticos, vidro, resíduos celulósicos e vegetais, e matéria orgânica. As rotas tecnológicas de seu aproveitamento energético são: a combustão direta, a gaseificação, pela via termoquímica, após a separação dos materiais recicláveis, e a digestão anaeróbica, na produção de biogás, pela via biológica.

O esgoto urbano possui matéria orgânica residual diluída, cujo tratamento é uma imposição sanitária, que através da rota tecnológica de digestão anaeróbica encontra aplicação energética.

■ 3.1. A conversão energética da biomassa

Uma miríade de tecnologias de conversão energética da biomassa está disponível, e resultam em uma também ampla variedade de produtos energéticos, nos três estados físicos (sólido, líquido e gasoso), para geração de calor, energia elétrica e combustíveis para o transporte. As três principais rotas tecnológicas de conversão da biomassa energética disponíveis são:

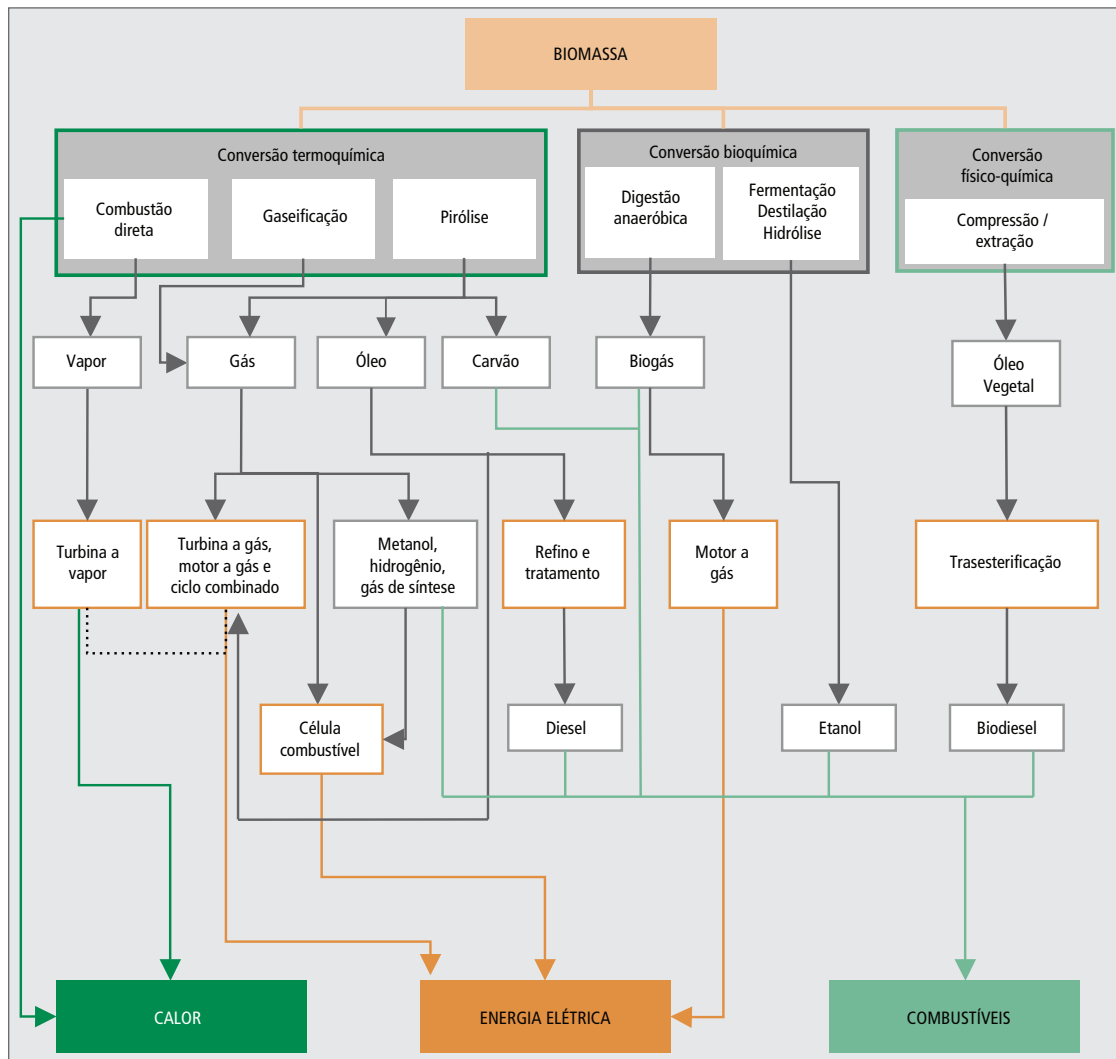
d) Conversão termoquímica: que inclui a combustão direta, a gaseificação e a pirólise;

e) Conversão bioquímica: que inclui a digestão anaeróbica, a fermentação/destilação e a hidrólise;

f) Conversão físico-química: que inclui a compressão, extração e esterificação.

Na geração de calor e de energia elétrica, a tecnologia da combustão direta é aplicada já comercialmente, enquanto a gaseificação e a pirólise em grandes potências estão ainda em um estágio da demonstração. Se somente o calor for gerado, a combustão parece a mais apropriada. Se a eletricidade dever ser produzida com elevada eficiência, a gaseificação e a pirólise são opções promissoras.

Figura 5 - Rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa



Fonte: Adaptado de LARKIN et al. (2004)

■ 3.1.1. Conversão termoquímica

Quando a biomassa é usada para fins energéticos, a energia “quimicamente armazenada” é convertida em calor por meio da combustão, que configura a conversão termoquímica. Uma variedade larga de tecnologias capazes de converter a biomassa em energia está disponível através da via termoquímica, e sua diferenciação está associada à quantidade de oxigênio que é fornecido ao processo, tendo como referência o valor do coeficiente estequiométrico, resultando nas vias de combustão direta, pirólise e gaseificação (DINKELBACH, 2000). Todos estes processos são baseados em:

1. Decomposição térmica da carga combustível primária, e então;
2. Combustão dos produtos resultantes da decomposição.

No caso da combustão direta, as etapas 1 e 2 ocorrem no mesmo reator, enquanto na gaseificação e na pirólise elas ocorrem em espaços fisicamente separados. A vantagem mais importante desta separação espacial é a possibilidade de aplicar os “produtos” dos processos em máquinas térmicas de combustão interna, como os motores de combustão interna e as turbinas a gás, que requerem combustíveis líquidos ou gasosos, e proporcionam eficiências na geração elétrica mais elevadas.

- Combustão direta é o processo em que é fornecida uma quantidade suficiente de oxigênio para conseguir a combustão completa da carga combustível (coeficiente estequiométrico 1). O produto principal é um gás de combustão a elevada temperatura que consiste, principalmente, nos produtos da combustão: dióxido de carbono (CO_2) e água (H_2O), assim como o nitrogênio (N_2);

- Gaseificação é o processo em que é fornecida uma quantidade de oxigênio não suficiente para se conseguir a combustão completa da carga combustível ($0 < \text{coeficiente estequiométrico} < 1$), obtendo-se uma combustão parcial. O produto principal é um gás que contém como principais componentes a monóxido de carbono combustível (CO), o hidrogênio (H_2), e o metano (CH_4). Este gás combustível produzido pode ser queimado nas caldeiras, em motores ou em turbinas a gás;

- Pirólise é o processo em que muito pouco ou nenhum oxigênio é fornecido para a combustão da carga combustível (coeficiente estequiométrico = 0). Através do seu aquecimento a, relativamente, baixas temperaturas (500 a 1.000 °C), ocorre a degradação térmica do combustível, resultando em produtos combustíveis sólidos, como o carvão vegetal, líquidos (óleo pirolítico) e gasosos (gás pirolítico).

■ 3.1.2. Conversão bioquímica

A via bioquímica de conversão energética da biomassa é aquela que utiliza processos biológicos e bioquímicos, que inclui a digestão anaeróbica, a fermentação/destilação e a hidrólise. Destas, a digestão anaeróbica é a que apresenta as mais adequadas condições para a geração de energia elétrica, através da utilização do biogás. O etanol, combustível líquido resultante dos processos de fermentação/destilação ou hidrólise, tem uma aplicação predominante como combustível para o transporte, embora seja aplicável em máquinas térmicas de ciclos termelétricos.

- Digestão anaeróbica é o processo que utilizando resíduos orgânicos diversos produz metano (CH_4) como gás combustível, e se realiza em biodigestores, uma tecnologia madura e bem estabelecida, onde a degradação natural da matéria orgânica, tal como a biomassa, se efetua por populações bacterianas na ausência do oxigênio, produzindo biogás, uma mistura de metano (CH_4) e de dióxido de carbono (CO_2), sendo que a concentração volumétrica de metano varia entre 40-75%, em função do tipo de matéria orgânica processada.

Os biodigestores são recipientes estanques, oferecendo condições ideais para que as bactérias fermentem a carga de matéria orgânica (VERINGA, 2000);

■ 3.1.3. Conversão físico-química

A via de conversão físico-química da biomassa é aquela que utiliza técnicas de compressão e extração de óleos vegetais de oleaginosas para posterior modificação química através do processo de óleos através da esterificação. Os óleos vegetais esterificados podem ser utilizados em motores a combustão interna, pois adaptam as propriedades do combustível às exigências dos motores de ciclo diesel. Este processo, na presença de um álcool e de um catalisador (geralmente hidróxido de sódio aquoso ou hidróxido de potássio), elimina glicerinas (VERINGA, 2000).

Os óleos vegetais puros podem ser usados diretamente em motores de ciclo diesel, entretanto, suas propriedades, baixo número de cetanas e elevada viscosidade, os tornam menos vantajosos para esta aplicação. Para superar estas características, o óleo vegetal puro é convertido frequentemente em biodiesel, com número de cetanas mais elevado e uma viscosidade mais baixa, tornando-o mais apropriado para estes motores. O biodiesel, como os óleos vegetais, é combustível líquido cuja aplicação predominante é como combustível para o transporte, embora seja aplicável em máquinas térmicas de ciclos termelétricos (THUIJL et al., 2003).

■ 3.2. Conversão termoquímica de combustíveis sólidos

Existe uma grande variedade de biomassa sólida combustível empregável como fonte de geração termelétrica, seja na forma de madeira, ou na de resíduos sólidos de processamento agrícola ou industrial (bagaço de cana, cascas de árvores, licor negro, resíduos agrícolas, lixo urbano), sendo seu principal emprego em sistemas de geração de vapor industrial ou de co-geração.

Embora o emprego 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 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, as principais tecnologias aplicáveis são os ciclos Rankine, compostos por caldeiras e turbinas a vapor em variadas composições, e gaseificadores com empregos dos ciclos Brayton (turbinas a gás) e ciclo combinado.

O combustível sólido é constituído por partículas de dimensões e formas variadas, caracterizadas pela análise granulométrica e a esfericidade e sua combustão, reação química do oxigênio com materiais combustíveis que resulta em luz e rápida produção de calor, pode ser realizada em equipamentos onde o sólido permanece em um leito fixo, ou é pulverizado em suspensão ou então, se mantém em suspensão em um leito fluidizado, ou alguma combinação dessas, de acordo com o comportamento dinâmico das partículas sujeitas ao fluxo gasoso no interior da câmara de combustão.

Outra forma de utilizar a energia do combustível sólido é gaseificá-lo em uma etapa precedente à combustão propriamente dita. A gaseificação é a conversão de qualquer combustível sólido ou líquido em um gás

energético através da oxidação parcial a temperatura elevada. Esta conversão pode ser realizada em vários tipos de reatores, chamados gaseificadores.

Com base no trabalho de LORA e HAPP (1997) apresentamos a seguir uma breve descrição dos tipos de caldeiras existentes, segundo o princípio de combustão do sólido, e do processo de gaseificação.

■ 3.2.1. Combustão de sólidos em leito fixo

A combustão de sólidos em leito fixo é também chamada combustão em camada, e é uma forma pomposa de descrever o método mais antigo para a combustão de sólidos, pois se trata da incineração de volumes de combustível de fora para dentro da massa estacionada. A camada de combustível é depositada em uma grelha onde a combustão se processa. A principal variação presente nas câmaras de combustão de leito fixo se refere às diversas configurações com relação à alimentação de combustível e de ar.

A alimentação do combustível em um leito fixo determina os mecanismos e a taxa de aquecimento das partículas, caracterizando o processo de combustão, e pode ser realizada sob ou sobre o leito, ou ainda lateralmente, comum em grelhas rotativas. A alimentação sobre o leito é a forma mais simples de introduzir o combustível aproveitando a ação da gravidade, e por isso mais aplicada. As características dos equipamentos e as variáveis que influenciam significativamente a combustão em leito fixo são:

- Tipo de grelha: por ser responsável pela distribuição do ar primário sua sofisticação permite a redução do excesso de ar;
- Umidade do combustível: elevação do teor de vapor nos gases de combustão, com efeito global de aumento das perdas nos gases de exaustão e diminuição da temperatura da câmara de combustão, com redução da troca térmica;
- Dimensão média de partícula: aumenta o tempo necessário à secagem, pirólise, gaseificação e combustão;
- Distribuição granulométrica: altos teores de finos causam aumento das perdas por carbono não convertido nas cinzas, aumento do teor de cinzas nos gases de exaustão com entupimentos nos constituintes da caldeira;
- Teor de voláteis: provoca aumento da intensidade de combustão da grelha;
- Teor e comportamento das cinzas;
- Coeficiente de ar primário;
- Coeficiente de ar total;
- Temperatura da câmara de combustão.

As fornalhas em leito fixo podem ser divididas segundo suas características construtivas, que são: as fornalhas celulares, ferradura e Ward, as fornalhas de grelha estacionária, horizontal ou inclinada e as fornalhas com grelha móvel, mecânica ou rotativa. Nas fornalhas celulares o combustível é queimado em uma pilha ou monte numa câmara de tijolos refratários com admissão de ar por todas as direções. Nas fornalhas de grelha estacionária a grelha balsa para eliminar as cinzas e recebem a carga de combustível por cima ou por baixo. As grelhas móveis se dividem em dois conjuntos específicos: a grelha mecânica, que possui componentes móveis com a finalidade de movimentar o combustível pela grelha de acordo com os diferentes estágios da combustão, e a grelha rotativa, composta por um sistema de alimentação e uma esteira mecânica que transporta o combustível pelo interior da fornalha durante o processo de combustão e depois elimina as cinzas.

As grelhas mecânicas são complexas, caras e recomendadas para combustíveis de difícil combustão e alta umidade, como resíduos sólidos urbanos e industriais. As grelhas rotativas oferecem diversas vantagens como a eliminação contínua de cinzas, eliminando a necessidade de paradas para limpeza e possibilita a regulação da velocidade de deslocamento no interior da fornalha para adequar às características do combustível.

Na combustão em pilha sem grelha todo o ar de combustão insuflado incide sobre o leito, como no caso das fornalhas tipo Ferradura e Ward. A prática mais difundida é a utilização fornalhas com grelha e alimentação de uma parte do ar primário sob o leito, que possibilita otimizar o processo de combustão através do controle do excesso de ar, elevar a taxa de combustão e minimizar o arraste de partículas finas.

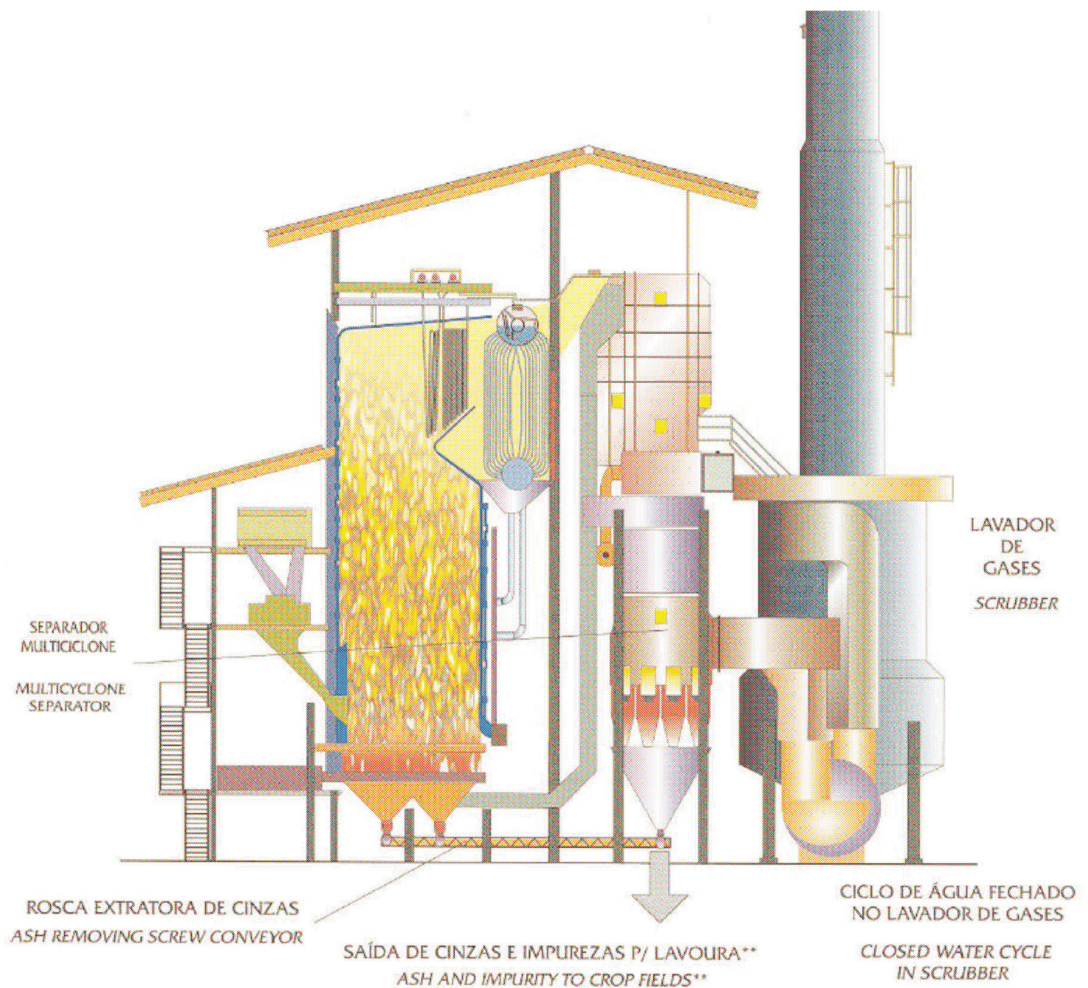
■ 3.2.2. Combustão de sólidos pulverizados em suspensão

A combustão de sólidos em suspensão é caracterizada pela dispersão do sólido no fluxo gasoso em todo o volume da câmara de combustão e pelo reduzido tempo de combustão das partículas. O combustível, moído em instalações mecanizadas, recebe a denominação de pulverizado, e o processo de combustão é representado pelo movimento das partículas dentro da câmara de combustão, queimando de maneira isolada umas das outras, passando pelos estágios de aquecimento, secagem, emissão de voláteis, combustão dos voláteis e combustão do carbono fixo. Mesmo nos equipamentos onde a queima por suspensão é total sempre existe uma grelha para queima das partículas maiores e para remoção das cinzas.

Os dispositivos utilizados podem variar dependendo do combustível, umidade, granulometria desejada e porte da instalação. Para garantir a combustão completa e adequada das partículas combustíveis, as fornalhas devem apresentar recirculação dos gases quentes para a zona de alimentação do combustível, permitir a circulação de partículas combustíveis de múltipla granulometria garantindo o tempo de permanência necessário para a combustão das partículas maiores. As características dos equipamentos e as variáveis que influenciam significativamente a combustão em suspensão, além das já citadas para o leito fixo são:

- Índice de rotação do queimador;
- Temperatura da câmara de combustão;
- Temperatura do ar secundário.

Figura 6 - Esquema de caldeira geradora de vapor com combustível pulverizado em suspensão na câmara de combustão



Fonte: Equipalcool Sistemas Ltda.

Na prática industrial, estas fornalhas são chamadas de fornalhas ciclônicas e podem ser utilizadas também como um primeiro estágio de uma câmara de combustão, podendo ser posicionada de maneira vertical, horizontal ou inclinada. Nelas o ar secundário é injetado tangencialmente a alta velocidade, criando um vórtice dentro da fornalha, que permite a circulação múltipla das partículas de combustível. Estes dispositivos são caros, apresentam temperaturas mais altas na fornalha, aumentando a concentração de óxidos de nitrogênio e apresentam pouca inércia térmica, ou seja, qualquer variação na umidade ou no fluxo do combustível afeta grandemente a operação dos sistema.

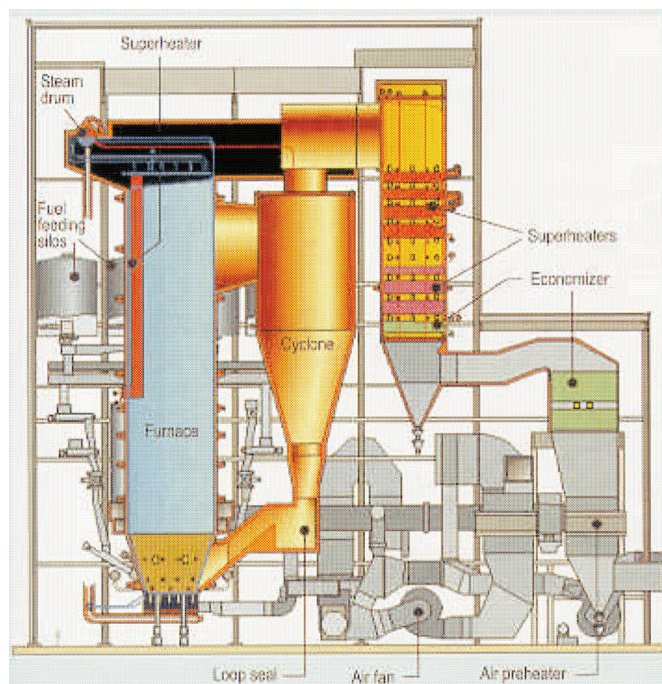
■ 3.2.3. Combustão de sólidos em leito fluidizado

A combustão em leito fluidizado caracteriza-se pela formação de um leito de sólidos em suspensão produzido por efeito do fluxo de ar forçado através da grelha distribuidora. As partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas inertes (areia, cinzas, alumina), fluidizadas pelo fluxo

de ar. A corrente de ar passa através do meio inerte e vai aumentando a velocidade até atingir a velocidade mínima de fluidização, a partir da qual a mistura ar e sólidos adquire características de um fluido, chamado de leito fluidizado, pois é alcançada a velocidade de transporte pneumático e todas as partículas são arrastadas com os gases.

Devido ao contato entre o combustível e o ar no leito fluidizado, os processos de transferência de massa e energia se realizam com mais facilidade, obtendo-se uma distribuição quase uniforme de temperatura ao longo do equipamento, flexibilidade em relação ao tipo de combustível, conteúdo de umidade e cinzas e dimensões das partículas. De acordo com as características construtivas, as fornalhas a leito fluidizado podem ser classificadas como convencionais ou recirculantes.

Figura 7 - Esquema de caldeira geradora de vapor com câmara de combustão em leito fluidizado com recirculação



Fonte: VERINGA, 2000.

Na fornalha de leito fluidizado convencional, o combustível é queimado num leito de altura definida dentro do qual geralmente se colocam feixes de tubos para o controle da temperatura de combustão, evitando-se assim a fusão das cinzas do combustível.

Na fornalha de leito fluidizado recirculante, as velocidades do ar são maiores que a velocidade de transporte pneumático, o que provoca o arraste das partículas de combustível e do material inerte. Um conjunto de separadores ciclônicos situado na saída da fornalha reintegra os mesmos no leito para que a combustão seja concluída.

■ 3.2.4. Gaseificação de combustíveis sólidos

A tecnologia de gaseificação é a conversão de qualquer combustível líquido ou sólido, como a biomassa, em um gás energético através da oxidação parcial a temperatura elevada. Esta conversão pode ser realizada em vários tipos de reatores, chamados gaseificadores. O processo de gaseificação ocorre normalmente em quatro etapas físico-químicas distintas, com temperaturas de reação diferentes: secagem da biomassa, pirólise, redução e combustão. Cada um desses processos pode ser visualizado como ocorrendo em uma região separada dentro do equipamento, em uma sequência determinada pelas características do projeto.

A situação da zona de combustão é determinada pela posição da entrada de ar e sua temperatura varia normalmente entre 900 e 1.300° C, resultado da reação exotérmica entre o sólido combustível e o oxigênio do ar. Os gases quentes da zona de combustão passam em seguida para a zona de redução, sempre adjacente, acima ou abaixo, onde na ausência de oxigênio ocorre o conjunto de reações típicas que originam os componentes combustíveis do gás produzido.

A zona de pirólise fica situada acima das zonas de combustão e redução, que fornecem a energia necessária para os processos pirolíticos. As reações de pirólise começam a ocorrer a temperaturas em torno de 400°C, quando a estrutura dos materiais ligno-celulósicos começa a se decompor por ação térmica. Consideradas globalmente, as reações de pirólise são exotérmicas, formando-se vapor d'água, metanol, ácido acético e uma grande quantidade de alcatrões pesados. A zona de secagem, situada logo acima da zona de pirólise, apresenta temperaturas suficientemente baixas para evitar a decomposição da biomassa e suficientemente altas para garantir a eliminação da umidade em forma de vapor d'água.

Os principais componentes combustíveis do gás formado são o monóxido de carbono (CO), o hidrogênio (H₂) e o metano (CH₄), em percentuais que variam com o tipo de gaseificador, com as condições de operação e com a umidade da matéria-prima. Estes parâmetros são fatores que determinam também o grau de contaminação do gás com alcatrões e partículas de fuligem. Não se verificam grandes variações na composição do gás quando utilizados diferentes tipos de gaseificadores, mesmo trabalhando com diferentes tipos de biomassa. A mistura de gases quentes que sai do gaseificador é chamada de gás pobre devido ao seu baixo poder calorífico, em torno de 4,5 MJ/Nm³ e 6,0 MJ/Nm³, correspondente a, aproximadamente, 10% do poder calorífico do gás natural. Projetos mais recentes já produzem gases que alcançam um poder calorífico da ordem de 30% do poder calorífico do gás natural. O efeito diluidor do nitrogênio, que compõe, aproximadamente, 76% do ar é a principal razão do baixo poder calorífico do gás resultante do processo.

O gaseificador é um reator químico alimentado com combustível sólido ou líquido e com uma quantidade controlada de ar forçada para dentro do equipamento em uma posição ditada pelo projeto. Parte do combustível entra em combustão como em uma fornalha qualquer e a característica principal da gaseificação é que o fornecimento de ar é controlado de modo a evitar que a combustão se estenda a toda a carga. Pela queima de parte da carga libera-se a energia que é utilizada na degradação química e gaseificação do resto do material. Os gaseificadores podem ser classificados de acordo com diversas características, a saber:

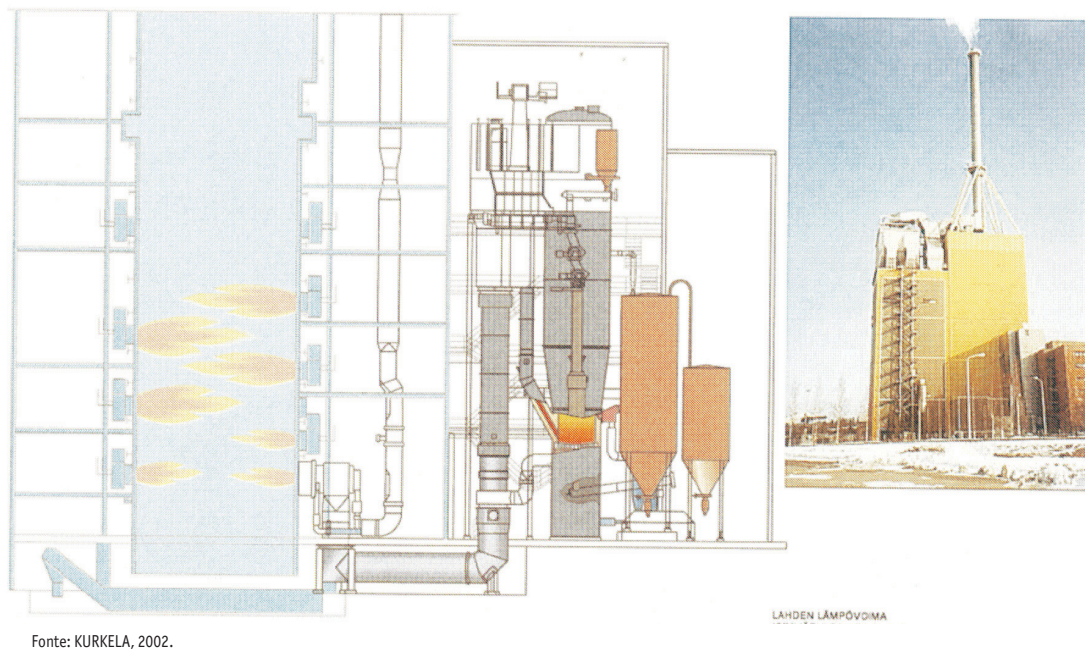
- Poder Calorífico do Gás Produzido: baixo poder calorífico (até 5 MJ/Nm³), médio Poder Calorífico (de 5 a 10 MJ/Nm³) e alto Poder Calorífico (de 10 a 40 MJ/Nm³);
- Tipo de Agente Gaseificador: ar, vapor d'água, oxigênio, hidrogênio (hidrogaseificação);
- Movimento Relativo das Massas: contrafluxo (contracorrente), fluxo direto (concorrente), leito fluidizado;

- Pressão de Trabalho: baixa pressão (atmosférica), pressurizados (até 6 MPa; 59,2 atm);
- Natureza da Biomassa: resíduos agrícolas, resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos (lixo), biomassa em natura, biomassa peletizada, biomassa pulverizada.

Quanto à classificação dos gaseificadores, respectivamente às características de movimento relativo das massas e pressão de trabalho, destacam-se as seguintes configurações:

1. O gaseificador de fluxo contracorrente é um equipamento no qual a biomassa e o ar entram em sentidos opostos, saindo o gás pela parte superior. Em contato com os gases ascendentes, a biomassa sofre uma secagem inicial e, em seguida, é pirolisada. Os alcatrões produzidos durante esta etapa são arrastados pelos gases que deixam o gaseificador. Ao término da pirólise, a biomassa se gaseifica na zona de redução utilizando a energia gerada nas reações químicas que ocorrem na zona de combustão, logo abaixo.
2. O gaseificador de fluxo co-corrente, também chamado de fluxo descendente, caracteriza-se por apresentar a alimentação de biomassa e ar para combustão pela extremidade superior e produzir um gás praticamente isento de alcatrões pois os produtos de pirólise são forçados através da zona de combustão, onde a biomassa se encontra incandescente, destruindo termicamente os alcatrões formados e resultando em um gás limpo porém, de menor poder calorífico que o produzido em equipamentos de contracorrente. Também se verifica um consumo de ar de gaseificação um pouco maior que no anterior.
3. O gaseificador de leito fluidizado caracteriza-se pela formação de um leito de biomassa em suspensão produzido por efeito do fluxo de ar forçado através de um grelha distribuidora. As partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas inertes (areia, cinzas, alumina), fluidizadas pelo fluxo de ar. A biomassa é alimentada em dimensões reduzidas para permitir a fluidização. Duas fases podem ser identificadas numa seção transversal do leito: a emulsão e as bolhas. A emulsão contém as partículas sólidas e o gás que percola (processo de filtragem do gás) através delas. O fluxo de gás na emulsão é limitado pela velocidade mínima de fluidização. Qualquer quantidade maior de gás passa pelo leito na forma de bolhas. As bolhas são praticamente isentas de partículas sólidas mas, em sua passagem pelo leito, algumas partículas são arrastadas por elas.

Figura 8 - Gaseificador de leito fluidizado atmosférico recirculante
Potência elétrica 35 MW



Fonte: KURKELA, 2002.

A decisão por gaseificação pressurizada ou atmosférica envolve a aplicação. Recorre-se a gaseificação pressurizada principalmente, para a geração de potência em ciclos termelétricos. A vantagem na diminuição das dimensões do reator só aparece acima de 150 MW, enquanto que na faixa dos 20 MW praticamente não há redução significativa. Os sistemas pressurizados apresentam problemas quanto a alimentação de combustível, a redução do teor de alcatrão do gás, os óxidos de nitrogênio produzidos e a filtragem do gás quente.

4. Tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa

Embora a biomassa tenha sido o primeiro vetor energético empregado pela humanidade e ainda seja uma fonte energética de importância, a produção de eletricidade a partir da biomassa é bastante restrita (WALTER e NOGUEIRA, 1997). Atualmente, verifica-se um maior interesse pelas alternativas tecnológicas capazes de produzir energia elétrica a partir da biomassa devido à elevação das quantidades de resíduos resultantes das culturas agrícolas e a necessidade de seu descarte adequado, preferencialmente com aproveitamento econômico, e às pressões sociais por alternativas de geração de energia elétrica que provoquem menores impactos ambientais, em particular no que concerne à emissão de gases de efeito estufa.

Várias são as vias tecnológicas para a geração de energia elétrica a partir da biomassa e, como pode ser visto na Figura 5, em todas elas há um processo de conversão da biomassa em um produto intermediário que será então utilizado em uma máquina motriz onde será produzida a energia mecânica que acionará o gerador de energia elétrica. Neste trabalho, analisamos tecnologias de combustão direta e gaseificação na etapa de conversão da biomassa, com a produção, respectivamente, de vapor e gás combustível como produtos inter-

mediários e utilizados em turbinas a vapor e turbina a gás como máquinas motrizes. Estas tecnologias apresentam diferenças significativas tanto em termos de geração de energia elétrica, que em ciclos com gaseificação pode ser expressivamente superior aos ciclos tradicionais com combustão direta, quanto em termos de custos de investimento e operacionais, sofisticação e domínio tecnológico, e disponibilidade comercial.

Sumariamos neste item as principais características das tecnologias empregadas até o momento e daquelas que fazem parte da esfera de inovações tecnológicas propostas para viabilizar a melhora do aproveitamento dos recursos energéticos da biomassa. As alternativas tecnológicas consideradas para geração de energia elétrica a partir da biomassa são:

- a) Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão, empregado de forma integrada a processos produtivos através da co-geração;
- b) Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração, que podem operar de forma integrada a processos produtivos através da co-geração ou isoladamente;
- c) Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa.

Relacionamos os parâmetros necessários para modelar os resultados econômicos e de geração de energia elétrica de cada alternativa tecnológica, descrevendo os aspectos técnico-econômicos dos sistemas em questão. Para cada tecnologia de geração de energia elétrica a partir da biomassa são apresentados o balanço de energia, os custos de instalação, os custos operacionais, a eficiência global em condição de co-geração e de geração de energia elétrica pura, as vantagens e desvantagens técnicas e operacionais. Com a definição dos aspectos técnico-econômicos dos sistemas, as demandas de processo e a disponibilidade de biomassa já definidos, realizaremos a modelação de análise econômica.

■ 4.1. Os princípios da integração de sistemas de co-geração ao processo produtivo

Dominar completamente as necessidades energéticas de um processo produtivo, incluindo os aspectos qualitativos tanto quanto os quantitativos, é fundamental para se obter a adequada integração entre os sistemas consumidores de energia e uma planta de co-geração. Há uma interação entre o processo consumidor de energia e a instalação de co-geração adotada. As quantidades de trabalho mecânico, energia elétrica, calor ou frio requeridos pelo processo produtivo são o ponto de partida para o dimensionamento dos equipamentos da instalação de co-geração.

A qualidade da energia requerida é fundamental para a determinação da configuração adequada ao processo. Para o trabalho mecânico, os aspectos qualitativos principais são a faixa de rotação e as variações de carga, enquanto a potência requerida é o principal aspecto quantitativo. Este último, dependendo da ordem de grandeza, determina o tipo de acionador a ser utilizado. Quando o processo permite, pode-se optar por utilizar turbinas a gás, turbinas a vapor ou motores a combustão em lugar de grandes motores elétricos, reduzindo o requerimento elétrico e aumentando a disponibilidade de calor.

Para o calor, devemos considerar a temperatura requerida, a condição de vapor ou líquido quando utilizando a água como fluido térmico, se vapor, as pressões requeridas, bem como as quantidades e a proporção Trabalho (W) / Calor (Q). A relação W / Q , característica do processo produtivo, é fundamental para que se possa garantir o completo aproveitamento do calor rejeitado pelos ciclos de potência, e conseqüentemente, a maximização da eficiência global do sistema.

A matriz de uso final da energia, seja iluminação, trabalho mecânico, calor ou frio, é decisiva para a via-

bilidade técnica e econômica da co-geração. É importante observar que as características aqui chamadas de qualidades da energia, bem como a relação W/Q do processo, variam de acordo com os modos de operação e com o fator de carga dos equipamentos, portanto torna-se indispensável conhecer as variações e sua relação com o fator de carga.

Assim, verificamos que a utilização da tecnologia de co-geração requer um grau elevado de conciliação entre os processos consumidores de energia e o sistema gerador, sob pena de não se alcançar eficiência satisfatória caso esta integração não se realize com o devido rigor. Embora contenha em seu princípio a racionalidade energética, a tecnologia de co-geração não é uma garantia de eficiência, como verificado nos atuais sistemas de co-geração topping a vapor em contrapressão das usinas sucroalcooleiras. Para se auferir o sucesso de uma instalação dessa natureza se faz necessário, não só escolher a melhor combinação de equipamentos para a unidade co-geradora, mas também elevar os padrões de eficiência e racionalidade energética do processo consumidor de energia.

■ 4.2. Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão

A geração termelétrica e o atendimento energético em processos produtivos que dispõem de biomassa combustível são tradicionalmente realizados por sistemas com ciclos de co-geração topping a vapor em contrapressão, cujos usos finais da energia são mecânico e térmico. Nestes sistemas, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras, por isso chamadas caldeiras de queima direta, e a energia térmica resultante é utilizada na produção do vapor. Este vapor pode acionar turbinas de trabalho mecânico do processo e turbinas para geração de energia elétrica e, ao sair das turbinas, após a realização do trabalho, será encaminhado para atender as necessidades térmicas do processo produtivo.

Para alcançar os melhores desempenhos energéticos, estes ciclos a vapor devem contar com caldeiras geradoras de vapor de alta pressão, em torno de 6,0 a 8,0 MPa, constituídas por superaquecedores de vapor, desaeradores e economizadores para recuperação da energia contida nos gases de exaustão e elevação da temperatura da água de alimentação da caldeira, preaquecedores de ar e secadores de biomassa para recuperação da energia contida nos gases de exaustão, elevando da temperatura do ar de combustão ou reduzindo a umidade do combustível.

No que tange às máquinas térmicas, a melhor opção a empregar são turbinas de contrapressão e extração de múltiplos estágios, que operam em elevadas pressão, temperatura e vazão de vapor. A elevação da pressão e da temperatura do vapor que passa pelo turbogerador proporciona maior eficiência e mais energia gerada, consequências naturais em um ciclo a vapor. Por outro lado, obtém-se também uma maior potência do gerador e, conseqüentemente, mais energia gerada em função de maior vazão de vapor que passa pela turbina. Esta elevação da vazão se deve à manutenção das condições de entrada do vapor no processo produtivo, fazendo com que o vapor gerado na caldeira em condições de pressão e temperatura superiores seja expandindo até a pressão de extração, na qual são alcançadas as condições de alimentação do processo, esta expansão é realizada na turbina de acionamento do gerador com aproveitamento da energia liberada.

Tabela 2 - Características técnicas dos ciclos a vapor com turbinas de contrapressão para geração de energia elétrica

Parâmetro	Valores
Temperatura de operação (°C)	480
Pressão de operação (MPa)	6,0
Produção de vapor (kgVapor/ton.Biomassa)	1.607
Eficiência das caldeiras - Base PCSu (%)	67%
Extração de vapor em co-geração (kgVapor/ton.Biomassa)	1.600
Geração de energia elétrica	
Co-geração (kWh/ton.Biomassa)	215
Geração pura (kWh/ton.Biomassa)	-
Eficiência das turbinas (%)	60,0
Eficiência da geração termelétrica	
Co-geração (%)	7,0
Escala até (MW)	50

Fonte: CAMARGO et al. (1990), LEITE et al. (2005)

Ressalta-se que geração de energia elétrica nestes ciclos tem como restrição fundamental o consumo de energia térmica do processo de produção ao qual está integrado, em outras palavras, o consumo de vapor de escape demandado. Como estes ciclos não possuem condensadores, é no processo produtivo que o vapor de escape retorna à sua condição de líquido condensado e pode então ser bombeado para retornar à caldeira para completar o ciclo. Assim, a quantidade de vapor gerado na caldeira fica limitada pela demanda térmica do processo produtivo e a geração de energia elétrica fora da co-geração fica impossibilitada.

Em seu trabalho, CAMARGO et al. (1990) estudaram diversos aspectos da efficientização dos ciclos a vapor das usinas sucroalcooleiras, considerando os objetivos de maximização de excedentes de bagaço, auto-suficiência maximização da geração de energia elétrica.

Diversos outros estudos foram consultados para identificação dos parâmetros econômicos desta tecnologia e as estimativas de investimentos e os custos fixos e variáveis estão apresentadas na Tabela 3. Vale ressaltar que os valores usados como bases do estudo foram alcançados com a colaboração de representantes do setor e com informações de alguns casos reais de investimentos já realizados.

Tabela 3 - Parâmetros econômicos dos ciclos a vapor com turbinas de contrapressão para geração de energia elétrica

Parâmetro	Valores adotados
Custo da instalação ⁽¹⁾ (US\$/kW)	830
Custo fixo anual O&M ⁽²⁾ (US\$/kW)	20
Custo variável ⁽²⁾ (10 ⁻³ US\$/kWh)	1,5

Fonte: (1) GOLDEMBERG et al., (2001), AZOLA, et al. (1999)

(2) MAZZONE e HAYASHI (1997) e Office of Energy Efficiency and Renewable Energy - USDOE (REVIEW, 1999)

Por fim, é importante ressaltar que a tecnologia é dominada e seu estágio comercial totalmente maduro havendo diversos fabricantes nacionais capazes de entregar a maior parte dos equipamentos necessários.

■ 4.3. Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração

A alternativa tecnológica para geração termelétrica a partir da biomassa empregando ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração é aquela em que o vapor ao final da realização do trabalho na turbina é, total ou parcialmente, condensado e a parcela de vapor necessária ao atendimento dos requisitos mecânicos e térmicos do processo produtivo, quando integrado em co-geração, é fornecida por extração de vapor em um ponto intermediário da expansão na turbina. Por estas características operacionais, estes ciclos são chamados de condensação e extração.

As diferenças fundamentais deste ciclo para o ciclo a vapor com turbinas de contrapressão é a existência de um condensador na exaustão da turbina e de alguns níveis de aquecimento da água de alimentação da caldeira, realizado com vapor extraído em vários estágios da turbina. A primeira alteração proporciona uma maior flexibilidade da geração termelétrica que deixa de ser condicionada ao consumo de vapor de processo, permitindo inclusive a operação em geração elétrica pura, e a segunda, proporciona uma elevação da eficiência global da geração porém, ambas elevam significativamente os investimentos.

Os ciclos a vapor de condensação têm por princípio o ciclo Rankine, ciclo padrão vapor, no qual o combustível é queimado externamente (em uma caldeira) à máquina motriz (turbina a vapor), para produzir vapor que ao se expandir na máquina térmica produz trabalho mecânico e após a expansão o vapor é condensado e retorna para ser bombeado novamente para a caldeira. O grau de sofisticação destes sistemas varia bastante e diversas são as alternativas tecnológicas que complementam os ciclos a vapor tornando-os mais eficientes e elevando a potência gerada, entre elas, complexos sistemas de geração de vapor que incluem caldeiras com câmaras de combustão de leito fluidizado, diversos trocadores de calor como os preaquecedores de ar, os economizadores, os superaquecedores, os reaquecedores, os condensadores e os aquecedores intermediários, entre eles os desaeradores. Desta forma, os custos de investimento e os custos operacionais de um ciclo a vapor de condensação e extração podem variar significativamente, assim como os resultados de geração.

Figura 9 - Turbina a vapor de múltiplos estágios



É importante destacar que, a existência de condensador no ciclo elimina o vínculo de produção entre o sistema de geração de energia elétrica e uma demanda térmica do processo produtivo, permitindo que a instalação opere integrada em co-geração ou em geração elétrica pura, como uma termelétrica tradicional, sendo a disponibilidade de biomassa o fator determinante desta condição.

Além disso, com a disponibilidade do condensador, a maximização da geração de energia elétrica ocorre

levando a maior quantidade possível de vapor gerado a expandir até as mínimas pressões obtidas nos condensadores, em outras palavras, quando a menor quantidade de vapor é utilizada no processo produtivo, seja para acionamento mecânico ou para atendimento das demandas térmicas. Nestes casos então, devem ser implementadas todas as medidas de efficientização do processo produtivo e reduzidos ao mínimo, o consumo de vapor para acionamento mecânico e fins térmicos.

Há que se ressaltar que os ciclos analisados deverão, obrigatoriamente, manter o atendimento às necessidades energéticas quando integrado em co-geração, resultando em diferenças na geração de energia elétrica, menores quando em co-geração devido à extração de vapor antes da expansão total até o condensador. A eficiência termelétrica é, portanto, menor no ciclo a vapor de condensação e extração em co-geração que no ciclo a vapor de condensação.

Para alcançar os melhores desempenhos energéticos, estes ciclos a vapor devem contar com elevação da eficiência e da potência gerada através da elevação da pressão e temperatura do vapor gerado, maiores eficiências das turbinas e das caldeiras, estas do tipo com câmaras de combustão de biomassa em suspensão, diversos trocadores de calor como os preaquecedores de ar, os economizadores, os superaquecedores, os reaquecedores, os condensadores e os aquecedores intermediários de água de alimentação das caldeiras, entre eles os desaeradores.

Tabela 4 - Características técnicas dos ciclos a vapor com turbinas de condensação e extração para geração de energia elétrica

Parâmetro	Valores
Temperatura de operação (°C)	530
Pressão de operação (MPa)	8,5
Produção de vapor (kgVapor/ton.Biomassa)	3.000
Eficiência das caldeiras - Base PCSu (%)	85
Extração de vapor em co-geração (kgVapor/ton.Biomassa)	1.150
Geração de energia elétrica	
Co-geração (kWh/ton.Biomassa)	340
Geração pura (kWh/ton.Biomassa)	530
Eficiência das turbinas (%)	75,0
Eficiência da geração termelétrica	
Co-geração (%)	12,7
Geração pura (%)	20,0
Escala até (MW)	100

Fonte: BAIN, et al. (1997); LEITE et al. (2005)

No trabalho de BAIN et al. (1997), o ciclo de condensação e extração com pressão de geração de vapor de 8,72 MPa a 510 °C indica uma eficiência de geração termelétrica de até 23%, com eficiência da caldeira de 84,5 % em relação ao PCSu e com eficiência da turbina de condensação de 75%. Os parâmetros, semelhantes aos indicados no trabalho de OGDEN et al. (1990), estão listados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 5 - Parâmetros econômicos dos ciclos de condensação e extração de alta tecnologia

Parâmetro	Valores Adotados
Custo da instalação ⁽¹⁾ (US\$/kW)	1.100
Custo fixo anual O&M ⁽²⁾ (US\$/kW)	20
Custo variável ⁽²⁾ (10 ⁻³ US\$/kWh)	2,0

Fonte: (1) GOLDEMBERG et al.;

(2) BAIN, et al. (1997); OGDEN et al. (1990)

■ 4.4. Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa

Como foi visto no item 3.2.4 Gaseificação de combustíveis sólidos, a tecnologia de gaseificação é a conversão de qualquer combustível líquido ou sólido, como a biomassa, em um gás energético através da oxidação parcial a temperatura elevada. Esta conversão realizada em vários tipos de reatores, os gaseificadores, produz um gás combustível que pode ser utilizado em turbinas a gás. Assim, a tecnologia de gaseificação em maior escala habilita a biomassa como uma importante fonte primária em centrais de geração termelétrica de elevada potência em que as máquinas térmicas são as turbinas a gás. O desenvolvimento dos ciclos combinados, que integram a respiradores de calor e turbinas a vapor consolidam este potencial.

A tecnologia de gaseificação de combustíveis é conhecida desde o século XIX, mas ficou praticamente estagnada desde a década de 30, quando o petróleo começou a ser oferecido em larga escala e a baixos preços no mercado mundial. A gaseificação de combustíveis sólidos como a biomassa, o carvão mineral ou carvão vegetal não é uma tecnologia nova, tendo sido utilizada, principalmente, nos períodos das guerras mundiais, quando o acesso aos combustíveis tradicionais foi dificultado.

Ao final da década de 70, com a intensificação da crise energética mundial a partir dos choques do petróleo, verificou-se o despertar do interesse na gaseificação, em especial de carvão, madeira e o carvão vegetal e, no início da década de 90, biomassa energética, resíduos agrícolas e o bagaço de cana-de-açúcar. Mais recentemente, as pressões ambientais sob as termelétricas a carvão, associadas à necessidade de atender as demandas por energia elétrica nos países em desenvolvimento, tem produzido um esforço mundial significativo para o desenvolvimento comercial da tecnologia da gaseificação aplicada a geração de energia elétrica em centrais de elevada potência, ao mesmo tempo que as turbinas a gás experimentaram um significativo avanço tecnológico.

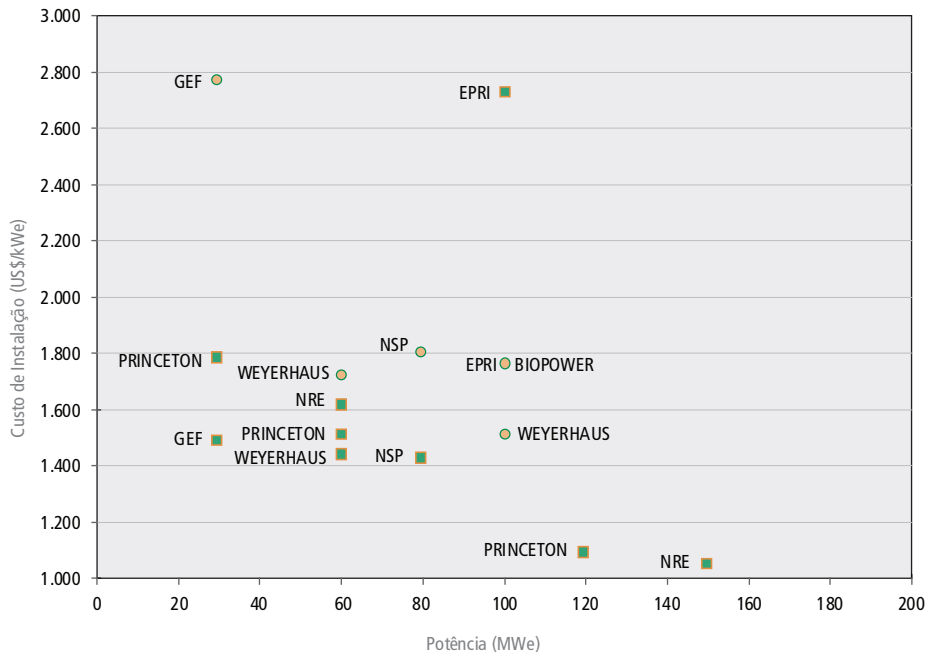
Uma verdadeira revolução se processou na década de 90 na tecnologia de geração termelétrica no mundo e seu principal agente foi a aplicação das novas e eficientes plantas baseadas em turbinas a gás (MACCHI, 1991). Os principais agentes desta transformação das turbinas a gás são o desenvolvimento dos sistemas eletrônicos de controle, da fluido dinâmica, da metalurgia e de novos materiais. Os ciclos de geração termelétrica baseados em turbinas a gás encontram-se em estágio maduro de confiabilidade e eficiência apresentando ainda expressiva vantagem com redução do impacto ambiental e um enorme potencial de desenvolvimento técnico com conseqüente elevação da eficiência global.

As turbinas a gás em ciclo aberto, também chamadas de turbinas de combustão, são máquinas motrizes de combustão interna, pois a energia liberada pelo combustível é diretamente transferida ao fluido de trabalho, composto pelo ar comprimido misturado aos gases de combustão, sem a necessidade de trocadores de calor para transferir energia entre a fonte de calor e o fluido de trabalho ou entre o fluido e o meio ambiente, uma vez que os gases de exaustão são descarregados diretamente na atmosfera.

Não só a tecnologia das turbinas a gás apresentou um desenvolvimento significativo. Igualmente significativo foi o desenvolvimento das técnicas para emprego dos ciclos simples a gás como elementos de esquemas termodinâmicos mais complexos, com a adição de diversos equipamentos e modificações termodinâmicas que proporcionaram a elevação da eficiência e da potência total das turbinas a gás em aplicação estacionária. A principal característica destas modificações que melhoram o desempenho das turbinas a gás é a sua baixa sofisticação tecnológica e o amplo domínio de seus aspectos técnicos, tais como o resfriamento intermediário no compressor, o reaquecimento, a regeneração, a injeção de água ou vapor. Entre estas mo-

dificações está o ciclo combinado, que aproveita a energia térmica dos gases de exaustão da turbina a gás para gerar vapor a média/alta pressão e utilizá-lo em uma turbina a vapor, elevando a potência e a eficiência global do ciclo.

Figura 10 - Investimento estimado em diversos estudos para sistemas em ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa



Fonte: TURNURE et al. (1995)

Embora tenha recebido impulso recente e já tenha se tornado viável e prática, a tecnologia de gaseificação de biomassa, em princípio extremamente versátil, ainda necessita superar significativos obstáculos antes de se transformar em uma tecnologia competitiva comercialmente. As dificuldades residem, não no processo básico de gaseificação, mas sim no projeto de um equipamento que deve produzir um gás de qualidade, com confiabilidade e segurança, adaptado as condições particulares do combustível e da operação, tão específicos que alguns elementos do sistema de produção do gás combustível podem ser de extrema necessidade, dependendo da aplicação do gás combustível ou, se tornar completamente dispensáveis.

Na prática, os requisitos de limpeza e alta qualidade do gás a partir de vários tipos de combustíveis, eficiência sem atenção constante, rapidez na alteração de carga, baixo custo e elevada durabilidade são conflitantes, havendo sempre perda de desempenho de um para aumento em outro.

Apesar destas dificuldades, a tecnologia de integração de turbinas a gás com gaseificação de biomassa apresenta um futuro promissor. A tecnologia de gaseificação da biomassa em escalas compatíveis está em fase de aprimoramento e apresenta excelentes perspectivas de viabilidade comercial para os próximos anos, como apresentado no painel do programa norte americano de desenvolvimento de energia a partir da biomassa do Departamento de Energia dos EUA (US DOE Biomass Power Program), em cooperação com o Instituto de Pesquisa de Energia Elétrica (EPRI), o Laboratório Nacional Oak Ridge (ORNL) e agências estaduais de energia que financiaram estudos de caso (CRAIG et al., 1995), cujos resultados foram apresentados em TURNURE et

al. (1995) e , que se vê na Figura 10, e por diversos estudos mais recentes, como GROSS, et al. (2003), KURKE-LA (2002) e BABU (2006), entre outros.

A maior atratividade dos ciclos integrados de turbinas a gás com gaseificação de biomassa está relacionada a mercados específicos, ou nichos de mercado, tais como projetos com subprodutos economicamente atrativos, áreas com restrições a combustíveis fósseis ou com custos elevados, áreas com prioridade de desenvolvimento rural, áreas com disponibilidade de rejeitos ou resíduos diversos e áreas onde os custos da biomassa são significativamente baixos.

Tabela 6 - Características técnicas do ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa para geração de energia elétrica

Parâmetro	Valores
Temperatura de operação do gaseificador(°C)	850 - 950
Pressão do vapor gerado (MPa)	6
Temperatura do vapor gerado (°C)	470
Produção de vapor (kgVapor/ton.Biomassa)	5.000
Extração de vapor em co-geração (kgVapor/ton.Biomassa)	1.050
Potencia do ciclo a vapor (%)	35
Potencia do ciclo a gás (%)	65
Geração de energia elétrica	
Co-geração (kWh/ton.Biomassa)	1.050
Geração pura (kWh/ton.Biomassa)	1.150
Eficiência da geração termelétrica	
Co-geração (%)	38,0
Geração pura (%)	42,0
Escala até (MW)	150
Fonte: BAIN et al. (2003)	

Neste relatório, apresentaremos o sistema que integra a gaseificação de biomassa à turbina a gás, recuperadores de calor e turbinas a vapor em um ciclo combinado. Como para os ciclos anteriormente analisados, quando integrados em co-geração a processos produtivos, estes deverão manter o atendimento às necessidades energéticas do processos. Nos ciclos combinados, o vapor fornecido ao processo é oriundo de estágios de extração da turbina a vapor e, eventualmente, diretamente da caldeira de recuperação.

No ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa, a energia térmica contida nos gases quentes exaustos pela turbina a gás é utilizada em uma caldeira de recuperação para produzir vapor que é então utilizado como fluido de acionamento em uma turbina a vapor de condensação para gerar trabalho adicional. O acréscimo de potência alcançado em um ciclo combinado é, em geral, da ordem de 50 % da potência da turbina a gás e a eficiência global passa da média de 30 % do ciclo simples e atinge valores em torno dos 55 a 60 % em ciclos combinados comerciais.

Os gases de exaustão das turbinas a gás são ricos em oxigênio devido à necessidade de ar para refrigeração, fazendo com que a quantidade ar admitida atinja valores da ordem de 300% do excesso de ar de combustão, carregando consigo o calor rejeitado. Por esse motivo, pode ser utilizado como comburente em uma caldeira de recuperação para efetuar uma queima suplementar, gerando quantidade de vapor até 2,5 vezes maior que a gerada em uma caldeira puramente de recuperação de calor dos gases.

Ao longo dos últimos anos, um grande número de organizações avaliou o desempenho técnico e econômico da tecnologia de sistemas de energia elétrica baseados na gaseificação de biomassa e ciclo combinado.

Um estudo foi realizado para a Agência de Proteção Ambiental - EPA (TURNURE et al., 1995) para avaliar o impacto da penetração de diversas tecnologias de geração de energia elétrica no mercado nos próximos anos e o seu efeito nas emissões de carbono na atmosfera. Para equacionar as diferenças entre as projeções de investimento inicial e eficiência de diversos ciclos termelétricos publicadas na literatura foi realizado um painel constituído por representantes do National Renewable Energy Laboratory (NREL), Electric Power Research Institute (EPRI), Princeton. Center for Energy and environmental Studies, Environmental Protection Agency (EPA), USDA e Colorado School of Mines e um consenso foi estabelecido.

Tabela 7 - Parâmetros econômicos do ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa para geração de energia elétrica

Parâmetro	Valores adotados
Custo da instalação (US\$/kW)	1.500
Custo fixo anual O&M (US\$/kW)	55
Custo variável (10^{-3} US\$/kWh)	6,0

Fonte: BAIN et al. (2003)

Os resultados foram compilados em TURNURE et al. (1995) e indicam que a tecnologia que integra um sistema de gaseificação de biomassa a um ciclo combinado de geração termelétrica apresenta eficiência de geração termelétrica entre 36 % e 45 % e custos de investimento entre 1.200 US\$/kW e 1.500 US\$/kW e confirmados por BAIN et al. (2003).

5. Custos

■ 5.1. Custos de investimento

O custo de investimento de um projeto de geração de energia elétrica pode ser decomposto em custo direto (basicamente, terreno, obras civis, equipamentos, montagem e subestação) e custo indireto (canteiro, acampamento e administração). De acordo com Lora (2004), aproximadamente 70% do custo de investimento em plantas convencionais a vapor são custos diretos, que apresentam a composição apresentada na Tabela 8.

Tabela 8 - Composição típica dos custos diretos de investimento de uma central termelétrica a vapor

Item de custo	Participação
Equipamentos eletromecânicos	60%
Planta da caldeira	27%
Planta da turbina	21%
Tubulação e acessórios	6%
Subestação	3%
Outros equipamentos	3%
Montagem dos equipamentos	12%
Construção	21%
Obras civis	15%
Circuito de água	6%
Outros custos	7%
Terreno, benfeitorias	3%
Projeto, organização	4%

Fonte: LORA, 2004.

A Tabela 9 resume os custos de investimento das tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa, considerando as diferentes tecnologias com ciclos a vapor e com gaseificação de biomassa em ciclo combinado.

Tabela 9 - Referências para o custo de investimento em ciclos de geração termelétrica a partir da biomassa – US\$/kW

Tecnologia	CENBIO ⁽¹⁾	NREL ⁽²⁾	LARSON (2001) ⁽³⁾
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	830	-	-
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	1.100	1.750	1.495
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	-	1.470	1.480

Fonte: (1) GOLDEMBERG et al. (2001); (2) BAIN et al. (2003); (3) LARSON et al. (2001)

Cabe ressaltar que as duas primeiras tecnologias, os ciclos a vapor com turbinas de contrapressão e os ciclos a vapor com turbinas de condensação e extração, têm seu processo de fabricação totalmente dominado pela indústria nacional, sendo a referência principal a de instalações de geração a vapor para o setor sucroalcooleiro.

O despertar deste setor em especial para o melhor aproveitamento do potencial energético da biomassa residual de sua produção, principalmente para geração de energia elétrica, serviu de impulso para a indústria nacional que já conta com tecnologia e capacidade de produzir e instalar caldeiras de vapor de elevadas pressão e temperatura, nas faixas de 100 kgf/cm² e 500 °C, utilizando a biomassa como combustível, com eficiências teóricas com base no poder calorífico inferior do combustível de 87%, e sistemas de turbogeração a vapor com potências de até 100 MW.

Importa observar que os investimentos por unidade de capacidade (MW) tendem a diminuir na medida em que o tamanho das plantas aumenta, devido aos ganhos de escala, bem como devido ao fortalecimento da demanda interna por estes sistemas e a consolidação da indústria nacional neste patamar de tecnologia.

Um fator que pode afetar as estimativas do investimento em ciclos termelétricos a vapor são preço do aço e da demanda de usinas, que variam bastante em função das datas em que são estimados. Pode-se esperar um nivelamento dos custos de investimento por cima, neste momento em que há uma forte demanda interna e externa por usinas desse tipo.

Tratando-se de biomassa como combustível, há que se considerar ainda que investimentos de magnitudes diferenciadas se fazem necessários no preparo da biomassa para seu uso combustível, tais como secagem e adequação granulométrica. Estes investimentos variam significativamente em função da biomassa e sua origem, como por exemplo o bagaço de cana, que está pronto para ser consumido, e a biomassa florestal, que precisará ser picada e seca antes de ser empregada como combustível.

Com relação aos investimentos nos ciclos combinados integrados a gaseificação da biomassa, destaca-se seu estágio de desenvolvimento, com variadas frentes de pesquisa em todo o mundo. No que tange às máquinas térmicas do ciclo combinado, a única distinção a ser feita se refere ao baixo poder calorífico dos gases combustíveis resultantes de gaseificação, que por isso exigem algumas características especiais das turbinas a gás empregadas e seus respectivos combustores, mas que já são tecnologicamente dominadas e acarretam mais perda de eficiência que elevação de custos.

A grande variável desta tecnologia é o desenvolvimento em escala comercial dos gaseificadores de biomassa, a consolidação de uma entre as diferentes opções construtivas, e sua escala capaz de chegar a uma centena de MW. Ainda que os custos de instalação de uma primeira planta possam chegar aos US\$ 2.000,00 /kW, há no mundo um movimento consistente para o desenvolvimento da tecnologia de gaseificação da biomassa, não tanto visando a geração de energia elétrica, mas focado na conversão do gás de síntese em hidrocarbonetos

combustíveis, como gasolina e óleo diesel, através do processo Fischer-Tropsch. Desta forma, as perspectivas de consolidação desta tecnologia, bem como de sua viabilização comercial a custos competitivos é bastante promissora, e para o caso da geração de energia elétrica, há que se destacar sua elevada capacidade de conversão do potencial energético da biomassa em energia elétrica, podendo chegar a ser duas vezes maior que os mais eficientes ciclos a vapor.

■ 5.2. Custos de operação e manutenção

Os custos de operação e manutenção das usinas termelétricas devem ser classificados em fixos e variáveis. Em adição ao custo do combustível, as parcelas variáveis, dependentes do despacho da usina, são determinantes no cálculo dos fatores de capacidade.

No entanto, a diversidade de tecnologias associadas à geração termelétrica a partir da biomassa e, principalmente, a heterogeneidade do próprio combustível, acabam por particularizar esses custos, tanto os fixos quanto os variáveis, dificultando a escolha de valores de referência. As Tabelas 10 e 11 apresentam algumas referências bibliográficas de tais custos.

Tabela 10- Custos fixos de O&M em ciclos de geração termelétrica a partir da biomassa – US\$/kW.ano

Tecnologia	AZOLA, et al. (1999) ⁽¹⁾	NREL ⁽²⁾	LARSON (2001) ⁽³⁾
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	10	-	-
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	20	70,00	30,00
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	-	45,00	30,00

Fonte: (1) AZOLA, et al. (1999) e MAZZONE e HAYASHI (1997); (2) BAIN et al. (2003); (3) LARSON et al. (2001).

Como se verifica nas tabelas, tanto os custos fixos como variáveis diferem bastante entre as tecnologias, senda que não se encontra com facilidade referências internacionais para os ciclos a vapor em contrapressão, muito provavelmente devido à sua maturidade tecnológica, à baixa escala das potências empregadas, a diversidade de arranjos adequados à pluralidade de processos produtivos aos quais esta tecnologia se integra.

Tabela 11 - Custos variáveis de O&M em ciclos de geração termelétrica a partir da biomassa – US\$/MWh

Tecnologia	AZOLA, et al. (1999) ⁽¹⁾	NREL ⁽²⁾	LARSON (2001) ⁽³⁾
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	0,5	-	-
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	3,0	8,30	1,56
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	-	5,5	1,75

Fonte: (1) AZOLA, et al. (1999) e MAZZONE e HAYASHI (1997); (2) BAIN et al. (2003); (3) LARSON et al. (2001).

■ 5.3. Custos da biomassa combustível

Como descrito anteriormente, no item 3 desta nota técnica, classificamos a biomassa como recurso energético nas categorias de biomassa energética florestal, seu produtos e subprodutos ou resíduos; biomassa energética agrícola, as culturas agroenergéticas e os resíduos e subprodutos das atividades agrícolas, agroindustriais e da produção animal; e rejeitos urbanos.

A disponibilidade, as características, e os custos de produção e acesso de cada um destes recursos são muito diferentes. As estimativas da disponibilidade e do preço para resíduos de madeira e resíduos florestais são altamente incertas e dependem das circunstâncias locais. A disponibilidade de resíduos em unidades agroindustriais de moagem e de resíduos agrícolas pode ser estimada mais precisamente, entretanto, os pre-

ços dependem das condições de mercado locais e, no caso dos resíduos agrícolas, dos padrões de colheita e de limitações ambientais. Os custos da biomassa energética são muito dependentes dos aspectos locais, bem como da relação comercial estabelecida entre usuários e produtores, que muitas vezes não percebem o mesmo custo de oportunidade.

Neste item, apresentaremos de forma sumarizada algumas referências nacionais e internacionais de disponibilização de biomassa energética, particularmente aplicáveis como combustíveis para a geração termelétrica. A avaliação mais detalhada da disponibilidade e do custo de variadas fontes de biomassa para fins energéticos como combustível foi realizada na nota técnica de potencial da biomassa como recurso energético.

Este custo inclui todo o processo de colheita ou recuperação e acondicionamento, quando se trata de resíduo de colheita, o transporte ao ponto de utilização, onde as distâncias envolvidas são determinantes, bem como a manipulação e o pré-tratamento que na maioria das vezes se fazem necessários, como secagem e adequação de tamanho.

As estimativas exatas são muito difíceis de fazer, porque não existem mercados maduros para toda a biomassa; quando existem são fortemente determinados pelas condições regionais, e as mudanças ocorrem rapidamente. No limite, algumas fontes de biomassa como resíduos industriais e urbanos, por exemplo, podem apresentar custos negativos, pois o produtor incorre em custos obrigatórios para descartar tais resíduos. Na outra extremidade, encontram-se as plantações de biomassa energética, como a cana-de-açúcar, que embora determinadas pelo mercado regional, já começam a apresentar reflexos da expansão em escala mundial da demanda por etanol. No meio termo, os resíduos florestais e agrícolas exigem operações custosas de colheita e manuseio.

Apresentaremos a seguir, algumas referências de custo de disponibilização da biomassa para fins energéticos, que posteriormente serão aprofundados em nota técnica pertinente. As referências mais satisfatórias nas condições nacionais são aquelas relacionadas à produção de cana-de-açúcar e de florestas para o setor de papel e celulose. Também já se encontram em grau avançado, os estudos sobre a recuperação dos resíduos agrícolas da cana-de-açúcar. De acordo com alguns estudos, os seguintes resultados são apresentados:

- O sistema agroindustrial da cana-de-açúcar é um dos mais antigos, está ligado eventos históricos, e é de enorme importância ao Brasil, que é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, e isoladamente o maior produtor de açúcar e de álcool e o maior exportador mundial de açúcar. A partir dos anos 70, passou por importante transformação, deixando de ser exclusivamente voltado para o setor de alimentos, para destinar-se ao setor energético, através do Proálcool. Este fomentou o destino da cana para produção de combustível, tendo efeito positivo no aumento da competitividade do sistema com um todo. As escalas de produção e moagem de cana cresceram, assim como ganhos importantes em produtividade foram atingidos. Na produção de cana-de-açúcar, basicamente, dois subsistemas regionais convivem no Brasil, um no Centro/Sul (C/S) e outro no Norte/Nordeste (N/NE), sendo o primeiro mais competitivo e dinâmico que o segundo. Ambos, no entanto, são citados como os dois primeiros em competitividade no mundo. Bons produtores especializados no Brasil chegam a produzir mais de 100 toneladas de cana por hectare, marca que dificilmente é atingida em outros lugares do mundo, com custo total de produção ao redor de R\$ 17/tonelada. O estudo de WAACK et al. (1998) mostra que a média de custo total da produção de cana-de-açúcar na região Centro/Sul é de R\$ 18,76/t, enquanto na região Norte/Nordeste (N/Ne) é de R\$ 28,64/t, sendo a parcela correspondente ao transporte, respectivamente, R\$ 3,88/t e R\$ 3,63/t.

Figura 11 - Pátio de manejo do bagaço de cana em usina do setor sucroalcooleiro



Os dados apresentados pela Associação Profissional da Indústria da Fabricação de Álcool, Açúcar, Similares e Conexos (UDOP, 2006) para valores de cana-de-açúcar praticados na região oeste do estado de São Paulo durante a safra indica a compatibilidade histórica destes números e também o reflexo recente da crescente demanda mundial por açúcar e etanol, como pode ser visto na Tabela 12. Para os preços de julho de 2006, a diferença do preço da cana no campo e o preço da cana na esteira é de R\$ 4,94 / t, que reflete uma elevação do custo do transporte bastante inferior à elevação do preço da cana.

Tabela 12 - Valores de preços médios da cana no campo praticados por safra

Ano safra	Preço da cana-de-açúcar (R\$/ton)
2006/2007	42,0
2005/2006	28,3
2005/2004	24,9
2004/2003	24,1
2003/2002	21,9
2002/2001	21,7
2001/2000	19,1

Fonte: UDOP, 2006.

A FNP Consultoria & Comércio Ltda informava, também para o ano de 2001, preço da tonelada de cana posta na esteira da usina de R\$ 22,98 / ton, considerados custos de produção, não incluindo encargos financeiros sobre o custeio, nem sobre os investimentos. Deste valor, a parcela de transporte correspondia a R\$ 5,73 / t.

- O custo de colheita da cana-de-açúcar sem queimar com recuperação de uma fração significativa da palha, depende de tecnologias para recolhimento ainda em desenvolvimento, e seu uso comercial ainda é incipiente. O Centro de Tecnologia Canavieira CTC, realizou estudo com recursos do Global Environment Facility (GEF), Copersucar, European Commission (EC) e Agência Nacional de Energia da Suécia (STEM), e cobriu todos os aspectos relacionados com o recolhimento da palha, após ou durante a colheita, como os impactos econômicos, devido a variação dos custos das operações agrícolas com e sem palha no chão (preparo do solo, plantio, adubação, herbicidas etc), efeitos da compactação do solo e perda de produtividade, variação nas perdas agrícolas e finalmente os efeitos na indústria devido a variação das impurezas vegetais da cana conforme a rota de recolhimento de palha utilizada. Neste estudo, os valores de disponibilidade da palha nas usinas va-

riaram entre US\$ 13,7/t e US\$ 31,1/t em base seca, chegando a quantidades entre 70 e 95 kg/t_{cana} (em base seca) (LEITE et al., 2005). A rota mais usual de recolhimento é a de enfardamento, cujo custo estimado é da ordem de US\$ 18,5/t, sendo a parcela do custo de transporte estimada em US\$ 1,95/t.

Figura 12 - Colheita mecanizada da cana-de-açúcar



- O eucalipto, introduzido no Brasil em 1904, supre as necessidades de matéria-prima no abastecimento das fábricas de papel e celulose. Apresenta-se como uma espécie vegetal de rápido crescimento e adaptada para as situações edafo-bio climáticas brasileira. O eucalipto teve um crescimento expressivo durante o período dos incentivos fiscais, nas décadas de 60, 70 e perdurou até meados dos anos 80. Esse período foi considerado um marco na silvicultura brasileira dado os efeitos positivos que gerou no setor. A partir do término dos incentivos fiscais, houve um crescimento marginal negativo no plantio de eucaliptos. Exceção disso ocorreu naqueles feitos, independentes dos investimentos, nas indústrias de papel e celulose e de siderúrgicas a carvão vegetal. A produtividade do eucalipto, dado o seu rápido crescimento, pode ser considerada como um dos principais fatores que determinaram sua expansão no mercado de papel e celulose e, também, para serraria. Embora a produtividade média anual, considerada em torno de 35 m³ por hectare, seja relativamente baixa, existem plantios com uso de eucaliptos melhor adaptados, com uso de boa tecnologia que atingem rendimentos próximos a 60 m³/ha ano. DOSSA et al. (2002, 83), apresentam ainda, o preço de venda entre R\$ 18/m³ e R\$ 20/m³.

Figura 13 - Muda e floresta plantada de eucalipto



• Espécies do gênero pinus foram introduzidas no Brasil, no século XIX, pertencem a família das pináceas e possuem, aproximadamente, 90 espécies. Os principais usos da matéria-prima são para processamento mecânico em serrarias, laminados, aglomerados e de celulose de fibra longa. Para atender a demanda, em 1966, em função da pressão do setor urbano para acabar com o corte das árvores nativa e a necessidade do aumento da produção de papel e celulose pelo setor industrial, foi criado o incentivo fiscal para plantio de florestas. Os incentivos perduraram até 1986. O plantio de pinus tem uma relação estreita com os segmentos industriais de processamento mecânico, embora o segmento de celulose e papel seja o principal fornecedor de matéria-prima para os demais segmentos. Da produção de pinus, a maior demanda é da indústria de madeira serrada, vindo a seguir a produção de celulose de fibra longa e compensados. O segmento industrial de papel e celulose passa a utilizar de forma mais intensiva sementes provenientes de cruzamentos controlados, que resultam em ganhos de produtividade, viabilizando a colheita precoce das florestas. O atual nível de produtividade está situado entre 25 m³/ha ano e 35 m³/ha ano, em função do tipo de solo e do manejo florestal utilizado. DOSSA et al. (2002, 82) verificaram variações nos preços do pinus em função do destino de processamento e aproveitamento da matéria-prima, que variam entre R\$ 21,00 e R\$ 50,00 o metro cúbico da madeira. O metro cúbico do pinus para energia e celulose tem um custo de R\$ 5,00/m³, enquanto, para serraria e laminação, esse valor varia de R\$ 30,00/m³ até R\$ 70,00/m³, dependendo da qualidade da tora.

• Por fim, em seu trabalho “Aplicativo com análise de rentabilidade para sistemas de produção de florestas cultivadas e de grãos”, DOSSA et al. (2000) apresentam uma sumarização de referências de preços e produtividade de eucalipto e pinus no Brasil, reproduzidas na Tabela 13.

Tabela 13 - Preços e produtividades das atividades de produção de eucalipto e pinus

Atividade	Preços (R\$)			Produtividade (m ³ /ha ano)		
	Baixa	Média	Alta	Baixa	Média	Alta
Referências						
Eucalipto	6,00	8,00	10,00	26,00	33,00	40,00
Pinus	23,00	30,66	38,33	19,00	24,00	29,00

Fonte: DOSSA et al. (2000)

■ 5.3.1. Consolidação das estimativas de custo da biomassa no Brasil

Com base nos parâmetros descritos no item 5.3 Custos da biomassa combustível, apresentamos a seguir, uma consolidação que servirá de referência para a avaliação da sensibilidade dos custos de geração termelétrica a partir de diferentes fontes de biomassa.

Tabela 14 - Caracterização física de algumas fontes de biomassa para geração termelétrica no Brasil

Biomassa	Densidade	Poder calorífico inferior ⁽¹⁾	
	kg/m ³	MJ/kg	kcal/kg
Bagaço de cana	-	17,5	4.181
Palha	-	17,0	4.061
Eucalipto	690	19,4	4.635
Pinus	460	20,0	4.778

Nota: (1) Poder calorífico inferior em base seca da biomassa.

Fonte: EPE a partir das referências apresentadas no item 5.3 Custos da biomassa combustível

Tabela 15 - Consolidação de custos de produção e transporte de biomassa no Brasil

Biomassa	Unidade comercial	Custos de produção	Custos de transporte	Custo total
Cana-de-açúcar	R\$/t	35,00	5,50	40,50
Bagaço de cana ⁽¹⁾	R\$/t	9,80	1,50	11,30
Palha ⁽²⁾	R\$/t	41,40	4,90	46,30
Eucalipto ⁽³⁾	R\$/m³	-	-	15,00
Pinus ⁽³⁾	R\$/m³	-	-	10,00

Nota: (1) Transportado com 50 % de umidade.

(2) Calculado em base seca.

(3) Transportado com 60 % de umidade.

Fonte: EPE a partir das referências apresentadas no item 5.3 Custos da Biomassa Combustível

Tabela 16 - Consolidação de custos de biomassa como fonte combustível para geração termelétrica no Brasil

Biomassa	Custo da energia em R\$			Custo da energia em US\$ ⁽¹⁾		
	R\$/GJ	R\$/Gcal	R\$/MBTU	US\$/GJ	US\$/Gcal	US\$/MBTU
Bagaço de cana	1,29	5,41	1,36	0,52	2,16	0,54
Palha	2,72	11,40	2,87	1,09	4,56	1,15
Eucalipto	1,87	5,39	1,97	0,75	2,16	0,79
Pinus	1,81	3,49	1,91	0,72	1,40	0,76

Nota: (1) Convertido à taxa de R\$ 2,50 / US\$.

Fonte: EPE a partir dos dados das Tabelas 15 e 16.

Por fim, cumpre citar algumas referências internacionais que procuram avaliar o custo de disponibilização dos diversos tipos de biomassa energética. No estudo de BAIN et al. (2003), que avaliou a disponibilidade da biomassa de diversas fontes, considerando os resíduos urbanos até as culturas energéticas, utilizando-se de metodologia que calculava o potencial desta disponibilidade em função dos diferentes valores de remuneração da fonte, que foram considerados entre $US\$ 25,00 / t_{\text{seca}}$ até $US\$ 55,00 / t_{\text{seca}}$, que significa uma faixa de variação entre $US\$ 1,6 / \text{MBTU}$ até $US\$ 3,4 / \text{MBTU}$.

■ 5.4. Custos de transmissão

A atividade de transmissão de energia elétrica é um monopólio com tarifas reguladas. O pagamento destes custos é realizado por intermédio de tarifas de transmissão, cobrados de geradores e de cargas. Assim, um gerador cuja presença em determinado local representa um impacto ao sistema de transmissão existente estará sujeito a uma tarifa de uso de transmissão elevada, enquanto um gerador localizado em um ponto da rede no qual sua presença alivia o uso do sistema estará sujeita a uma tarifa de transmissão baixa. A mesma filosofia prevalece em relação às cargas. Deve-se adicionar ao componente locacional, um outro componente denominado “selo”, que é constante em todos os pontos do sistema. Esta parcela constitui um custo fixo, rateado igualmente entre os usuários de forma a garantir que o valor total da arrecadação com os usuários da rede básica seja igual à receita devida às concessionárias de transmissão pela disponibilização de seus ativos da rede básica (TOLMASQUIM, 2005).

As tarifas de uso do sistema de transmissão – TUST – são reajustadas anualmente na mesma data em que ocorrem, simultaneamente, os reajustes das Receitas Anuais Permitidas - RAP das concessionárias de transmissão, conforme determina seus Contratos de Concessão. Esse período tarifário vai de 1º de julho do ano em que são publicadas até 30 de junho do ano subsequente. TOLMASQUIM (2005) usa como referência o valor de R\$ 2,50/MWh para tarifa de transmissão.

■ 5.5. Impostos

Na elaboração e análise de projetos do setor elétrico, devemos considerar a incidência dos seguintes tributos e encargos (LORA, 2004):

a) COFINS – Contribuição para Financiamento da Seguridade Social

De competência da União, o fato gerador é a percepção do faturamento. A base de cálculo é o faturamento mensal. A alíquota é de 7,60%.

b) PIS – Contribuição para o Programa de Integração Social

Também de competência da União, o fato gerador é a percepção do faturamento. A base de cálculo é o faturamento mensal. A alíquota é de 1,65%.

c) TFSEE – Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica

É devida à ANEEL pelas concessionárias que produzem, transmitem, distribuem e comercializam energia elétrica. A base de cálculo é o benefício econômico, sendo que o valor devido é deduzido das cotas de Reserva Global de Reversão. A taxa é de 0,5% sobre a receita.

d) CPMF – Contribuição Provisória sobre Movimentação Financeira

De competência da União, a CPMF tem como fato gerador a movimentação ou transmissão financeira, com alíquota de 0,38% sobre a receita bruta.

e) IRPJ – Imposto de Renda de Pessoa Jurídica

De competência da União, o IRPJ incide sobre o lucro real das pessoas jurídicas. Lucro real é base de cálculo do imposto sobre a renda apurada segundo registros contábeis e fiscais autorizadas efetuados sistematicamente de acordo com as leis comerciais e fiscais, com alíquota de 25%.

f) CSSL – Contribuição Social sobre o Lucro Líquido

De competência da União, a Contribuição Social sobre o Lucro Líquido é aplicada às mesmas normas de apuração estabelecidas para o imposto de renda das pessoas jurídicas, mantidas a base de cálculo e as alíquotas previstas na legislação, com alíquota de 9%.

6. Avaliação econômica

■ 6.1. Base de cálculo

A avaliação econômica aqui apresentada tem como objetivo determinar o menor preço de venda da energia assegurada de uma geração termelétrica a partir da biomassa, suficiente para remunerar o capital investido na construção e os custos operacionais da usina (“tarifa de equilíbrio”).

Para a avaliação da geração termelétrica a partir da biomassa, foi aplicado o método do fluxo de caixa descontado simulando três alternativas de combustível, que são:

- Alternativa A: 17,5 MJ/kg, R\$ 11,30/t (Custo estimado de biomassa originada como resíduo de produção agroindustrial);
- Alternativa B: 17,0 MJ/kg, R\$ 46,30/t (Custo estimado do resíduo agrícola);
- Alternativa C: 19,5 MJ/kg, R\$ 21,70/t (Custo estimado de biomassa originada em floresta plantada).

A primeira alternativa (A) reflete a situação da biomassa combustível originada como resíduo de produção agroindustrial, referenciada pelas condições de custo e produção da cana-de-açúcar e do bagaço na

usina. O custo do bagaço foi estimado pelo rateio, proporcionalmente em massa, do custo da cana-de-açúcar produzida, transportada e entregue na usina.

A segunda alternativa (B) reflete a situação da biomassa combustível originada como resíduo de produção agrícola, referenciada pelas estimativas de custo de recuperação e transporte da palha da cana-de-açúcar residual no campo.

A terceira alternativa (C) reflete a situação da biomassa combustível originada em floresta plantada, referenciada pelas condições de custo e produção de pinus e eucalipto no Brasil, incluído transporte e entrega na usina.

Como parâmetros de referência da geração termelétrica de cada uma das tecnologias consideradas, foram adotados os valores apresentados na Tabela 17, que se referem à disponibilidade total de energia elétrica das instalações operando integradas aos processos produtivos, ou seja, em modo de co-geração.

Neste modo de operação, trata-se o fornecimento de vapor ao processo produtivo como um insumo energético a ser remunerado, pois há para este um custo de oportunidade, semelhante à consideração aplicada à biomassa originada como resíduo de produção agroindustrial. Foi utilizado o valor de vapor a R\$ 5,75 por tonelada, considerando-se vapor saturado seco na faixa de 2,0 kgf/cm² a 3,0 kgf/cm² de pressão.

Tabela 17 - Geração específica de energia elétrica das tecnologias a partir da biomassa – operação em modo de co-geração

Tecnologia	Geração específica de energia elétrica em co-geração (kWh/ton.Biomassa) ⁽¹⁾
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	215
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	340
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	1.050

Nota: (1) Referenciado a biomassa em base seca

Neste modo de operação em co-geração, adotou-se uma inflexibilidade de 70% sobre a disponibilidade líquida da instalação, que resulta da subtração de 2,0 % de indisponibilidade forçada e 1,0% de indisponibilidade programada da capacidade nominal instalada.

No que se refere à potência instalada, aos custos de referência para investimentos, custos fixos e custos variáveis de operação e manutenção, assumiu-se, por tecnologia, os seguintes valores apresentados na Tabela 18. O valor do custo variável foi assumido constante, independentemente do fator de capacidade da usina.

Tabela 18 - Custos de referência para avaliação econômica

Tecnologia	Potência instalada (MW)	Custo da instalação (US\$/kW)	Custo fixo anual O&M (US\$/kW)	Custo variável (10 ⁻³ US\$/kWh)
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	50	850	20	1,5
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	100	1.100	20	2,0
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	150	1.500	55	6,0

Os custos unitários da potência instalada foram parametrizados entre ± US\$ 300,00/kW e o prazo de construção, até o início da operação comercial, estimado em 3 anos, com desembolsos anuais de 10%, 40% e 50% no ano final de construção. Considera-se, por hipótese, que todas as receitas e despesas referentes a um determinado período são concentradas ao final desse período.

A vida útil estimada em projetos para usinas termelétricas vai de 20 a 30 anos. Na análise aqui apresentada, considerou-se que as térmicas a biomassa têm vida útil de 20 anos.

No cálculo da tarifa de equilíbrio foram considerados os seguintes encargos e impostos:

1. Encargos setoriais

- Custo de acesso e uso da rede (TUST): 2,50 R\$ / MWh
- Custo de acesso e uso da rede (TUSD): 2,50 R\$ / MWh
- Taxa de fiscalização (ANEEL): 0,5% da receita
- Investimento em pesquisa e desenvolvimento: 1,0% da receita líquida

2. Impostos sobre a receita

- Alíquota do PIS = 1,65%
- Alíquota da COFINS = 7,60%
- Alíquota da CPMF = 0,38%

3. Impostos sobre os resultados

- Alíquota do IR = 25%
- Alíquota da CSLL = 9%

A taxa de câmbio utilizada na conversão dos valores expressos em US\$ para R\$ foi de US\$ 1 = R\$ 2,30.

Finalmente, a taxa interna de retorno do projeto foi parametrizada entre 8 e 12%.

■ 6.2. Resultados

A análise econômica realizada, baseada em três alternativas de fornecimento de combustível e parametrizada em relação ao custo unitário de instalação de três tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa e taxa interna de retorno exigida pelo investidor, buscou calcular a tarifa monômnia, expressa em R\$/MWh, suficiente para a remuneração dos investimentos e custos incorridos na geração de energia elétrica.

Para cada alternativa de combustível, custo de instalação e taxa de retorno, foram calculadas:

- uma tarifa que remunera os custos de instalação e de geração, desconsiderados todos os impostos e encargos incidentes sobre a atividade (“custo de produção”);
- uma tarifa que remunera os custos de instalação e geração, considerados todos os impostos e encargos incidentes sobre a atividade (“tarifa de equilíbrio”).

Os resultados são apresentados nos itens que se seguem, de forma segmentada por tecnologia de geração termelétrica.

■ 6.2.1. Ciclo a vapor de contrapressão

Tabela 19 - Custo de produção e tarifa de equilíbrio para a geração termelétrica a biomassa, em R\$/MWh
Ciclo a vapor de contrapressão - Taxa de desconto de 8% ao ano

Investimento	Alternativa A (Resíduo agroindustrial)		Alternativa B (Resíduo agrícola)		Alternativa C (Floresta plantada)	
US\$/kW	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio
550	45,74	72,83	209,64	256,05	94,63	127,50
700	52,36	81,86	216,26	265,08	101,25	136,52
850	58,98	90,89	222,87	274,11	107,86	145,55
1.000	65,59	99,92	229,49	283,13	114,48	154,58
1.150	72,21	108,94	236,11	292,16	121,10	163,61

Tabela 20 - Custo de produção e tarifa de equilíbrio para a geração termelétrica a biomassa, em R\$/MWh
Ciclo a vapor de contrapressão - Taxa de desconto de 10% ao ano

Investimento	Alternativa A (Resíduo agroindustrial)		Alternativa B (Resíduo agrícola)		Alternativa C (Floresta plantada)	
US\$/kW	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio
550	49,61	79,38	213,51	262,60	98,50	134,04
700	57,28	90,19	221,18	273,41	106,17	144,86
850	64,95	101,01	228,85	284,23	113,84	155,68
1.000	72,62	111,82	236,52	295,04	121,51	166,49
1.150	80,30	122,64	244,19	305,86	129,18	177,31

Tabela 21 - Custo de produção e tarifa de equilíbrio para a geração termelétrica a biomassa, em R\$/MWh
Ciclo a vapor de contrapressão - Taxa de desconto de 12% ao ano

Investimento	Alternativa A (Resíduo agroindustrial)		Alternativa B (Resíduo agrícola)		Alternativa C (Floresta plantada)	
US\$/kW	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio
550	53,75	86,39	217,65	269,61	102,64	141,06
700	62,55	99,12	226,45	282,34	111,44	153,79
850	71,35	111,85	235,25	295,07	120,24	166,52
1.000	80,15	124,58	244,05	307,80	129,04	179,24
1.150	88,96	137,30	252,85	320,52	137,84	191,97

■ 6.2.2. Ciclo a vapor de condensação e extração

Tabela 22 - Custo de produção e tarifa de equilíbrio para a geração termelétrica a biomassa, em R\$/MWh
Ciclo a vapor de condensação e extração - Taxa de desconto de 8% ao ano

Investimento	Alternativa A (Resíduo agroindustrial)		Alternativa B (Resíduo agrícola)		Alternativa C (Floresta plantada)	
US\$/kW	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio
800	62,19	91,24	166,16	207,44	93,21	125,90
950	68,81	100,26	172,78	216,47	99,82	134,93
1.100	75,43	109,29	179,39	225,50	106,44	143,96
1.250	82,05	118,32	186,01	234,53	113,06	152,99
1.400	88,66	127,35	192,63	243,56	119,68	162,02

Tabela 23 - Custo de produção e tarifa de equilíbrio para a geração termelétrica a biomassa, em R\$/MWh
Ciclo a vapor de condensação e extração - Taxa de desconto de 10% ao ano

Investimento	Alternativa A (Resíduo agroindustrial)		Alternativa B (Resíduo agrícola)		Alternativa C (Floresta plantada)	
US\$/kW	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio
800	67,82	100,76	171,78	216,97	98,83	135,42
950	75,49	111,58	179,46	227,78	106,50	146,24
1.100	83,16	122,39	187,13	238,60	114,17	157,05
1.250	90,84	133,21	194,80	249,41	121,85	167,87
1.400	98,51	144,02	202,47	260,23	129,52	178,69

Tabela 24 - Custo de produção e tarifa de equilíbrio para a geração termelétrica a biomassa, em R\$/MWh
Ciclo a vapor de condensação e extração - Taxa de desconto de 12% ao ano

Investimento	Alternativa A (Resíduo agroindustrial)		Alternativa B (Resíduo agrícola)		Alternativa C (Floresta plantada)	
US\$/kW	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio
800	73,84	110,96	177,81	227,17	104,85	145,63
950	82,65	123,69	186,61	239,90	113,66	158,35
1.100	91,45	136,42	195,41	252,63	122,46	171,08
1.250	100,25	149,15	204,21	265,35	131,26	183,81
1.400	109,05	161,88	213,01	278,08	140,06	196,54

■ 6.2.3. Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa

Tabela 25 - Custo de produção e tarifa de equilíbrio para a geração termelétrica a biomassa, em R\$/MWh
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa - Taxa de desconto de 8% ao ano

Investimento	Alternativa A (Resíduo agroindustrial)		Alternativa B (Resíduo agrícola)		Alternativa C (Floresta plantada)	
US\$/kW	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio
1.200	94,07	129,64	128,82	168,49	104,43	141,23
1.350	100,68	138,67	135,44	177,52	111,05	150,26
1.500	107,30	147,70	142,06	186,55	117,67	159,29
1.650	113,92	156,73	148,67	195,58	124,29	168,32
1.800	120,54	165,76	155,29	204,60	130,90	177,35

Tabela 26 - Custo de produção e tarifa de equilíbrio para a geração termelétrica a biomassa, em R\$/MWh
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa - Taxa de desconto de 10% ao ano

Investimento	Alternativa A (Resíduo agroindustrial)		Alternativa B (Resíduo agrícola)		Alternativa C (Floresta plantada)	
US\$/kW	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio
1.200	102,50	143,93	137,26	182,77	112,87	155,52
1.350	110,18	154,74	144,93	193,59	120,54	166,33
1.500	117,85	165,56	152,60	204,41	128,21	177,15
1.650	125,52	176,38	160,27	215,22	135,89	187,96
1.800	133,19	187,19	167,95	226,04	143,56	198,78

Tabela 27 - Custo de produção e tarifa de equilíbrio para a geração termelétrica a biomassa, em R\$/MWh
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa - Taxa de desconto de 12% ao ano

Investimento	Alternativa A (Resíduo agroindustrial)		Alternativa B (Resíduo agrícola)		Alternativa C (Floresta plantada)	
US\$/kW	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio	Custo de produção	Tarifa de equilíbrio
1.200	111,54	159,23	146,30	198,08	121,91	170,82
1.350	120,34	171,96	155,10	210,81	130,71	183,55
1.500	129,14	184,69	163,90	223,54	139,51	196,28
1.650	137,95	197,42	172,70	236,27	148,31	209,01
1.800	146,75	210,15	181,50	248,99	157,11	221,74

7. Considerações finais

Características favoráveis do país como a alta incidência de radiação solar e boas condições climáticas, localizado entre os trópicos, extenso território com disponibilidade expressiva de terras agriculturáveis, indústria agropecuária madura etc., não estão ainda refletidas no aproveitamento do potencial energético da biomassa, em especial na geração de energia elétrica a partir da biomassa. Na verdade, apenas 3,6% da potência instalada total do país, ou seja, cerca de 3.500 MW são de termelétricas a biomassa, com participação majoritária das

instalações na indústria sucroalcooleira (2.440 MW), seguida pela indústria de papel e celulose (782 MW).

O baixo aproveitamento deste potencial não se deve à falta de competitividade das tecnologias, bem como das condições de produção e oferta das diversas fontes de biomassa disponíveis no país, conforme pode ser constatado pelos resultados das tarifas de equilíbrio apresentadas no estudo, situadas na sua maioria abaixo dos R\$ 140,00 por MWh para os resíduos agroindustriais nas três tecnologias simuladas, a saber, ciclo a vapor em contrapressão, ciclo a vapor em condensação e extração e combinado integrado a gaseificação da biomassa.

Mesmo as florestas plantadas aparecem competitivas em alguns nichos, abaixo de R\$ 160,00 por MWh. Vale destacar que a análise econômica não incorpora o efeito do financiamento no fluxo de caixa, e muito menos de políticas específicas de incentivo à biomassa, as quais se traduzem em redução dos patamares de tarifa de equilíbrio e fomentam as alternativas mais sustentáveis e que apresentam externalidades positivas.

Observa-se que as tarifas de equilíbrio para os resíduos agroindustriais são altamente competitivas, mesmo no caso da gaseificação e se aproximam dos patamares de preço dos últimos leilões de energia, em torno de R\$ 140,00 MWh. Para o aproveitamento dos resíduos agrícolas, ainda permanece a necessidade de aperfeiçoamentos tecnológicos, ou mesmo de inovação de processos, para viabilizar redução dos custos de coleta e disposição destes como insumo para fins de aproveitamento energético. O caso exemplo disto é o da palha e ponta da indústria canavieira.

A evolução tecnológica contudo vem reduzindo os custos de investimento, aumentando a eficiência e conseqüentemente a competitividade e o potencial de aproveitamento energético da biomassa. No que diz respeito às tecnologias de conversão termoquímica da biomassa para geração de energia elétrica, cabe destacar que o Brasil dispõe da capacitação nacional, tanto tecnológica quanto industrial, para construir ciclos termelétricos a vapor, de contrapressão e de condensação e extração, nas mais elevadas condições de eficiência que estas tecnologias oferecem. O crescimento do mercado interno para estas tecnologias, resultante da expansão da geração de energia elétrica tendo a biomassa como fonte combustível, oferece condições para que sejam elevadas as características de eficiência, tanto dos ciclos quanto dos processos de fabricação industrial, resultando assim em efeito escala favorável aos custos de investimento e operação.

A alternativa tecnológica dos ciclos combinados integrados a gaseificação da biomassa, que por ora permanece em estágio de desenvolvimento, mostra-se promissora e fortalece as vantagens competitivas nacionais no posicionamento como um potencial grande player no mercado internacional de energia sustentável oriunda da biomassa.

Dois fatores tornam as expectativas quanto a este ciclo tão favoráveis: em primeiro lugar, a estrutura tecnológica do ciclo combinado é totalmente madura, e mesmo a questão de ser o gás resultante da gaseificação de baixo poder calorífico, que influencia o desempenho da turbina a gás, já está tecnologicamente bem equacionada; em segundo lugar se coloca uma forte movimentação mundial de organismos de pesquisa, entidades governamentais e financiadoras de projetos no sentido de desenvolver as tecnologias de gaseificação de biomassa destinadas à produção de gases de síntese para a produção de combustíveis líquidos para transporte. Deste desenvolvimento generalizado da tecnologia de gaseificação virão as vantagens de escala, custo de investimento e operação e disponibilidade, que beneficiarão também a sua utilização para a geração de energia elétrica.

Como parte integrante do grupo de Estudos de Energia Elétrica 2030 – Plano de Oferta, constituintes do

PNE 2030, esta nota técnica é complementada pelos estudos: Avaliação do potencial da biomassa como recurso energético, Geração termelétrica a partir da biomassa: potencial de geração e Geração termelétrica a partir da biomassa: avaliação dos impactos socioambientais.

Nestas notas técnicas são avaliados este potencial, juntamente com novas reflexões sobre as questões socioambientais, econômicas, tecnológicas e regulatórias.

Por fim, vale reiterar que nos últimos leilões de energia houve venda oriunda de UTEs a biomassa, em torno dos R\$ 140,00 MWh, o que demonstra o início de um processo de renovação de interesse pelos investidores no aproveitamento da biomassa energética, sobretudo após o novo arranjo comercial – regulatório que se aplica à biomassa.

8. Referências bibliográficas

8.1 Reuniões temáticas na EPE: Outras fontes renováveis

Albert Cordeiro G. de Melo, Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL e ex-Coordenador do Comitê Técnico de Fontes Alternativas do GCPS/CCPE;

Luciano Basto Oliveira, Doutor em Planejamento Energético e pesquisador da COPPE e do Instituto Virtual de Mudanças Globais - IVIG;

Onório Kitayama, Consultor, Assessor da Presidência da União da Agroindústria Canavieira de São Paulo

Oswaldo Stella Martins, Doutor em Energia e Recursos Naturais, Pesquisador do Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO;

Pedro Villalobos, Consultor, M.Sc. Em Química, ex-pesquisador da COPPE/UFRJ;

Carlos Roberto Silvestrin, Vice-presidente Executivo da Associação Paulista de Cogeração de Energia – COGEN.

8.2 Documentos consultados

ANEEL, 2005, Atlas de Energia Elétrica do Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2ª ed., Brasília, DF.

ANEEL, 2006, Banco de Informações de Geração – BIG, Agência Nacional de Energia Elétrica, disponível em <http://www.aneel.gov.br>, acessado em 28/06/2006.

AZOLA, E. P., ANDRADE, J. F. M., RIBEIRO, R. H. C., et al., 1999, Identificação do Potenciais Econômicos e de Mercado de Cogeração no Setor Sucroalcooleiro. In: Relatório para Inclusão no Plano Decenal de Expansão da ELETROBRÁS - ECV – 788/98, ELETRONUCLEAR, Rio de Janeiro.

BABU, S. P., 2006, Perspectives on Biomass Gasification. In: Thermal Gasification of Biomass, IEA Bioenergy Agreement.

BAIN, R., CRAIG, K., COMER, K., 1997, Renewable Energy Technology Characterizations. In: Biomass EPRI Topical Report No. TR-109496, U.S. Department of Energy, Washington, D.C., EPRI, Palo Alto, California, Dec.

BAIN, R.L., AMOS, W.A., DOWNING, M., PERLACK, R.L., 2003, Biopower Technical Assessment: State of the Industry and Technology, NREL/TP-510-33123, National Renewable Energy Laboratory – NREL and Oak Ridge National Laboratory – ORNL, Golden, Colorado.

CAMARGO, C. A., USHIMA, A. H., RIBEIRO, A. M. M., et al., 1990, Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Álcool – Manual de Recomendações. 1 ed. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Brasil.

CORREA, V., 2001, Análise de Viabilidade da Cogeração de Energia Elétrica em Ciclo Combinado com Gaseificação de Biomassa de Cana-de-açúcar e Gás Natural, Tese M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

CORREA, V., RAMON, D., 2002, Relatório de Análise de Opções Tecnológicas para Projetos de Co-geração no Setor Sucroalcooleiro. Sustainable Energy Technology Assistance Program – SETAP, Vibhava

Consultoria Empresarial S/C Ltda, Brasília, Brasil.

CRAIG, K. R., BAIN, R. L., OVEREND, R. P., 1995, "Biomass Power Systems – Where We Are, Where We Are Going and How To Get There? The Role of Gasification". In: EPRI Conference on New Power Generation Technology, San Francisco, California, Oct.

DINKELBACH, L., 2000, Thermochemical Conversion of Willow from Short Rotation Forestry. In: ECN-C--00-028 REGROW Guide, Energy research Centre of the Netherlands – ECN, Petten, the Netherlands.

DOSSA, D., CONTO, A. J., RODIGHERI, H., HOEFLIC, V. A., 2000, Aplicativo com análise de rentabilidade para sistemas de produção de florestas cultivadas e de grãos. Colombo: Embrapa Florestas, 56p. (Embrapa Florestas. Documentos, 39), PR.

DOSSA, D., CONTO, A. J., RODIGHERI, H., HOEFLIC, V. A., Aplicativo com Análise de Rentabilidade para Sistemas de Produção de Florestas Cultivadas e de Grãos, 2000,

DOSSA, D., SILVA, H. D., BELLOTE, A. F. J., RODIGHER, H. R., 2002, Produção e Rentabilidade de Pínus em Empresas Florestais, Colombo: Embrapa Florestas, 6p. (Embrapa Florestas. Documentos, 82), PR.

DOSSA, D., SILVA, H. D., BELLOTE, A. F. J., RODIGHER, H. R., 2002, Produção e Rentabilidade do Eucaliptos em Empresas Florestais, Colombo: Embrapa Florestas, 4p. (Embrapa Florestas. Documentos, 83), PR.

FONTES, A. A., SILVA, M. L., VALVERDE, S. R., et al., Analysis of forest activity in Viçosa-MG. Rev. Árvore, July/Aug. 2003, vol.27, no.4, p.517-525. ISSN 0100-6762

GOLDEMBERG, J., COELHO, S. T., PALETTA, C. E. M., et al., 2001, Levantamento do Potencial Real de Cogeração de Excedentes no Setor Sucroalcooleiro, Centro Nacional de Referência em Biomassa – CEN-BIO/IEE/USP, São Paulo, SP.

GROSS, R., LEACH, M., BAUEN, A., "Progress in Renewable Energy", 2003, Environment International, n. 29, pp. 105-122.

HALL, J. P., SPITZER, J., DOMAC, J., et al., 2005, Benefits of Bioenergy, IEA Bioenergy: ExCo: 2005:01, disponível em <http://www.ieabioenergy.com/LibItem.aspx?id=179>, em 28/06/2006.

HAQ, Z., 2002, Biomass for Electricity Generation, Energy Information Administration (EIA) / .S. Department of Energy (DOE), disponível em <http://www.eia.doe.gov/oiaf/analysispaper/biomass/index.html>, acessado em 05/07/2006.

IEA, 2005, Key World Energy Statistics, International Energy Agency.

IEA, 2006, Renewables in Global Energy Supply: An IEA Fact Sheet, International Energy Agency, disponível em http://www.iea.org/textbase/papers/2006/renewable_factsheet.pdf, em 28/06/2006.

KURKELA, E., 2002, Review of Finnish Biomass Gasification Technologies, Technical Research Centre of Finland, In: OPET Report 4, Finland.

LARKIN, S., RAMAGE, J., SCURLOCK, J., 2004, "Bioenergy". In: BOYLE, G. (ed.), Renewable Energy: Power for a Sustainable Future, 2ª ed., capítulo 4, New York, USA, Oxford University Press.

LARSON, E. D., WILLIAMS, R. H., LEAL, M. R. L. V., 2001, "A Review of Biomass Integrated-Gasifier/Gas Turbine Combined Cycle Technology and its Application in Sugarcane Industries, with an Analysis for Cuba", Energy for Sustainable Development, v. 1 (march), pp. 54-76.

LEITE, R. C. C., CORTEZ, L. A. B., SOBRAL, M., et al., 2005, Estudo Sobre as Possibilidades e Impactos

da Produção de Grandes Quantidades de Etanol Visando à Substituição Parcial de Gasolina no Mundo, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – NIPE / Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP.

LORA, E. S., HAPP, J. F., 1997, “Classificação e Balanço Térmico das Fornalhas para Combustão de Biomassa”. In: Tecnologias de Conversão Energética da Biomassa, 1 ed., capítulo IV, Manaus, Universidade do Amazonas, AM, Brasil.

LORA, E.E.S, DO NASCIMENTO, M.A.R., 2004, Geração Termelétrica –Planejamento, Projeto, Operação. Volumes 1 e 2. Editora Interciência.

MACCHI, E., 1991, Power Generation Including Cogeneration, Energetic Department – Politecnico di Milano, Milão, Itália.

MAZZONE, V., HAYASHI, T. C., 1997, Noções de Cogeração de Ciclo Simples e Combinado, In: Projeto DPE/SDS/RHAE 610.370/94-4 CNPq, LEN - Laboratório de Energia, Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Bahia, Brasil.

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.efe.br/portugues/Downloads/Files/Capitulo_1F.pdf, em 28/06/2006.

NOWAK, S., GUTSCHNER, M., FAVARO, G., et al., Renewables for Power Generation 2003: Status and Prospects, 2003, In: Renewable Energy Market Acceleration Study (REMAC), International Energy Agency, Paris, France, disponível em http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2000/renewpower_2003.pdf, acessado em 30/06/2006.

OGDEN, J. M., WILLIAMS, R. H., FULMER, M. E., et al., 1990, “Cogeneration Applications of Biomass Gasifier / Gas Turbine Technologies in the Cane Sugar and Alcohol Industries”. In: Energy and the Environment in the 21st Century, pp. 310-346, Cambridge, Massachusetts, Mar.

PEREIRA, J. C. D., SCHAITZA, E. G., HIGA, A. R., 1997, Caracterização dos Resíduos da Madeira de eucalyptus dunnii como Fonte de Energia, EMBRAPA, Pesquisa em Andamento, nº 36, p.1-3.

PRIETO, M. G. S., 2003, Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro-Alcooleira, Estudo de Caso. Tese de D.Sc., Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, SP, Brasil.

THUIJL, E. V., REE, R. V., DE LANGE, T.J., 2003, Biofuel Production Chains: Background document for modelling the EU biofuel market using the BIOTRANS model – ECN-C--03-088, In: Clear Views on Clean Fuels – VIEWLS (NNE5-2001-00619), Energy research Centre of the Netherlands – ECN, The Netherlands, disponível em <http://www.ecn.nl/docs/library/report/2003/c03088.pdf>, acessado em 05/07/2006.

TOLMASQUIM, M.T., 2005, Geração de Energia Elétrica no Brasil. CENERGIA. Editora Interciência. Rio de Janeiro.

TURNURE, J. T., WINNETT, S., SHACKLETON, R., HOHENISTEIN, W., 1995, Biomass Electricity: Long-Run Economics Prospects and Climate Policy Implications. Report CP-200-8098 (DE95009230), National Renewable Energy Laboratory, Portland, OR.

UDOP, 2006, Preço da Cana Campo Região UDOP (Preço sugerido para parceria) - Valores praticados

durante as Safras 00/01 a 06/07, Associação Profissional da Indústria da Fabricação de Álcool, Açúcar, Similares e Conexos, disponível em <http://www.udop.com.br/>, acessado em 08/07/2006.

VERINGA, H.J., 2000, Advanced Techniques for Generation of Energy from Biomass and Waste, Energy research Centre of the Netherlands – ECN, disponível em http://www.ecn.nl/fileadmin/ecn/units/bio/Overig/pdf/Biomassa_voordelen.pdf, acessado em 03/07/2006.

WAACK, R. S., NEVES, M. F., MORAES, S., et al., 1998, “Competitividade do Sistema Agroindustrial da Cana-de-açúcar”. In: Competitividade no Agribusiness Brasileiro, FARINA, E. M. M. Q, ZYLBER-SZTAJN, D. (Coords.), Programa de Estudos dos Negócios do Sistema Agroindustrial Departamentos de Economia e Administração da FEA-USP e Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), vol. V, São Paulo – SP.

Participantes da Empresa de Pesquisa Energética – EPE

Coordenação Geral

Mauricio Tiomno Tolmasquim
Amílcar Guerreiro

Coordenação Executiva

Renato Pinto de Queiroz
Juarez Castrillon Lopes

Coordenação Técnica

Ricardo Gorini de Oliveira

Equipe Técnica

Vicente Correa Neto
André Luiz Zanette

GERAÇÃO TERMELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA: POTENCIAL DE GERAÇÃO

SUMÁRIO

1.	Introdução	147
2.	Potencial da produção agrícola, agroindustrial e silvicultural no Brasil	150
2.1.	A disponibilidade de áreas agriculturáveis	151
3.	Potencial de geração termelétrica no setor sucroalcooleiro	152
3.1.	Expansão da cultura de cana-de-açúcar no Brasil	153
3.2.	Disponibilidade de biomassa derivada da cana-de-açúcar	155
3.2.1.	Manutenção da palha no campo - impactos positivos e negativos	156
3.2.1.1.	Conservação do solo	160
3.2.1.2.	Reciclagem de nutrientes	161
3.2.1.3.	Resíduos agroindustriais – vinhaça e torta de filtro	162
3.2.1.4.	Propriedades físicas do solo	162
3.2.1.5.	Ambiente biológico – animal e vegetal	163
3.2.1.6.	Balanço geral de vantagens e desvantagens	165
3.3.	Recuperação da palha na cultura da cana-de-açúcar	166
3.4.	Estimativas do custo referencial do bagaço	169
3.5.	Produção de etanol a partir da celulose	170
3.5.1.	Conversão de celulose em etanol	171
3.5.2.	Produtividade e eficiência segundo o processo e a matéria-prima	172
3.5.3.	Estimativas econômicas da produção de etanol celulósico	173
3.5.4.	Condições de penetração da tecnologia de etanol celulósico no Brasil	174
3.6.	Desenvolvimento tecnológico do setor sucroalcooleiro	176
3.6.1.	Expansão e renovação do parque industrial do setor sucroalcooleiro	177
3.6.2.	Tecnologias de geração termelétrica para expansão e renovação no setor sucroalcooleiro	181
3.7.	Perspectivas de geração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro	184
4.	Conclusões	188
5.	Referências bibliográficas	191
5.1.	Reuniões temáticas na EPE: Outras fontes renováveis	191
5.2.	Documentos consultados	191

1. Introdução

Para atender ao objetivo de analisar o potencial de incorporação das tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa na expansão do sistema nacional de geração de energia elétrica, considerando os sistemas de produção de biomassa, as tecnologias de geração termelétrica e os aspectos socioambientais, esta Nota Técnica se refere aos conteúdos elaborados na Nota Técnica Geração termelétrica a partir da biomassa: caracterização técnico-econômica e na Nota Técnica Avaliação do potencial da biomassa como recurso energético.

A partir dos dados de caracterização técnico-econômica das tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa e das estimativas de quantificação da oferta e disponibilidade de biomassa para fins energéticos em geral, e particularmente como fonte para geração de energia elétrica, incluindo as culturas que apresentam condições atuais e perspectivas futuras em escala no país, considerando tanto as culturas alimentares e seus resíduos, as culturas energéticas e a produção silvicultural, bem como os resíduos agroindustriais produzidos, apresentados nas notas técnicas já citadas, o presente relatório apresenta uma análise das condições que circunscrevem e delimitam o potencial de geração de energia elétrica a partir desta fonte e a quantificação do mesmo.

Como o estudo em questão visa subsidiar um plano de energia com foco na geração de energia elétrica para o Brasil, e diante das informações disponibilizadas nos estudos já realizados, e do conhecimento já consolidado sobre a temática, concentraremos nossa atenção nas fontes de biomassa de escala compatível com a integração ao sistema elétrico e nas tecnologias que atendem ao perfil de processo do país, e concentramos a abordagem desta Nota Técnica na biomassa proveniente das atividades do setor sucroalcooleiro, incluídos o bagaço e a palha.

As estimativas de produção e oferta de resíduos de biomassa como fonte de energia primária para uso como combustível na geração de energia elétrica, resultante das avaliações realizadas na Nota Técnica Avaliação do potencial da biomassa como recurso energético, e aqui reproduzidas de forma consolidada nas Tabelas 1 e 2, demonstram a expressiva quantidade de energia primária renovável produzida no país e potencialmente aplicável para fins energéticos, da ordem de 4,2 milhões de barris equivalentes de petróleo por dia em 2005, um ano em que a produção média do país foi da ordem de 1,7 milhões de barris de petróleo por dia.

Verifica-se nas referidas tabelas que a oferta mássica, quantificada em milhões de toneladas de biomassa em base seca por ano (t_{Bbs}/ano), e seu conteúdo energético, expresso em barris equivalentes de petróleo por dia (bep/dia), por resíduo agrícola, agroindustrial e silvicultural, no Brasil em 2005, e nas projeções para os anos 2010, 2015, 2020 e 2030, alcança valores de significativa relevância.

O potencial de energia primária dos resíduos agrícolas, com valores da ordem de 3,5 milhões de bep/dia em 2005 e de 8,9 milhões de bep/dia na projeção para 2030 requer investimentos para o desenvolvimento de rotas tecnológicas para sua recuperação, referentes ao maquinário capaz de recuperar de forma adequada esta biomassa que fica no campo, e dispêndios de disponibilização, referentes aos custos desta operação e do seu transporte até uma unidade que efetivará sua aplicação como combustível para geração de energia elétrica ou matéria-prima celulósica.

Tabela 1 - Oferta mássica de biomassa por resíduo agrícola, agroindustrial e silvicultural
Brasil ($10^6 \text{ t}_{\text{bep}}/\text{ano}$) ⁽¹⁾

	2005	2010	2015	2020	2030
Total	558	731	898	1.058	1.402
Resíduos agrícolas	478	633	768	904	1.196
Soja	185	251	302	359	482
Milho	176	251	304	361	485
Arroz (palha)	57	59	62	66	69
Cana-de-açúcar (palha)	60	73	100	119	160
Resíduos agroindustriais	80	98	130	154	207
Cana-de-açúcar (bagaço)	58	70	97	115	154
Arroz (casca)	2	2	3	3	3
Lixívia ⁽¹⁾	13	17	21	25	34
Madeira ⁽²⁾	6	8	10	12	16
Florestas energéticas	13	30	31	43	46
Madeira Excedente ⁽³⁾	13	30	31	43	46

Notas: (1) Licor Negro com concentração entre 75 e 80 % de sólidos secos.

(2) Resíduos de madeira da indústria de celulose: lenha, resíduos de madeira e cascas de árvore.

(3) Representa a diferença entre a quantificação teórica da produção potencial nas áreas ocupadas pela silvicultura e o consumo de madeira em tora para uso industrial oriundo de florestas plantadas.

Os resíduos agroindustriais, que em 2005 foram da ordem de 590 mil bep/dia e devem atingir, aproximadamente, 1,5 milhões de bep/dia na projeção para 2030, encontram-se já concentrados em unidades industriais, como usinas de etanol e açúcar e unidades de produção de celulose, sendo a maximização do aproveitamento de seu conteúdo energético dependente de tecnologia industrial de minimização de consumo energético dos processos produtivos e de tecnologia de geração termelétrica de maior eficiência.

Somando-se os resíduos agroindustriais e agrícolas do setor sucroalcooleiro, verifica-se que, em 2005, foram da ordem de 900 mil bep/dia e devem atingir, aproximadamente, 2,4 milhões de bep/dia na projeção para 2030. Considerando-se que, aproximadamente, 50 % deste quantitativo já se encontra disponível em instalações industriais, onde seu uso como energético primário já é tradicional, embora em bases de eficiência não satisfatórias, e que este setor agroindustrial brasileiro é o que apresenta maior grau de avanço em pesquisas e desenvolvimento para a recuperação dos resíduos agrícolas, normalmente chamados palha da cana-de-açúcar, uma análise individual do seu potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa mostra-se pertinente e adequado.

1 Ao longo desta Nota Técnica adotaremos a notação de t_{bep} para indicar a massa, em toneladas, de biomassa em base seca.

Tabela 2 - Estimativa do conteúdo energético primário da biomassa por resíduo agrícola, agroindustrial e silvicultural Brasil (10⁶ bep/dia) ⁽⁴⁾

	2005	2010	2015	2020	2030
Total	4,24	5,68	6,93	8,22	10,81
Resíduos agrícolas	3,54	4,70	5,70	6,71	8,88
Soja	1,25	1,69	2,03	2,41	3,24
Milho	1,43	2,05	2,48	2,94	3,95
Arroz (palha)	0,42	0,43	0,46	0,48	0,51
Cana-de-açúcar (palha)	0,44	0,53	0,74	0,88	1,18
Resíduos agroindustriais	0,59	0,71	0,95	1,13	1,51
Cana-de-açúcar (bagaço)	0,46	0,55	0,76	0,90	1,21
Arroz (casca)	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Lixívia ⁽¹⁾	0,08	0,10	0,12	0,15	0,20
Madeira ⁽²⁾	0,04	0,05	0,06	0,07	0,09
Florestas energéticas	0,11	0,27	0,28	0,38	0,41
Madeira excedente ⁽³⁾	0,11	0,27	0,28	0,38	0,41

Notas: (1) Licor Negro com concentração entre 75 e 80 % de sólidos secos

(2) Resíduos de madeira da indústria de celulose: lenha, resíduos de madeira e cascas de árvore.

(3) Representa a diferença entre a quantificação teórica da produção potencial nas áreas ocupadas pela silvicultura e o consumo de madeira em tora para uso industrial oriundo de florestas plantadas.

(4) 1,0 barril equivalente de petróleo contém 5,95 de Giga Joules de energia (1 bep = 5,95 GJ)

Destaca-se ainda, a forte perspectiva de crescimento da demanda mundial por açúcar e etanol, que deverá elevar a produção mundial de açúcar dos atuais 144,2 milhões de toneladas por ano para 168,4 milhões de toneladas por ano em 2015 (FAPRI, 2006), e a produção de etanol dos atuais 45 milhões de m³ para 115 milhões de m³ por ano em 2015 (F.O.LICHT, 2006).

Embora expressivo o conteúdo energético dos demais resíduos agropecuários e agroindústrias quantificados, a incipiência em relação à recuperação e aproveitamento dos resíduos agropecuários e em relação à silvicultura dedicada a fins energéticos, indicou a pertinência de efetuar-se a avaliação do potencial de geração de energia elétrica em um outro momento.

Pode-se destacar, que o conjunto das questões que se deve equacionar para viabilizar o aproveitamento dos resíduos agrícolas das culturas diversas, como soja, milho e arroz, tem abordagem semelhante à do aproveitamento dos resíduos agrícolas da cultura da cana-de-açúcar, qual seja, a determinação de rotas econômicas e adequadas de recuperação, transporte e disponibilização da biomassa na unidade de industrial, de geração de energia elétrica ou outra. Por esta razão, e pela falta de maiores informações e estudos nacionais sobre esta problemática, os estudos relativos ao setor sucroalcooleiro servem como a melhor referência disponível.

No que diz respeito à silvicultura, o Brasil possui atualmente, a melhor tecnologia de implantação, condução e exploração de florestas de eucalipto, com ampla utilização para produção de produtos florestais diversos, inclusive para exportação. Entre os principais consumidores industriais de madeira em tora oriunda de florestas plantadas no Brasil estão os painéis reconstituídos, compensados, serrados, papel e celulose, carvão vegetal e outros.

Além disso, possui extensas áreas cultiváveis, clima favorável, escolas de formação de profissionais de nível internacional, mão-de-obra barata e abundante, conferindo-lhe um imenso potencial para se tornar líder mundial na geração de energia a partir da biomassa originária da silvicultura.

Entretanto, e naturalmente, devido à já citada incipiência em relação à silvicultura dedicada a fins ener-

géticos, de um lado, e as perspectivas de crescimento da demanda mundial de produtos florestais, principalmente aqueles originários em sistemas florestais certificados, e a competitividade desta indústria no Brasil, os quantitativos de produção da silvicultura estimados para o horizonte do estudo baseiam-se todos em perspectivas do mercado existente, ou seja, para uso industrial da madeira, exigindo, portanto, que a quantificação de um potencial de geração de energia elétrica a partir dessa biomassa considere expansões das áreas de produção da silvicultura superiores às estimativas já apresentadas.

As projeções da produção de florestas plantadas com pinus, eucalipto e madeira tropical, feitas por T0-MASELLI (2004), indicam um crescimento de, aproximadamente, 50 % até 2020, atingindo-se a marca de 275 milhões de m³ por ano de madeira. Para este crescimento de produção, consideradas mantidas as perspectivas de evolução de produtividade da silvicultura verificadas na última década, e sem incluir avanços tecnológicos que configurem quebra estrutural, estima-se a expansão da área plantada dos atuais 5,3 milhões de hectares para, aproximadamente, 8,0 milhões de hectares. Verifica-se que esta área é pouco menor que aquela estimada para a ocupação da cultura da cana-de-açúcar em 2015, de aproximadamente 9,2 milhões de hectares. Para a silvicultura, o Brasil já possui referenciais claramente definidos com relação a estes custos, sendo esta uma atividade de elevada competitividade mundial.

De acordo com as considerações apresentadas na Nota Técnica Geração termelétrica a partir da biomassa: caracterização técnico-econômico as tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa, no universo considerado, são genericamente similares, tanto para centrais associadas a processos produtivos através de sistemas integrados de co-geração quanto para as alternativas de centrais autônomas exclusivamente dedicadas à geração termelétrica para prestação de serviço público, variando principalmente em escala, e em alguns parâmetros de integração da unidade de geração termelétrica com o sistema produtivo.

Neste contexto, em atenção às fontes de biomassa de escala compatível com a integração ao sistema elétrico e nas tecnologias que atendem ao perfil de processos do país, o aspecto de maior significância é a disponibilidade, que inclui todo o processo de colheita, acondicionamento e transporte ao ponto de utilização, onde as distâncias envolvidas são determinantes, bem como a manipulação e o pré-tratamento que na maioria das vezes se fazem necessários, como secagem e adequação de tamanho.

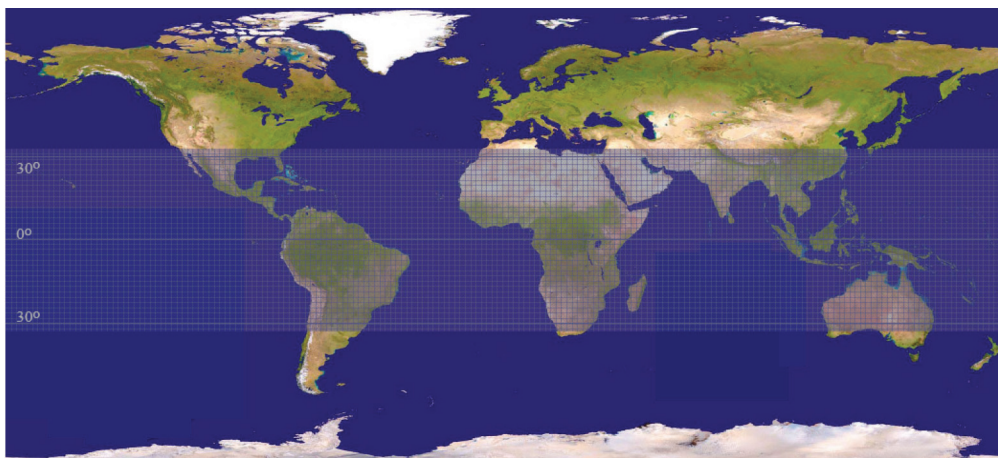
2. Potencial da produção agrícola, agroindustrial e silvicultural no Brasil

As condições naturais e geográficas são favoráveis no Brasil, além de grande quantidade de terra agrícola com características adequadas do solo e condições climáticas, fazendo deste o país que reúne o maior quantitativo de vantagens comparativas para liderar a agricultura, entre as quais, a perspectiva de incorporação de novas áreas com impactos ambientais circunscritos ao socialmente aceitos e a possibilidade de múltiplos cultivos dentro do ano calendário (EMBRAPA/MAPA, 2005).

Situado, predominantemente, na faixa tropical e subtropical do planeta, a região mais propensa à produção de biomassa do mundo, entre o Trópico de Câncer, a 30° de latitude Norte, e o Trópico de Capricórnio, a 30° de latitude Sul, com pode ser visto na Figura 1, o Brasil recebe intensa radiação solar ao longo do ano, a fonte de energia fundamental da produção de biomassa, seja sua finalidade a produção agrícola e pecuária para alimentação humana ou a produção de culturas com fins agroindustriais.

Dentre os países situados na faixa tropical e subtropical, o Brasil é o que apresenta maior potencial de produção agrícola, pois na África a maior parte do território é caracterizada por áreas desérticas, portanto, inviáveis para a produção, a mesma situação que ocorre na Austrália. Dessa forma, os países que tem maiores possibilidades de produção agrícola são alguns do sul da Ásia, países da América Central, que geralmente não dispõem de áreas agricultáveis disponíveis, o norte da América do Sul e o Brasil (SPA/EMBRAPA, 2006).

Figura 1 - Mapa-múndi planificado - faixa tropical e subtropical do planeta



O Brasil, com sua dimensão continental e diversidade geográfica, consegue produzir praticamente todos os principais produtos agrícolas comercializados mundialmente, apresentando diversidade de clima, exuberância de biodiversidade, além de deter um quarto das reservas superficiais e sub-superficiais de água doce. Além disso, o Brasil é reconhecido por haver assumido a liderança na geração e implantação de tecnologia de agricultura tropical, associada a uma pujante agroindústria, em que um dos paradigmas é a agroindústria de etanol, reconhecida como a mais eficiente do mundo, em termos de tecnologia de processo e de gestão (EMBRAPA/EMBRAPA, 2005).

■ 2.1. A disponibilidade de áreas agriculturáveis

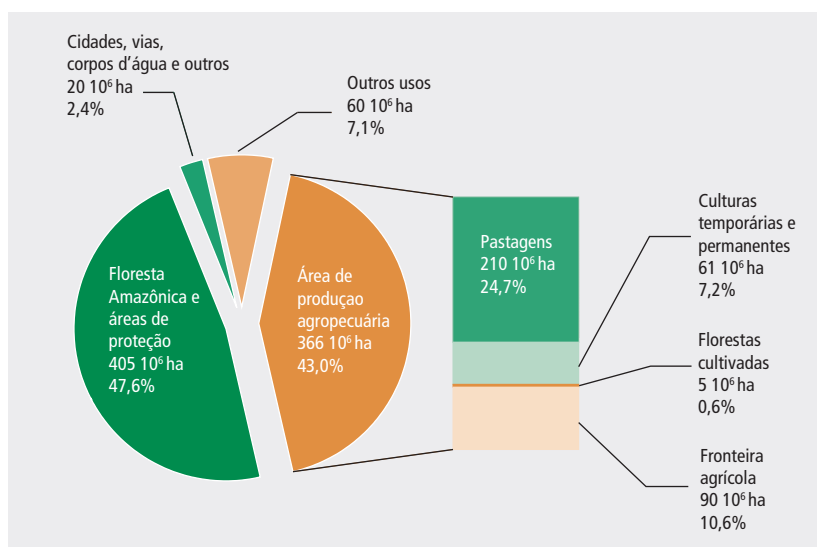
Devido às suas dimensões continentais, o Brasil possui uma elevada diversidade de classes de solos e de tipos climáticos que resultam em uma grande variação no potencial produtivo de suas terras. Esta diversidade, aliada às limitações de uso da terra, como as regiões sensíveis da Floresta Amazônica e outras reservas e áreas de proteção, como o Pantanal, a Mata Atlântica, etc., e a declividade do solo, cria a necessidade de sobrepor tais informações georreferenciadas e determinar as regiões que apresentam diferentes potenciais de produtividade e uso para as atividades agropecuárias desenvolvidas no país.

Tabela 3 - Ocupação do solo e distribuição por área – Brasil

	Milhões de ha	Distribuição
Floresta Amazônica e áreas de proteção	405	47,6%
Cidades, vias, corpos d'água e outros	20	2,4%
Área de produção agropecuária	366	43,0%
Pastagens	210	24,7%
Culturas temporárias e permanentes	61	7,2%
Florestas cultivadas	5	0,6%
Fronteira agrícola	90	10,6%
Outros usos	60	7,1%
Brasil	851	100%

Fonte: SPAE/MAPA, 2006

Figura 2 - Ocupação do solo e distribuição por área, Brasil - 2005



Embora conte com uma atividade agrícola bastante intensa, o Brasil ainda dispõe de muita terra agrícola disponível, sem prejudicar as florestas e áreas de preservação, como pode ser verificado pelos números de ocupação do solo e distribuição por área no Brasil, apresentados na Tabela 3 e graficamente representados na Figura 2.

3. Potencial de geração termelétrica no setor sucroalcooleiro

O Brasil produziu 28,2 milhões de toneladas de açúcar em 2005 e exportou 17,8 milhões de toneladas, o que representou, aproximadamente, 50 % dos 35,1 milhões de toneladas do comércio internacional de açúcar. Com perspectivas de produção recorde para os anos futuros e crescimento da produtividade, continuará ocupando a posição de produtor com maior competitividade, apresentando um aumento da produção estimado pela AGE/MAPA (2006) com uma taxa média anual de crescimento de 3,2 % no período 2005/06 a 2009/10

e de 6,5% no período 2010/11 a 2014/15, conduzindo a uma produção de 45,2 milhões de toneladas do produto em 2014/15.

De acordo com estudos realizados pelo FAPRI (2006), as exportações brasileiras deverão atingir 21,9 milhões de toneladas em 2014/15, que representará, segundo aquela instituição, 56% do comércio internacional. Em suas estimativas, a AGE/MAPA (2006) estima que as exportações atinjam cifra ainda maior, chegando a 24 milhões de toneladas em 2015.

Em relação ao etanol, em 2005 foram produzidos no Brasil 16,2 milhões de m³, e exportados 2,7 milhões de m³, o que representou, aproximadamente, 36 % da produção e 45 % dos 5,9 milhões de m³ comercializados internacionalmente. Igualmente como no caso do açúcar, o etanol brasileiro produzido a partir da cana-de-açúcar, apresenta perspectivas de produção crescente, com continuação da elevação da produtividade e elevada competitividade, devendo alcançar, segundo as estimativas da AGE/MAPA (2006), um crescimento médio anual de 9,4 % no período 2005/06 a 2009/10 e de 7,7 % no período 2010/11 a 2014/15. Essa taxa de crescimento deve conduzir a uma produção de etanol projetada para 2015 de 36,8 milhões de m³, mais que o dobro da produção de 2005, com exportações na ordem de 8,5 milhões de m³, o que representa quase 90 % das estimativas de comércio mundial do produto em 2015 (F.O.LICHT, 2006).

Para alcançar estes níveis de produção de açúcar e etanol, considerando a mesma evolução de produtividade agrícola e agroindustrial verificada nas últimas duas décadas, e sem incluir avanços tecnológicos que configurem quebra estrutural, como a hidrólise de material celulósico, a produção de cana-de-açúcar deve alcançar, respectivamente em 2015 e 2030, 715 milhões de toneladas e 1.140 milhões de toneladas. Estes são os patamares de produção que resultam na produção dos quantitativos de resíduos agrícolas e agroindustriais do setor sucroalcooleiro, apresentados nas Tabelas 1 e 2.

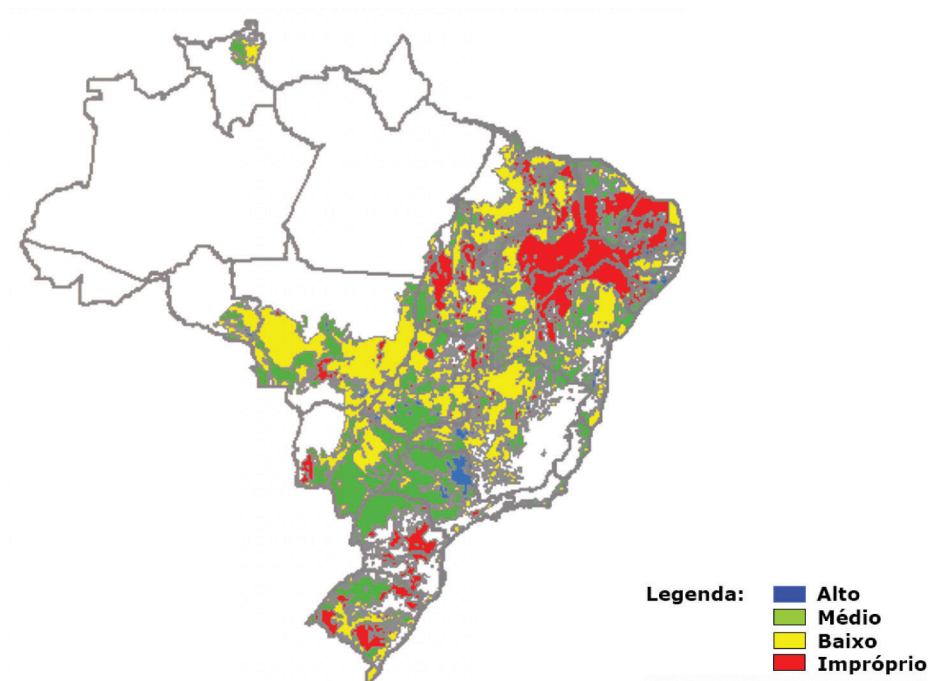
Esta produção, nas condições citadas no parágrafo anterior, fará com que a área ocupada pela produção de cana-de-açúcar no Brasil passe dos atuais 5,6 milhões de hectares para, aproximadamente, 9,2 milhões de hectares e 17 milhões de hectares, respectivamente em 2015 e 2030. Considerando a área de produção agropecuária total disponível, da ordem de 366 milhões de hectares, a área ocupada em 2030 pela cultura da cana-de-açúcar equivaleria a, aproximadamente, 4,5 % deste valor.

■ 3.1. Expansão da cultura de cana-de-açúcar no Brasil

De acordo com o estudo de LEITE *et al.* (2005), não há maiores restrições à expansão da produção de cana-de-açúcar no Brasil, mesmo excluindo as regiões que apresentam restrições ambientais, como as áreas de preservação da Amazônia, Pantanal e remanescentes de Mata Atlântica, entre outras, sendo grande o potencial, principalmente, na região Centro-Sul do País.

Os mapas básicos, de solos, clima, declividade e restrições ambientais, conjugados, juntamente com os mapas temáticos ou de potenciais climático, de solos e edafo-climático, permitiram análises mais detalhadas por regiões ou Estados, e os mapas resultantes do estudo estão reproduzidos nas Figuras 3 e 4, respectivamente para as condições de cultura sem irrigação e com irrigação.

Figura 3 - Mapa do potencial de áreas para produção de cana-de-açúcar (sem irrigação)

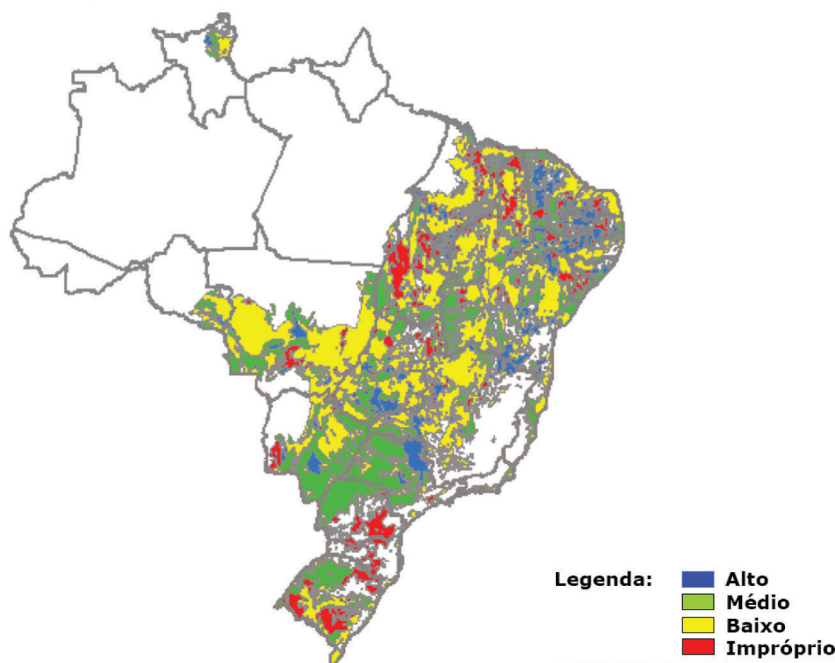


Fonte: LEITE, et al. (2005) apud CTC (2005)

Os mapas de potencial de produção não incluem as áreas com declividade maior que 12%, pois sua utilização é imprópria para colheita de cana-de-açúcar mecanizada, e, com a evolução tecnológica é possível, e até provável, que parte destas áreas possam vir a ser aproveitadas.

Da área cultivável do país, um total aproximado de 360 milhões de ha, a Tabela 4 apresenta o resultado do estudo de LEITE *et al.* (2005), onde se verifica que, para o cultivo de cana-de-açúcar sem irrigação, 2,2% da área cultivável no território nacional apresenta alto potencial, 31,5% médio potencial, 41,2% são enquadrados como baixo potencial e 25,1% como áreas impróprias. As áreas com alto e médio potencial concentram-se predominantemente na região Centro-Sul do Brasil e as de baixo potencial e as áreas impróprias estão distribuídas de forma bastante irregular por todo o país, principalmente na região Sul, semi-árido nordestino e áreas em que ocorrem solos rasos associados com declividades elevadas.

Figura 4 - Mapa do potencial de áreas para produção de cana-de-açúcar (com irrigação)



Fonte: LEITE, et al. (2005) apud CTC (2005)

Tabela 4 - Potencial da produção da cana-de-açúcar, Brasil - 2005

Potencial	Produtividade esperada t/ha ⁽¹⁾	Potencial de utilização (área)				Potencial de produção total ⁽²⁾			
		Sem irrigação		Com irrigação		Sem irrigação		Com irrigação	
		milhões ha	%	milhões ha	%	milhões t	%	milhões t	%
Alto	81,4	7,9	2,2	37,9	10,5	0,64	3,4	3,09	14,6
Médio	73,1	113,9	31,5	98,0	27,1	8,32	44,7	7,16	33,9
Baixo	64,8	149,2	41,2	167,6	46,4	9,67	51,9	10,87	51,5
Impróprio	-	90,6	25,1	58,0	16,0	-	-	-	-
Total	-	361,6	100	361,5	100	18,63	100	21,12	100

Notas: (1) A produtividade média referente a cada potencial foi obtida com base nos valores médios de produtividade de cana-de-açúcar de 2005 do IBGE e do CTC.

(2) Estimado com os índices de produtividade de 2005, se toda a área levantada como potencial fosse utilizada para plantio de cana-de-açúcar.

Fonte: LEITE, et al. (2005)

Através das estimativas calculadas do potencial para a produção de cana-de-açúcar, se toda a área levantada, representada pelo potencial de utilização, fosse utilizada para plantio de cana-de-açúcar, com as produtividades médias, haveria uma produção total de 18.000 milhões de toneladas por ano na área sem irrigação e de 21.000 milhões de toneladas por ano na área onde se considerou o uso de irrigação.

■ 3.2. Disponibilidade de biomassa derivada da cana-de-açúcar

A disponibilidade de biomassa da cana-de-açúcar para uso como fonte primária combustível para a geração de energia elétrica está diretamente associada a algumas variáveis fundamentais, tais como:

a) Produção de cana-de-açúcar para atender às demandas de etanol e açúcar;

- b) Condições edafo-climáticas, técnica de manejo da cultura, particularmente quanto à forma de colheita, e variedades empregadas;
- c) Quantidade de palha nas culturas sem queima pré-colheita passível de recuperação viável;
- d) Quantidade de bagaço de cana passível de aplicação viável como matéria-prima para produção de etanol através de hidrólise.

Tendo sido já explicitadas as perspectivas de produção de cana-de-açúcar para atender às demandas de etanol e açúcar, detalhadas na Nota Técnica Avaliação do potencial da biomassa como recurso energético e resumidas no início deste item 3, e o potencial de produção de cana-de-açúcar no Brasil, considerados no item 3.1, abordaremos a seguir, duas importantes questões relativas à disponibilidade futura de biomassa derivada da cana-de-açúcar para uso como combustível na geração termelétrica:

- As condições de recuperação da palha da cana-de-açúcar nas culturas sem queima pré-colheita, considerando os estudos já desenvolvidos no Brasil para avaliação das rotas de recuperação e transporte, as estimativas de custo da operação e as perspectivas de efetiva recuperação desta biomassa;
- As perspectivas de desenvolvimento da tecnologia de hidrólise a partir da celulose, os parâmetros técnicos e econômicos estimados e o impacto potencial da aplicação do bagaço de cana como matéria-prima para produção de etanol, frente a seu uso como combustível para geração de energia elétrica.

Atualmente, mais de 80% da cultura da cana-de-açúcar no país é queimada antes da colheita. Devido às leis ambientais, principalmente, em diversas regiões, especialmente na Região Sudeste, a colheita da cana-de-açúcar sem queima prévia já deixa uma importante parcela de biomassa nos campos e, seguindo esta tendência, pode-se prever no futuro, a expansão da área colhida sem queima, disponibilizando grandes quantidades de resíduo no campo.

A recuperação de uma fração significativa da palha em culturas da cana-de-açúcar com colheita sem queima depende de tecnologias para recolhimento ainda em desenvolvimento, e seu uso comercial ainda é incipiente.

O Centro de Tecnologia Canavieira CTC, realizou estudo com recursos do Global Environment Facility (GEF), Copersucar, European Commission (EC) e Agência Nacional de Energia da Suécia (STEM), e cobriu todos os aspectos relacionados com o recolhimento da palha, após ou durante a colheita, como os impactos econômicos, devido à variação dos custos das operações agrícolas com e sem palha no chão (preparo do solo, plantio, adubação, herbicidas, etc), efeitos da compactação do solo e perda de produtividade, variação nas perdas agrícolas e finalmente os efeitos na indústria devido à variação das impurezas vegetais da cana conforme a rota de recolhimento de palha utilizada (HASSUANI, LEAL e MACEDO, 2005). As conclusões deste estudo serão aqui apresentadas para referenciar o potencial de recuperação desta biomassa.

■ 3.2.1. Manutenção da palha no campo - impactos positivos e negativos

O sistema de colheita da cana-de-açúcar sem queimar está sendo adotado cada vez mais nas regiões produtoras do Sudeste do Brasil. Sua característica mais visível é a quantidade grande de resíduos (folhas secas, verdes e os ponteiros) deixados no campo. Os efeitos agrônômicos deste resíduo deixado no campo após a colheita mecanizada devem ser examinados para que sua remoção seja considerada, pois não há apenas benefícios, mas alguns inconvenientes. Entre os diversos benefícios de deixar a palha no campo estão:

- a) Proteção da superfície do solo contra a erosão causada pela chuva e pelo vento;

- b) Variações reduzidas da temperatura do solo, que é protegido da incidência direta da radiação solar;
- c) Atividade biológica aumentada no solo;
- d) Infiltração aumentada da água no solo;
- e) Maior disponibilidade de água devido à redução da evaporação superficial do solo;
- f) Controle das ervas daninhas, resultando em redução, ou mesmo eliminação, do uso dos herbicidas, reduzindo custos, risco do envenenamento humano, e a contaminação do ambiente.

A manutenção da palha no campo tem também alguns inconvenientes, e entre os problemas associados com a manutenção de um cobertor de biomassa muito espesso sobre o solo são considerados:

- a) Risco de incêndio durante e após a colheita;
- b) Dificuldades no cultivo mecânico, na fertilização da rebrota e no controle seletivo das ervas daninhas;
- c) Retardo na rebrota da planta e a ocorrência das falhas e descontinuidade nas fileiras, causando uma redução no rendimento quando as temperaturas são baixas e/ou o solo estão muito molhados após a colheita;
- d) Aumento na população de animais peçonhentos que se protegem e multiplicam sob o cobertor de palha.

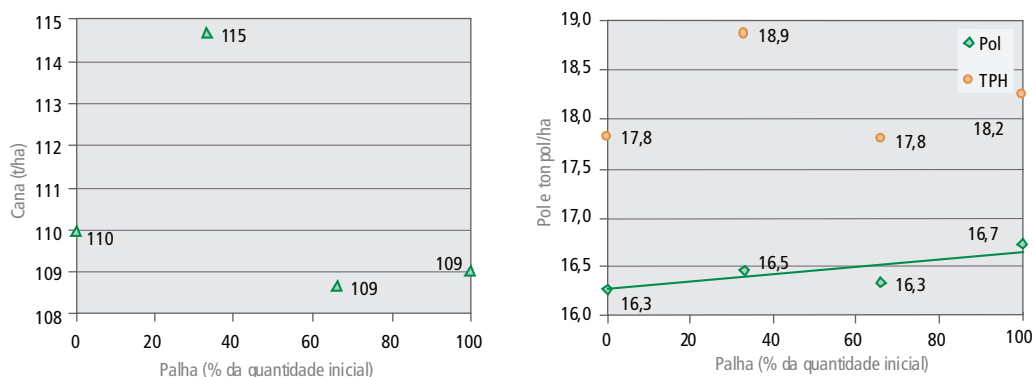
Considerando os condicionantes acima listados, o estudo desenvolvido por MANECHINI, RICCI e DONZELLI (2005), que compõe o capítulo 3 do relatório de HASSUANI, LEAL e MACEDO (2005), procurou identificar o efeito da palha deixada no campo, definindo as condições para remoção ou não desta biomassa, a quantidade mínima de resíduo vegetal que deve ser deixado na superfície do campo em áreas onde a colheita da cultura é mecanizada, para potencializar os benefícios identificados e minimizar os inconvenientes, disponibilizando este quantitativo de biomassa para outros usos.

Os principais parâmetros considerados foram o controle de ervas daninhas sem uso de herbicidas, a produtividade da cana-de-açúcar por hectare, o rendimento da cana-de-açúcar em termos do percentual de pol ² e da tonelada de pol por hectare.

As experiências foram realizadas em três unidades produtoras de açúcar: Usina da Pedra (Serrana-SP), Usina São Francisco (Sertãozinho-SP) e Usina São Martinho (Pradópolis-SP), onde se verificaram diferentes níveis iniciais de infestação de ervas daninhas para diferentes variedades de cana-de-açúcar empregadas, e tiveram duração de três anos, nas safras 97/98, 98/99 e 99/00, com manutenção de 100%, 66%, 33% e 0% da palha no campo. Após este período, uma extensão do projeto continuou durante as safras 00/01, 01/02 e 02/03, para verificar o efeito com a manutenção de apenas 50% do resíduo inicial no solo.

² Pol é o teor de sacarose contido percentualmente na cana-de-açúcar.

Figura 5 – Correlação entre parâmetros de interesse – Usina São Francisco
 Rendimento [$t_{\text{cana}}/\text{ha}$], pol da cana-de-açúcar e toneladas de pol por hectare (TPH)
 Valores médios para três colheitas (97/98, 98/99 e 99/00)
 Com manutenção da palha no campo nas proporções de 100 %, 66 %, 33 % e 0 %

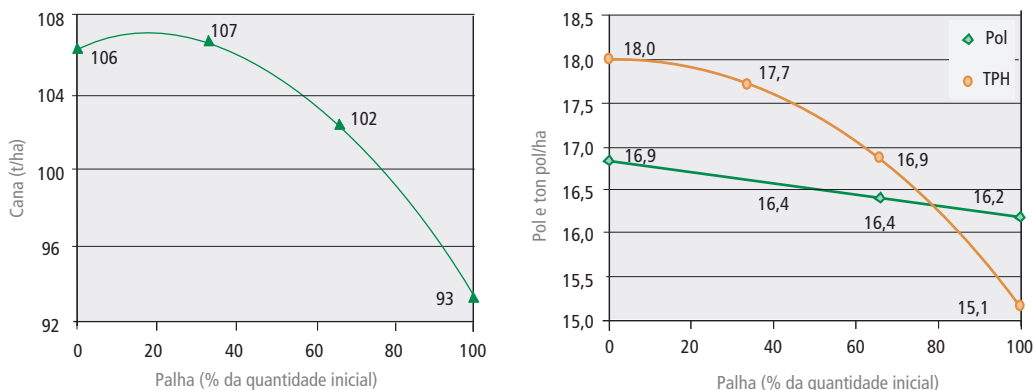


Nota: Não verificou-se correlação no rendimento da cana-de-açúcar por hectare e no TPH
 Fonte: MANECHINI, RICCI e DONZELLI, 2005.

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam os valores médios de correlação entre os principais parâmetros de interesse na avaliação de impactos no rendimento agrônômico da cultura da cana-de-açúcar, quais sejam, o rendimento [$t_{\text{cana}}/\text{ha}$], o Pol da cana-de-açúcar e o TPH - toneladas de Pol por hectare, em função da quantidade proporcional de biomassa residual deixada no campo.

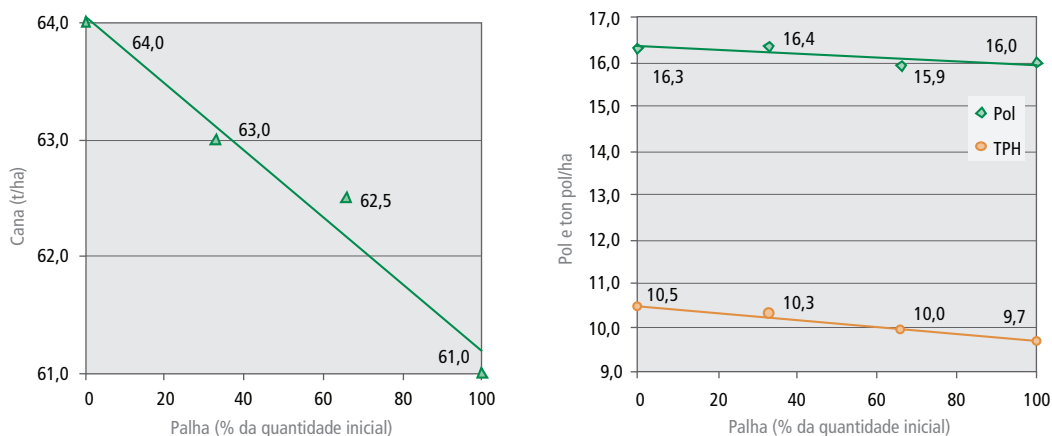
Verifica-se que as áreas utilizadas na experiência representam bem a realidade brasileira, com rendimento mínimo da ordem de 65 $t_{\text{cana}}/\text{ha}$ e máximo de 115 $t_{\text{cana}}/\text{ha}$, representando as diversas regiões produtoras do país, como visto na Figura 8.

Figura 6 – Correlação entre parâmetros de interesse – Usina São Martinho
 Rendimento [$t_{\text{cana}}/\text{ha}$], pol da cana-de-açúcar e toneladas de pol por hectare (TPH)
 Valores médios para três colheitas (97/98, 98/99 e 99/00)
 Com manutenção da palha no campo nas proporções de 100 %, 66 %, 33 % e 0 %



Fonte: MANECHINI, RICCI e DONZELLI, 2005.

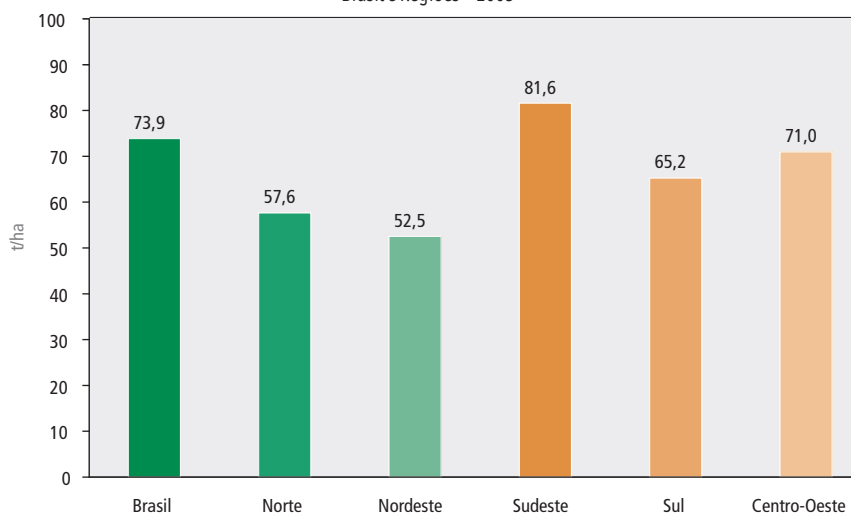
Figura 7 – Correlação entre parâmetros de interesse – Usina da Pedra
Rendimento [$t_{\text{cana}}/\text{ha}$], pol da cana-de-açúcar e toneladas de pol por hectare (TPH)
Valores médios para três colheitas (97/98, 98/99 e 99/00)
Com manutenção da palha no campo nas proporções de 100 %, 66 %, 33 % e 0 %



Fonte: MANECHINI, RICCI e DONZELLI, 2005.

A quantidade de biomassa residual produzida pela cultura da cana-de-açúcar varia em função de diversos fatores, especialmente da variedade da planta, do rendimento agrícola geral, que é influenciado por solo, clima, tratos culturais, etc., e da eficiência da limpeza nas colheitadeiras. No estudo realizado encontrou-se valores variando de $6,7 t_{\text{Bbs}}/\text{ha}$ a $16,8 t_{\text{Bbs}}/\text{ha}$ ³, equivalente a uma variação de $105 t_{\text{Bbs}}/\text{tc}$ a $170 t_{\text{Bbs}}/\text{tc}$ ⁴, onde a produtividade verificada esteve dentro da faixa de $61 t_{\text{c}}/\text{ha}$ a $130 t_{\text{c}}/\text{ha}$.

Figura 8 – Rendimento médio da produção de cana-de-açúcar
Brasil e Regiões – 2005⁽¹⁾



Fonte: CONAB, 2006b.

Nota: (1) Valores estimados para a safra do ano.

³ t_{Bbs} refere-se a toneladas de biomassa em base seca.

⁴ t_{c} é utilizada para denotar tonelada de cana-de-açúcar.

Dependendo das condições específicas do campo de cultura da cana-de-açúcar, tais como a localização geográfica, a variedade da planta, o estágio do corte, o período de colheita, o clima e outros aspectos combinados, identificam-se as áreas onde a palha pode ou deve ser removida, as relações de vantagens e desvantagens da palha deixada sobre o solo podem ser alteradas, tornando-se mesmo aconselhável, em alguns casos, sua remoção completa.

A conveniência de remoção da palha do campo ocorre nas seguintes condições:

- i) Quando próximo a áreas habitadas ou a estradas, devido aos riscos de incêndios acidentais ou intencionais;
- ii) Quando situados em áreas sob a ocorrência de tempestades elétricas e relâmpagos, usualmente em platôs elevados (área lisa, isolada e em uma posição mais elevada relativamente às áreas próximas), e de áreas em rochas da origem vulcânica (rochas magmáticas como o basalto) com uma história de incêndios frequentes causados pelo relâmpago;
- iii) Antes do replantio da cana-de-açúcar em campos infestados por pragas do solo, cujo controle exige a remoção completa dos brotos e raízes e dos resíduos que rebrotam após o revolvimento do solo com o arado;
- iv) Nas regiões onde o inverno é muito úmido, onde haja ocorrência frequente de chuva durante o período da colheita, especialmente em solos com drenagem interna deficiente.

A remoção da palha do campo pode ser recomendável, após considerações técnicas e econômicas, nas seguintes condições:

- i) Quando as variedades apresentam redução significativa no rendimento e/ou no número dos cortes devido à rebrota atrasada e às falhas e descontinuidade dos brotos nas fileiras de plantio causadas pela cobertura da palha;
- ii) Em áreas ou regiões onde se verifica elevada ocorrência de pragas da cana-de-açúcar que se multiplicam e protegem sob a cobertura de palha, e que são favorecidos por níveis mais elevados de umidade, e requerem controle biológico efetivo;
- iii) Antes do replantio da cultura de cana-de-açúcar onde há dificuldade operacional para o uso do sistema cultivo mínimo, por falta de tecnologia/equipamento, ou o desenvolvimento de pragas do solo.

A remoção parcial da palha do campo pode ser recomendável, após considerações técnicas e econômicas, nas seguintes condições:

- i) Durante ou após a colheita, removendo parte dos resíduos e deixando certa parcela uniformemente distribuída sobre o solo, para finalidades agrônômicas, sendo que em torno de $7,5 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{ha}$ se obtém um efeito herbicida;
- ii) A remoção de toda a palha em uma região de, aproximadamente, 60 cm de largura sobre as linhas de cultivo em culturas com variedades de rendimento reduzido pela cobertura de palha.

Nos três casos avaliados no estudo, verifica-se que o principal parâmetro de interesse na avaliação agrônômica da cultura da cana-de-açúcar, toneladas de Pol por hectare (TPH), apresenta valores satisfatórios quando a proporção de palha deixada no campo situa-se na faixa entre 30 % e 40 %.

■ 3.2.1.1. Conservação do solo

Quando as técnicas tradicionais de colheita da cana-de-açúcar com queima prévia da cultura são aplicadas, ou quando não queimados, os resíduos são enterrados através dos processos mecânicos durante a prepa-

ração do solo para plantio, o solo desprotegido fica exposto ao impacto direto dos pingos da chuva, que é o primeiro e mais importante estágio do processo de erosão do solo causado pela água.

Os estudos mostram que a melhor e mais eficaz maneira de evitar a erosão por água em terra cultivadas é impedir o seu começo, usando medidas de controle para evitar o impacto do pingo de chuva diretamente sobre o solo desprotegido.

Um sistema conservacionista foi desenvolvido para conjugar a preparação do solo e a sua cobertura com vegetação em culturas com colheita mecanizada, e proporciona ao mesmo tempo a proteção do solo, a redução do custo e a melhora na qualidade das operações mecanizadas, quando comparado aos sistemas convencionais. Uma combinação de técnicas é recomendada para manter o solo coberto com a matéria orgânica que o protege dos agentes do tempo, especialmente durante a renovação da cultura e o período de plantio.

A adoção dos sistemas de preparação da terra onde um mínimo de operações mecanizadas são executadas, com o eficácia e nos períodos adequados, reduz significativamente os riscos da erosão. Além disso, permitem, até uma determinada inclinação de solo, a eliminação dos “terraços”, permitindo a melhoria no planejamento das linhas de plantio, com a produtividade crescente e redução dos custos de produção como resultado da redução no número e na intensidade de operações no campo durante o período da preparação da terra. O sistema conservacionista pode reduzir em, aproximadamente, 30% as operações de cultivo do solo em áreas de cultura da cana-de-açúcar sem queima pré-colheita, quando comparado à preparação convencional do solo usando gradeamento e aragem.

■ 3.2.1.2. Reciclagem de nutrientes

A composição mineral da palha deixada no campo é, basicamente, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. A análise química e a quantificação de porcentagem de cada nutriente dependem da variedade plantada e a quantidade por hectare também varia. A efetiva disponibilização destes nutrientes de volta ao solo após a colheita se realiza através de um processo chamado mineralização, no qual ocorre a substituição, no interior da terra, dos constituintes orgânicos por inorgânicos, pela ação de microorganismos do solo.

A mineralização dos resíduos vegetais de uma cultura depende dos fatores ambientais, tais como temperatura, disponibilidade de água e de oxigênio, e também da composição química da matéria vegetal, especialmente da proporção de carbono/nitrogênio, referenciados pelo índice (C/N), da lignina, da celulose, da hemicelulose e dos polifenóis.

A matéria vegetal que apresenta uma composição química de nitrogênio (N) até 18 g/kg e índice de C/N superior a 20 tem baixa relação de mineralização, o que significa, que deixada no campo, não recicla os nutrientes em uma taxa satisfatória. Os resíduos vegetais da cana-de-açúcar têm uma média de 4,6 g/kg a 6,5 g/kg de nitrogênio e uma relação de C/N com índice 60 e, portanto, apresenta uma baixa taxa de mineralização do nitrogênio no intervalo de um ano. As experiências de campo realizadas por CONDE, PENATTI e BELLINASSO (2005), para analisar a relação de mineralização dos resíduos deixados no campo mostraram uma baixa decomposição no período de um ano a outro, apresentado uma redução mássica ao redor de 20%, na maior parte devida à descarbonização do conteúdo celular e da hemicelulose. A taxa de mineralização do nitrogênio é da ordem de 18% e a maior taxa de liberação dos nutrientes verificada é do potássio, em torno de 85%. A cana-de-açúcar plantada extraiu somente 8% do nitrogênio mineralizado.

Com a adição de matéria orgânica ao solo, a ação dos microorganismos impacta a mineralização do nitro-

gênio ou a imobilização deste nutriente, que é absorvido pela camada microbiana. Ambos os processos ocorrem ao mesmo tempo, e a quantidade de nitrogênio do material em decomposição é o principal determinante do que prevalecerá.

Verifica-se que os resíduos deixados no campo com a relação de C/N superior a 20 propiciam a imobilização do nitrogênio, sendo prejudiciais ao desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar, especialmente no estágio da formação e do crescimento do colmo, quando quantidades elevadas de nitrogênio são requeridas.

■ 3.2.1.3. Resíduos agroindustriais – vinhaça e torta de filtro

A vinhaça, produzida numa relação média de 13 litros para cada litro do etanol, tem uma composição química que varia de acordo com a variedade da cana-de-açúcar e os diversos outros fatores do processo industrial, mas o potássio, na forma de K_2O , é o elemento mais significativo. No Brasil, a irrigação do campo com vinhaça é uma prática difundida e os estudos realizados a respeito desta prática apresentam resultados no sentido comum favorável, técnica e economicamente viável. A variação do índice de potássio em profundidades diferentes do solo em função da dose de vinhaça e o efeito no rendimento da cana-de-açúcar em áreas experimentais com e sem resíduos da colheita (palha) no solo não mostrou diferenças significativas.

A torta de filtro é um resíduo da produção do açúcar e do etanol produzido em uma média de 35 quilogramas por tonelada da cana-de-açúcar moída. Geralmente, é retornado ao campo e aplicado nos sulcos durante a operação de plantio ou espalhado no campo nas culturas em rebrota. A composição química da torta de filtro apresenta índices elevados de matéria orgânica e de diversos nutrientes tais como o nitrogênio, com relação C/N média de 37, o cálcio e, especialmente, o fósforo, na forma de P_2O_5 . Diversos estudos indicam ganhos na produção da cana-de-açúcar com esta prática, principalmente quando utilizado composto de torta de filtro, que apresenta relação C/N inferior 17.

Os resultados indicam um aumento no rendimento de, aproximadamente, 10% na produção de cana-de-açúcar devido à adição da torta de filtro, com redução da quantidade de fósforo adicionado como fertilizante. Os valores para o Pol % da cana-de-açúcar e o Pol por hectare foram também aumentados, sendo importante destacar que estes benefícios podem ser obtidos nas áreas com ou sem a palha residual sobre o solo.

■ 3.2.1.4. Propriedades físicas do solo

A intensificação das operações mecanizadas no campo, tais como para preparação do solo, plantio, colheita e o transporte das culturas causa significativas mudanças nas propriedades físicas do solo, tais como a densidade, a estrutura, a porosidade, a infiltração e o acúmulo de água. Poucos estudos buscaram quantificar estes efeitos, e para os campos da cultura da cana-de-açúcar CONDE, PENATTI e BELLINASSO (2005) citam CHEONG *et al.* (1999) ⁵, que concluem não haver nenhuma diferença na infiltração da água no solo nas áreas inteiramente ou parcialmente mecanizadas, sendo que em ambos os casos a infiltração é seis vezes menor do que nas áreas colhidas à mão ou sem nenhum tráfego, e também citam GAWANDER *et al.* (1999) ⁶, cuja conclusão é de que as mudanças nas propriedades físicas do solo devido às variadas técnicas de gerenciamento do campo estão relacionadas diretamente à quantidade de matéria orgânica incorporada ao solo.

5 CHEONG, L. R. N. et al., Soil compaction due to mechanized harvesting and loading. In: ISSCT, 33, New Delhi, Índia, 1999. p.43-50.

6 GAWANDER, J. S. et al., Long term study of changes in the properties of a fijian oxisol following sugar cane cultivation. ISSCT, 33, New Delhi, Índia, 1999. p.61-69.

Em seu estudo, CONDE, PENATTI e BELLINASSO (2005), indicam que a taxa de infiltração do solo é suficiente para absorver a água da chuva, sendo verificadas as seguintes condições:

1º) Infiltração estabilizada após seis horas:

- Nas fileiras de cana-de-açúcar dos campos colhidos com queima variou entre 78 mm/h a 160 mm/h, com uma média de 103 mm/h;
- Nas fileiras de cana-de-açúcar dos campos colhidos sem queima variou entre 142 mm/h a 1.094 mm/h, com uma média de 356 mm/h;
- Entre as fileiras de cana-de-açúcar dos campos colhidos com queima variou entre 47 mm/h a 236 mm/h, com uma média de 131 mm/h;
- Entre as fileiras de cana-de-açúcar dos campos colhidos sem queima variou entre 18 mm/h a 74 mm/h, com uma média de 41 mm/h;

2º) Taxa de infiltração acumulada em seis horas:

- Nas fileiras de cana-de-açúcar dos campos colhidos com queima variou entre 463 milímetros e 1.314 milímetros, com uma média de 742 milímetros;
- Nas fileiras de cana-de-açúcar dos campos colhidos sem queima variou entre 1.021 milímetros e 3.818 milímetros, com uma média de 2.126 milímetros;
- Entre as fileiras de cana-de-açúcar dos campos colhidos com queima variou entre 309 milímetros e 1.811 milímetros, com uma média de 985 milímetros;
- Entre as fileiras de cana-de-açúcar dos campos colhidos sem queima variou entre 158 milímetros e 444 milímetros, com uma média de 296 milímetros.

Os resultados mostram que a taxa de infiltração da água no solo apresenta resultados expressivamente positivos com a colheita sem queima prévia com a manutenção da palha no campo. A reduzida taxa de infiltração entre as fileiras, comparada à das fileiras de cana-de-açúcar é causada pelo tráfego intenso durante colheita e transporte. As mudanças nas propriedades físicas do solo reduzem a infiltração da água no solo, na fileira e entre as fileiras, que implicará em uma redução provável no rendimento. A adoção da prática de colheita sem queima prévias com manutenção parcial ou total da palha no campo, pode mitigar o efeito da mecanização, aumentando as taxas de infiltração da água quando comparado às áreas queimadas.

■ 3.2.1.5. Ambiente biológico – animal e vegetal

A cana-de-açúcar é atacada por um grande número espécie de insetos que, dependendo da época do ano e da região, pode causar sérios danos econômicos à produção. Ao mesmo tempo, a cultura da cana-de-açúcar pode abrigar um grande número artrópodes e de microorganismos que têm um papel importante no controle biológico de pragas de insetos ou ajudam na decomposição das substâncias orgânicas no solo.

As alterações no ambiente, em função do sistema de colheita da cana-de-açúcar influenciarão o desenvolvimento das populações de pragas e de seus inimigos naturais. Nos diferentes sistemas usados atualmente, quais sejam, a colheita mecanizada sem queima prévia, a colheita mecanizada com queima e a colheita com queima, torna-se necessário avaliar as populações e os danos causados pelas pragas nas áreas com mudanças no sistema de colheita comparando parâmetros entomológicos.

Entre as alterações que ocorrem nas áreas onde a cana-de-açúcar é colhida sem queimar, devem ser avaliadas também a interferência em populações de pragas e a necessidade do incremento no uso dos inseticidas para seu controle.

Buscando avaliar o impacto da palha deixada no campo sobre as populações de insetos, ARRIGONI e ALMEIDA (2005) verificaram que não há nenhuma interferência do sistema de colheita da cana-de-açúcar sobre:

- Populações de chrysomelidae (coleópteros), de Elateridae (coleópteros), de Cydnidae (Hemiptera), e de populações de Noctuidae (Lepidoptera);

- As populações dos principais predadores de artrópodes;

- População e danos causados por *Diatraea Saccharalis* (Lepidoptera; Crambidae);

- Parasitismo de *Cotesia Flavipes* (Himenópteros; Braconidae) em larvas de *Diatraea Saccharalis*.

Por outro lado, a colheita da cana-de-açúcar sem queima favorece:

- O estabelecimento de populações de insetos da espécie *Mahanarva Fimbriolata* (Hemiptera; Cercopidae) e um aumento na probabilidade de perdas econômicas nas áreas onde este sistema é adotado;

- Um aumento na presença de cupins, não significando que sejam responsáveis por maiores porcentagens de danos nas bases da planta, uma vez que muitas espécies são somente decompositores de material celulósico depositado na superfície do solo;

- Uma diminuição nas populações e nos danos causados pelo *Elasmopalpus lignosellus* (Lepidoptera; Pyralidae).

Considerando as mudanças que ocorrem nas áreas onde a cana-de-açúcar é colhida sem queimar relativas à interferência em populações de pragas e a necessidade de aumentar o uso dos inseticidas para seu controle, os resultados obtidos sobre cada inseto permitem as seguintes conclusões:

- As populações de insetos da espécie *Mahanarva fimbriolata* encontrarão condições favoráveis de desenvolvimento nestas áreas, exigindo medidas de controle. Os métodos de controle biológicos devem ser enfatizados mas o controle químico será necessário em muitas situações.

- O controle de outras pragas, tais como o perfurador de colmos, os *Diatraea saccharalis*, o perfurador de raiz, o *Migdolus fryanus*, as formigas que cortam as folhas, dos gêneros *Atta* e *Acromyrmex*, as lagartas e a maioria das espécies de cupins não sofrerá mudanças significativas, não devendo ocorrer aumento no uso ou introdução de novos inseticidas;

- As populações dos *Sphenophorus levis* beneficiar-se-ão da cobertura vegetal proporcionada pela palha, que reduzirá a eficácia de algumas das medidas de controle usadas atualmente, o que acarretará um aumento no uso dos inseticidas para seu controle;

- As populações de *Elasmopalpus lignosellus*, o menos importantes entre os perfuradores do colmo do milho, apresentarão uma redução significativa nestas áreas e uma diminuição no uso de inseticida.

Em termos de controle da infestação por ervas daninhas, obteve-se eficiência com quantidades de palha deixadas no campo 7,5 t_{Bbs}/ha e 9,0 t_{Bbs}/ha, distribuída uniformemente no solo, sem nenhuma outra influência externa ao sistema agrônomo. Os resultados das experiências mostraram que uma quantidade de palha uniformemente distribuída sobre o solo acima de 7,5 t_{Bbs}/ha, equivalente em alguns casos a 66% do total produzido, controlou ervas daninhas com eficiências superiores 90%, que é igual ou maior do que a eficiência obtida com uso bem sucedido dos herbicidas. Há exceções a essa eficiência, em alguns casos, devido às

razões como: seca, infestação com ervas daninhas que não são controladas adequadamente pela palha, ação de insetos ou larva, entre outras.

■ 3.2.1.6. Balanço geral de vantagens e desvantagens

A eliminação da queima do canavial antes da colheita e a formação de uma cobertura vegetal do solo com a palha residual podem trazer benefícios ao sistema de produção de cana-de-açúcar e ao ambiente. Os efeitos benéficos principais e suas conseqüências são:

1. Proteção do solo contra a erosão causada pela chuva e pelo vento, com conseqüente redução do nível de poeira no ar, eliminação do assoreamento, poluição e contaminação de corpos da água com herbicidas, adaptação das práticas conservacionistas do solo que são simples, econômicas e eficazes; introdução de sistemas de mínimo preparo do solo;

2. Evita a incidência direta dos raios solares na superfície da terra, evitando a deterioração da matéria orgânica por fotodecomposição, aumentando as temperaturas da superfície e reduzindo as perdas de água por evaporação;

3. Fornece matéria orgânica e nutrientes para o solo e plantas após a decomposição da matéria vegetal, reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos e de corretores do solo, reduzindo os custos de produção da cana-de-açúcar e aumentando a atividade dos colóides em solos degradados;

4. Reduz o fluxo de água na superfície do solo;

5. Promove o aumento da atividade biológica na camada superior do solo, favorecendo atividade dos insetos, larvas e minhocas, abrindo túneis e incorporando a matéria vegetal, dos fungos que decompõem as raízes velhas e melhoram a infiltração da água e a aeração do solo, e a reintrodução dos insetos e fungos que são predadores naturais de pragas;

6. Controle das ervas daninhas, conseqüentemente reduzindo ou mesmo eliminando o uso dos herbicidas, diminuindo custos de produção, reduzindo a poluição causada por estes produtos químicos e os riscos à saúde dos trabalhadores;

7. Redução das perdas da sacarose devido à rebrotamento da planta da cana-de-açúcar após a queima;

8. Redução das emissões de fumaça, fuligem e de gases na atmosfera, com a conseqüente diminuição dos impactos no ambiente, a atenuação das manifestações da sociedade contra o setor e adequação da atividade às determinações legais.

Entre os problemas e desvantagens da eliminação da queima do canavial antes da colheita e a formação de uma cobertura vegetal do solo com a palha residual, os seguintes merecem ser mencionados:

1. Aumento dos riscos de incêndios durante e após a colheita, com danos aos equipamentos em uso nas operações de campo, aos brotos no período de germinação, e trazendo perigo aos trabalhadores de campo;

2. Aumento da dificuldade em algumas operações agrícolas, encarecendo-as devido à massa matéria vegetal no campo;

3. Redução da produtividade da colheita manual e aumento dos riscos de acidentes com trabalhadores, devido aos ataques de répteis e insetos e a transmissão do vírus de roedores e dos outros animais;

4. Incorporação de parte dos resíduos no transporte da cana-de-açúcar à usina, acarretando perda na qualidade do material cru, perda na capacidade da carga dos caminhões e dos carregadores, dificuldades no processamento industrial do colmo;

5. Aumento na dificuldade de germinação de algumas variedades de cana-de-açúcar que podem afetar o rendimento final;

6. Redução da evaporação do excesso de água nos solos com problemas de drenagem, resultando em impedimento ou retardo nas operações com o maquinário e o equipamento mecânico, atraso da germinação e do desenvolvimento dos brotos sob condições da temperatura baixa e de umidade elevada do solo, e danificando os sistemas radiculares das plantas que permanecem por longos períodos de tempo nos solos com índice elevado de umidade;

7. Aumento da atividade biológica na superfície do solo e na cobertura vegetal formada pela palha, favorecendo o crescimento das pragas e a disseminação das doenças na cultura.

■ 3.3. Recuperação da palha na cultura da cana-de-açúcar

O potencial de recuperação da palha da cana-de-açúcar é determinado por uma série de fatores agronômicos e industriais, que foram estudados por HASSUANI, LEAL e MACEDO (2005), que podemos destacar como o mais atual e detalhado trabalho realizado sobre o tema, cujas conclusões do capítulo 12, de RODRIGUES FILHO (2005), serão aqui reproduzidas através dos resultados estimados para o custo de cada uma das três rotas de recuperação da palha avaliadas, nas quais se supõem que diferentes quantidades desta biomassa serão recuperadas, transportadas e disponibilizadas nas usinas, seja para aplicação como combustível ou matéria-prima. As três alternativas de rotas para recuperação da palha cana-de-açúcar podem ser sumariamente descritas como:

- Alternativa 1: a palha é enfardada no campo após a colheita mecanizada sem queima e transportada à usina, onde é dilacerada;
- Alternativa 2: a colheita mecanizada se realiza no campo sem queima, com o equipamento operando com os ventiladores de limpeza, primário e secundário, desligados e a palha é carregada e transportada à usina juntamente com os colmos da cana-de-açúcar onde se realiza um processo da separação da palha/colmo em uma estação de limpeza a seco;
- Alternativa 3: a colheita mecanizada se realiza no campo sem queima, com o equipamento operando com o ventilador de limpeza secundário desligado e o primário ajustado a uma rotação conveniente, resultando uma limpeza parcial, deixando uma cobertura delgada de palha sobre o solo, e o restante da palha é carregada e transportada à usina juntamente com os colmos da cana-de-açúcar onde se realiza um processo da separação da palha/colmo em uma estação de limpeza a seco.

As diversas rotas para colheita da cana-de-açúcar com recuperação da palha resultam em diferentes quantidades desta biomassa recuperada, diferentes perdas na cultura da cana-de-açúcar e no teor de sacarose dos colmos e diferenças no desempenho dos equipamentos, tendo que se examinar tais efeitos na análise econômica.

Figura 9 – Colheita mecanizada da cana-de-açúcar



O custo da palha recuperada, que não resulta de um processo de produção específico, apresenta valores diferentes em função da tecnologia requerida para se sair da condição padrão considerada, denominada linha de base, e atingir a alternativa que está sendo avaliada, conseqüentemente, há uma variação grande de custos devido às particularidades de cada caso.

O modelo econômico usado foi estruturado para considerar estas diferenças, em função das tecnologias usadas, das quantidades de palha retirada e deixada no campo e seus efeitos sobre a cultura da cana-de-açúcar e o desempenho industrial das usinas.

O critério de quantificação de custos utilizado consiste em determinar a margem de contribuição da cana-de-açúcar perdida, que é representado, neste caso, pela diferença entre a renda que a usina não auferiu devido às perdas na cana-de-açúcar e os custos variáveis específicos que não foram incorridos devido à mesma razão. Nas alternativas avaliadas, é considerada a margem de contribuição incremental com respeito à situação tecnológica padrão, representada pela linha de base, e todos os valores incrementais determinados consideram a biomassa adicional colocada na usina.

Apesar de a colheita manual da cana-de-açúcar com queima prévia ainda ser largamente empregada no Brasil, as condições de referência adotadas para a comparação, a linha de base, referem-se à colheita mecanizada realizada na cultura sem queima, com limpeza normal da cana-de-açúcar realizada pela colheitadeira, através da operação contínua dos ventiladores de limpeza primário e secundário, e toda a palha restando sobre o solo. Em ambas as rotas, a única biomassa disponível na usina é o bagaço, resíduo do processo da extração do caldo da cana.

O modelo econômico adotado procurou determinar o custo da palha depositada na usina examinando os diversos níveis de detalhamento dos fatores que, de algum modo, interferem na operação agrícola e industrial normal, especialmente aquelas relacionadas às perdas de sacarose, no desempenho do equipamento e na eficiência do processo, considerando todos os efeitos econômicos causados pela produção, recuperação e entrega da biomassa à usina. Os efeitos econômicos, positivos ou negativos, foram quantificados em cada uma das rotas, tais como:

a) Custos das operações de enfardamento, transporte, processamento, impactos agrônômicos, uso do herbicidas, diferenças de produtividade da cana-de-açúcar, efeitos de compactação do solo, entre outros associados à palha;

b) Mudanças nas atividades a serem executadas para a preparação do solo, plantio e o manejo do solo, pela simples eliminação de uma atividade ou pela diferença no desempenho do equipamento ao executar as atividades;

c) Redução da capacidade de moagem da usina devido ao aumento de fibras na matéria processada, como resultado da palha arrastada pelos colmos para os extratores;

d) Diminuição da eficiência na extração do caldo de cana devido ao carregamento de açúcar por esta fibra adicional das impurezas vegetais moídas com os colmos, diferenças nas taxas de moagem e perdas de Pol;

e) Diferença nas capacidades de operação dos equipamentos de acordo com as quantidades de palha no processo;

f) Efeitos agrônômicos positivos e negativos, devido à cobertura vegetal sobre o solo no campo e a influência decorrente da introdução de novas atividades sobre a germinação e rebrota da cultura.

Em todas as alternativas, considerou-se que o transporte obedece às limitações de carregamento determinados por leis federais e estaduais e, nos casos em que os caminhões trafegam, principalmente, em estradas internas ou laterais, a carga do caminhão seria aumentada, resultando em um aumento de custos para as alternativas 2 e 3.

Tabela 5 – Balanço de massa da palha da cana-de-açúcar
Produção e proporção do total transportada e mantida no campo

Quantidades de palha	Caso padrão	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Produzida no campo (t_{Bbs}/ano) ⁽¹⁾	180.697	180.697	180.697	180.697
Transportada com os colmos	24,3%	24,3%	94,5%	70,8%
Depositada sobre o solo após a colheita	75,7%	75,7%	5,5%	29,2%
Enfardada	-	63,6%	-	-
Remanescente no campo	75,7%	12,1%	5,5%	29,2%
Total entregue à usina	t_{Bbs}/ano	114.902	119.531	89.554
	%	63,6%	66,1%	49,6%

Notas: (1) Equivalente a 139 quilogramas de palha em base seca por tonelada de colmos de cana-de-açúcar produzida (139 kgBbs/tCana).

Fonte: adaptado de RODRIGUES FILHO, 2005.

Um sumário dos resultados para as alternativas avaliadas é apresentado na Tabela 5, onde são apresentados balanço de massa da palha em todo o processo de produção da cana-de-açúcar e a proporção do total transportada e mantida no campo.

Tabela 6 – Custo da palha da cana-de-açúcar
Impactos por fase do processo de produção e processamento da cultura da cana-de-açúcar
Dólares por tonelada de biomassa em base seca ($US\$/t_{Bbs}$)

Impacto por fases do processo	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Transporte e entrega da palha na usina	9,61	23,23	2,74
Perdas de produtividade	2,41	-	-
Custo de oportunidade da palha no campo	5,59	5,37	6,50
Separação da palha dos colmos na usina	-	2,79	3,69
Processamento da palha	0,89	0,85	1,14
Diferença nos resultados industriais	-	-1,13	-0,37
Custo total de palha	18,49	31,12	13,70

Fonte: adaptado de RODRIGUES FILHO, 2005.

O custo total da palha da cana-de-açúcar, determinado sob as circunstâncias descritas detalhadamente na referência e sumarizadas neste item do relatório, considerando todas as fases dos processos da produção e processamento da cana-de-açúcar, é mostrado na Tabela 6, onde se destaca que o custo total inclui, de forma conservadora, uma margem de 10% atribuída a custos de administração.

Verifica-se na Tabela 6, que a alternativa 3 é a opção que apresenta resultados economicamente mais otimizados. A razão principal para sua introdução, que não foi alcançada, foi a tentativa de recuperar parte da palha e ainda manter no campo uma cobertura vegetal capaz de proporcionar o efeito herbicida de elevada contribuição. Entretanto, a densidade média de 5,36 t_{Bbs}/ha da cobertura vegetal alcançada nestas condições operacionais não é suficiente para proporcionar tal efeito.

Nesta condição, em que 30 % da palha permanece no campo, verifica-se pelos resultados apresentados no item 3.2.1 Manutenção da palha no campo - impactos positivos e negativos, que esta é uma proporção compatível com as restrições e necessidades de produtividade agrícola e industrial do setor.

■ 3.4. Estimativas do custo referencial do bagaço

O sistema agroindustrial da cana-de-açúcar é um dos mais antigos, está ligado a eventos históricos, e é de enorme importância ao Brasil, que é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, e isoladamente o maior produtor de açúcar e de álcool e o maior exportador mundial de açúcar.

A partir dos anos 70, passou por importante transformação, deixando de ser exclusivamente voltado para o setor de alimentos, para destinar-se ao setor energético, através do Proálcool. Este fomentou o destino da cana para produção de combustível, tendo efeito positivo no aumento da competitividade do sistema como um todo.

As escalas de produção e moagem de cana cresceram, assim como ganhos importantes em produtividade foram atingidos. Na produção de cana-de-açúcar, basicamente, dois subsistemas regionais convivem no Brasil, um no Centro/Sul (C/S) e outro no Norte/Nordeste (N/NE), sendo o primeiro mais competitivo e dinâmico que o segundo. Ambos, no entanto, são citados como os dois primeiros em competitividade no mundo.

Bons produtores especializados no Brasil chegam a produzir mais de 100 toneladas de cana por hectare, marca que dificilmente é atingida em outros lugares do mundo, com custo total de produção ao redor de R\$ 17/tonelada.

O estudo de WAACK *et al.* (1998) mostra que a média de custo total da produção de cana de açúcar na região Centro/Sul é de R\$ 18,76/t, enquanto na região Norte/Nordeste (N/NE) é de R\$ 28,64/t, sendo a parcela correspondente ao transporte, respectivamente, R\$ 3,88/t e R\$ 3,63/t.

Os dados apresentados pela Associação Profissional da Indústria da Fabricação de Álcool, Açúcar, Similares e Conexos (UDOP, 2006) para valores de cana-de-açúcar praticados na região oeste do estado de São Paulo durante a safra indicam a compatibilidade histórica destes números e também o reflexo recente da crescente demanda mundial por açúcar e etanol, como pode ser visto na Tabela 7. Para os preços de julho de 2006, a diferença do preço da cana no campo e o preço da cana ns esteira é de R\$ 4,94/t, que reflete uma elevação do custo do transporte bastante inferior à elevação do preço da cana.

Tabela 7 – Valores de preços médios da cana no campo praticados por safra

Ano safra	Preço da cana-de-açúcar (R\$/ton)
2006/2007	42,0
2005/2006	28,3
2005/2004	24,9
2004/2003	24,1
2003/2002	21,9
2002/2001	21,7
2001/2000	19,1

Fonte: UDOP, 2006.

A FNP Consultoria & Comércio Ltda informava, também para o ano de 2001, preço da tonelada de cana posta na esteira da usina de R\$ 22,98/ton, considerados custos de produção, não incluindo encargos financeiros sobre o custeio, nem sobre os investimentos. Deste valor, a parcela de transporte correspondia a R\$ 5,73/t.

Assim, considerando-se que a produção referencial de bagaço é de $280 \text{ kg}_{\text{Bagaço}}/\text{t}_{\text{Cana}}$ com 50 % de umidade, que representa, aproximadamente, 28 % da biomassa produzida e transportada. Portanto, inferimos um custo referencial desta biomassa considerando esta proporção dos custos de produção e transporte da cana-de-açúcar, como apresentado na Tabela 8.

Tabela 8 – Consolidação de custos de produção e transporte de biomassa do setor sucroalcooleiro no Brasil

Biomassa	Unidade comercial	Custos de produção	Custos de transporte	Custo total
Cana de açúcar	R\$/t	35,00	5,50	40,50
Bagaço de cana ⁽¹⁾	R\$/t	19,6	3,00	22,60
Palha ⁽¹⁾	R\$/t	-	6,30	31,50

Nota: (1) Calculado em base seca.

Fonte: Nota Técnica - Geração termelétrica a partir da biomassa: caracterização técnico-econômica

■ 3.5. Produção de etanol a partir da celulose

O etanol pode ser produzido a partir de qualquer matéria-prima biológica que contenha quantidades apreciáveis de açúcares ou materiais que possam ser convertidos em açúcares, como amidos ou celulose.

O etanol é geralmente produzido a partir da fermentação de açúcares por enzimas produzidas por leveduras. Os processos tradicionais de fermentação utilizam leveduras que convertem açúcares de seis carbonos (principalmente glicose) em etanol. Os microrganismos e enzimas para a conversão do amido e a fermentação de glicose em escala comercial são facilmente disponíveis. A celulose é geralmente convertida a açúcares de cinco e seis carbonos, o que requer microrganismos especiais para a fermentação completa.

A maior parte da matéria vegetal não consiste de açúcares ou amido, mas de celulose, hemicelulose e lignina. A parte verde das plantas é composta quase inteiramente dessas três substâncias. A celulose e a hemicelulose, porém não a lignina, podem ser convertidas em álcool através da conversão inicial destas em açúcares. O processo, entretanto, é mais complicado do que a conversão de amido em açúcares e, em seguida, em álcool.

Atualmente, praticamente não existe produção comercial de etanol a partir da biomassa celulósica, mas existe um volume substancial de pesquisas que vêm sendo realizadas nesta direção, inclusive no Brasil, tanto em laboratórios como em desenvolvimentos industriais. Existem diversos benefícios potenciais importantes

que podem ser obtidos do desenvolvimento de um processo viável e comercial da produção de etanol celulósico, entre os quais se destacam o acesso a uma quantidade muito maior de matérias-primas potenciais, onde se incluem resíduos de materiais celulósicos e culturas celulósicas dedicadas como árvores e gramíneas, abrindo oportunidade para níveis muito maiores de produção de etanol e a maior substituição de energia fóssil por litro de combustível.

Uma grande variedade de matérias-primas está disponível para a produção de etanol a partir de biomassa celulósica, considerando os resíduos agrícolas em geral, e os resultantes da produção convencional de etanol em particular, resíduos florestais, resíduos orgânicos domésticos, resíduos da indústria de polpa e papel e culturas dedicadas.

A composição celulósica destes materiais pode variar de 30 % a 70 %, e o restante é constituído de lignina, que não pode ser convertida em açúcares, mas pode ser usada como combustível no processo ou ser convertida em combustível líquido através de gaseificação e conversão de gás para líquido.

No Brasil, como apresentado na Nota Técnica Avaliação do potencial da biomassa como recurso energético, em termos de potencial de produção, os resíduos agrícolas e florestais representam uma ampla base de recursos para a produção de etanol e, a longo prazo, podem permitir um crescimento substancial da indústria de etanol. Na cultura da cana-de-açúcar, o bagaço, que é utilizado para fornecer energia ao processo produtivo de açúcar e etanol, constitui material celulósico potencialmente conversível em etanol.

Culturas celulósicas dedicadas podem representar uma alternativa interessante como fonte de matérias-primas, gramíneas e árvores podem ocupar áreas de terra que não poderiam ser utilizadas para a produção de outras culturas agrícolas e requerem menor quantidade de fertilizantes, além de fornecerem um habitat melhor para animais silvestres do que as culturas agrícolas.

■ 3.5.1 Conversão de celulose em etanol

Para a conversão de celulose em etanol, duas etapas fundamentais devem ocorrer. Primeiro, a celulose e a hemicelulose devem ser quebradas em açúcares através de um processo conhecido com sacarificação. Os açúcares produzidos, entretanto, são uma mistura complexa de açúcares de cinco e seis carbonos que constituem um desafio para a completa fermentação em etanol. Segundo, estes açúcares devem ser fermentados para produzir etanol, da mesma forma que ocorre no processo tradicional.

O primeiro passo é o principal desafio, e uma grande variedade de processos térmicos, químicos e biológicos estão sendo desenvolvidos para realizar esta etapa de sacarificação de maneira eficiente e economicamente viável.

A primeira etapa na conversão de biomassa em etanol é o pré-tratamento, que envolve a limpeza e “quebra” dos materiais. Uma combinação de processos físicos e químicos, a hidrólise ácida, por exemplo, é tipicamente utilizada, que permite a separação da biomassa em celulose, hemicelulose e lignina. Uma parte da hemicelulose pode ser convertida em açúcares nesta etapa, e a lignina é removida.

Em seguida, a celulose remanescente é hidrolisada em açúcares, na etapa principal de sacarificação. Os métodos comumente usados são a hidrólise ácida diluída e concentrada, que são dispendiosas e parecem ter alcançado o seu limite em termos de rendimento. Dessa forma, uma quantidade considerável de pesquisa está sendo conduzida no desenvolvimento de enzimas biológicas que possam quebrar a celulose e hemicelulose.

A primeira aplicação de enzimas para a hidrólise vegetal em um processo de produção de etanol foi reali-

zada para substituir a etapa de hidrólise ácida por uma etapa de hidrólise enzimática. Este processo é chamado de “hidrólise e fermentação separadas”.

Uma modificação importante feita para a hidrólise enzimática da biomassa foi a introdução da “sacarificação e fermentação simultâneas”, que foi recentemente melhorada para incluir a co-fermentação de substratos contendo diversos tipos de açúcares. Nesse processo, a celulose, enzimas e microrganismos são combinados, reduzindo o número de reatores necessários e aumentando a eficiência. Os açúcares, depois de produzidos por hidrólise enzimática, são convertidos em etanol pelos microrganismos (Sreenath *et al.*, 2001).

Finalmente, estão sendo estudadas vias para produzir todas as enzimas necessárias dentro do reator, utilizando a mesma “comunidade microbiana” para produzir tanto as enzimas que ajudam a quebrar a celulose em açúcares quanto fermentar os açúcares em etanol. Este “bioprocesso consolidado” é visto por muitos como o ponto final lógico na evolução da tecnologia de conversão de biomassa, com excelente potencial para melhorar a eficiência e reduzir os custos (HAMELINCK, HOOIJDONK e FAAIJ, 2003).

■ 3.5.2. Produtividade e eficiência segundo o processo e a matéria-prima

O uso de matérias-primas celulósicas para produzir etanol possui a potencial vantagem da utilização de partes da planta, principalmente lignina, como combustível para as caldeiras do sistema de fermentação. Isto torna o processo de produção relativamente eficiente sob o ponto de vista energético e resulta mais renovável, com minimização da energia fóssil utilizada para a conversão das matérias-primas.

Para as estimativas das reduções dos gases estufa, as considerações sobre a eficiência de uso final nos veículos e a quantidade de fertilizantes utilizada para a produção das matérias-primas tornam-se bastante importantes. Variações nessas considerações causam a maior parte das variações nas diferentes estimativas dos impactos sobre os gases estufa.

Tabela 9 – Estimativas de eficiência e redução nas emissões de gases estufa em diferentes trabalhos.

Referência ⁽¹⁾	Matéria-prima	Produtividade (litros de etanol/ton)	Eficiência energética do processo ⁽²⁾	Redução nas emissões de gases estufa
			Energia produzida Energia consumida	
GM et al., 2002	Madeira (variedade <i>Populus</i>)	n/a	1,20	51%
GM/ANL, 2001	Madeira - a	288	1,30	n/a
GM/ANL, 2001	Madeira - b	371	1,90	n/a
Wang, 2001a	Madeira	288	1,52	107%
GM/ANL, 2001	Gramíneas - a	303	1,00	71%
GM/ANL, 2001	Gramíneas - b	390	1,60	66%
Wang, 2001a	Gramíneas	303	1,37	73%
Levelton, 2000b	Gramíneas	310	1,28	71%
GM et al., 2002	Resíduos agrícolas (palha)	n/a	n/a	82%
Levelton, 2000b	Resíduo de milho (palha e sabugo)	345	1,10	61%
Levelton, 2000b	Gramíneas	305	1,32	68%
Levelton, 2000b	Resíduos agrícolas (palha)	330	1,12	57%

Notas: (1) Onde uma faixa de estimativas foi apresentada por uma referência, “a” e “b” estão grafados na coluna das matérias-primas para indicação.

(2) A eficiência energética do processo inclui as fontes energéticas da biomassa e as demais.

Fonte: FULTON, HOWES e HARDY (2004), apud GM et al. (2002), GM/ANL et al. (2001), Wang (2001a) e Levelton (2000b).

Poucas unidades de produção em grande escala existem para a obtenção de estimativas mais empíricas ou para determinar se as eficiências assumidas se aplicam a grandes unidades. As melhorias na eficiência do processo de conversão celulósica ocorreram de forma mais lenta do que o projetado na última década, porém, é inquestionável que reduções de 70% ou maiores nas emissões de gases estufa podem ser obtidas.

■ 3.5.3. Estimativas econômicas da produção de etanol celulósico

A Tabela 10 apresenta as estimativas dos custos de capital e de produção de etanol celulósico a partir de madeira da silvicultura da variedade *Populus* nos Estados Unidos e Canadá. O estudo foi conduzido para a Agência Internacional de Energia e as estimativas são baseadas em estudos do Laboratório Nacional de Energia Renovável dos Estados Unidos em 1999 (FULTON, HOWES e HARDY (2004), apud IEA (2000a)).

Estas são estimativas projetadas para uma planta de grande escala com a melhor tecnologia disponível, usando as considerações de evolução tecnológica e reduções de custo nos próximos anos. Não existem plantas de produção em grande escala atualmente em operação, logo não existe certeza se, e quando, estes custos estimados poderão ser atingidos na prática. A primeira planta em grande escala está prevista para 2006⁷, mas não se sabe se esta planta irá atingir estes objetivos de redução de custo.

Os custos maiores para a produção de etanol celulósico se devem principalmente aos maiores custos de recuperação de capital, relativos ao custo da planta de conversão, e aos custos de operação relativamente maiores. O custo da matéria-prima celulósica é baixo se comparado com o das outras matérias-primas para a produção de etanol.

Tabela 10 – Custos de capital e de produção de etanol celulósico

	Curto prazo (média)	Curto prazo (melhor)	Após 2010
Custo de recuperação de capital	0,177	0,139	0,073
Capacidade de processamento (ton/dia)	2.000	2.000	200
Rendimento (l/ton)	283	316	466
Produção (10 ⁶ l/ano)	198	221	326
Custo de capital total (10 ⁶ US\$)	234	205	159
Custo de operação	0,182	0,152	0,112
Matéria-prima	0,097	0,087	0,059
Crédito de subprodutos	- 0,019	- 0,029	0,000
Produtos químicos	0,049	0,049	0,028
Mão-de-obra	0,013	0,011	0,008
Manutenção	0,024	0,019	0,010
Seguro e taxas	0,018	0,015	0,007
Custo total por litro (US\$/l)	0,36	0,29	0,19
Custo total por litro equivalente de gasolina	0,53	0,43	0,27

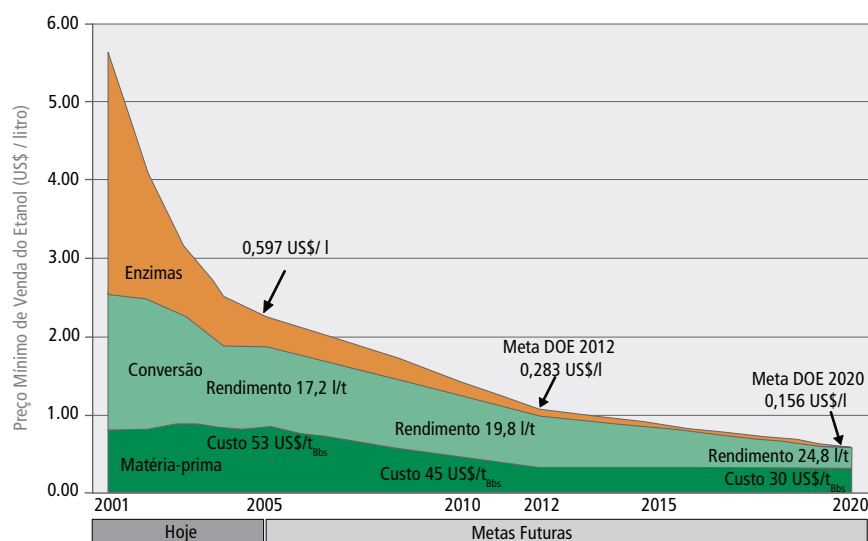
Fonte: FULTON, HOWES e HARDY (2004), apud IEA (2000a).

7 EESI, 2003. Ethanol Climate Protection Oil Reduction: A Public Forum.

A Figura 10 mostra a previsão da evolução dos custos de produção de etanol celulósico utilizando a hidrólise enzimática até 2020 feita pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Os custos estão divididos entre matéria-prima, conversão e enzimas. Projeta-se uma redução expressiva dos custos com esses três componentes, resultando em um preço mínimo de venda de US\$ 0,597/l de etanol em 2005, US\$ 0,283/l em 2012 e US\$ 0,156/l em 2020. Pode-se verificar que essas projeções de custos são significativamente mais conservadoras do que os valores projetados no estudo da IEA.

Na projeção do Departamento de energia, o custo da matéria-prima é reduzido de US\$ 53/ton em 2005 para US\$ 45/ton em 2012 e US\$ 30/ton em 2020. O rendimento da conversão aumenta substancialmente, de 246 l/ton em 2005 para 284 l/ton em 2012 e 356 l/ton em 2020. Novamente, os valores dos custos de matérias-primas e rendimento do processo de conversão são mais conservadoras do que os previstos no estudo da IEA.

Figura 10 – Projeções dos custos do etanol celulósico



Fonte: USDOE (2006)

■ 3.5.4. Condições de penetração da tecnologia de etanol celulósico no Brasil

Como destacado por MACEDO e NOGUEIRA (2005), a eventual competição da sacarose da cana-de-açúcar com açúcares derivados de material lignocelulósico, tais como resíduos de produção agrícola, plantações para energia ou resíduos da produção e uso da madeira, para produção de etanol poderá ocorrer, mas aparentemente não nos próximos anos, e poderá ser transformada em excelente oportunidade para o setor sucroalcooleiro no Brasil, a depender dos esforços empregados para o desenvolvimento e domínio desta tecnologia, além de sua integração na cadeia produtiva existente.

Em todo o mundo, há um grande interesse na utilização dos resíduos celulósicos para a produção de etanol e diversas rotas ácidas e enzimáticas estão sendo testadas, sempre em busca de processos eficientes para converter a celulose e a hemicelulose dos resíduos, respectivamente, em hexoses e pentoses fermentáveis. Nos últimos anos, o interesse tem acelerado a pesquisa e desenvolvimento da sacarificação e da fermentação desses das matérias-primas lignocelulósicas, que têm entre 30 % e 50 % de celulose, 20 % e 30% de hemicelulose.

lulose e 20 % e 25 % de lignina. Para obter os açúcares da celulose, principalmente a glucose, e da hemicelulose, principalmente a xilose, é preciso um pré-tratamento do material que remova a lignina, seguido de uma hidrólise, que quebra as ligações nos polímeros, liberando os monômeros (glucose, xilose, etc).

Como pode ser deduzido das dimensões explicitadas na Figura 10, os fatores importantes na determinação dos custos de produção do etanol via tecnologias de hidrólise da celulose são:

- (A) Custo da biomassa;
- (B) Custo do processamento e conversão, com destaque para:
 - Custo das enzimas;
 - Relação direta entre taxas de conversão e o custo de processamento.

Ainda, citando MACEDO e NOGUEIRA (2005)⁸: “os resultados “esperados” supõem um avanço tecnológico extremamente ambicioso, principalmente na área biológica, com a redução do custo de enzimas, cujos resultados recentes foram excelentes, e desenvolvimento de microorganismos “estáveis” para a complexa fermentação simultânea, e podem exigir mais tempo que o projetado”. Considerando um processo composto por:

- Pré-hidrólise com ácido diluído, sacarificação enzimática e fermentação simultâneas;
- Produção local da enzima (celulase);
- Queima da lignina para energia;
- Planta para 200 mil m³ de etanol/ano;
- Investimento de US\$ 234 milhões (1.180 US\$/m³).

Os resultados do custo de produção de etanol em torno de 0,60 US\$/litro se verificam na atualidade, e os resultados expressivos resultados esperados para 2012 devem reduzir o custo para 0,28 US\$/litro, chegando a 0,16 US\$/litro pós 2020.

Entre os avanços previstos está o desenvolvimento na produção de enzimas e de microorganismos para a fermentação simultânea de glucose e xilose, estáveis e operando a 50°C, e a queda significativa também nos custos de produção da biomassa. Destaca-se as reduções de custos de biomassa projetadas para o Hemisfério Norte que só poderão ser alcançadas, por longos períodos contínuos, em situações especiais, com volumes limitados e utilizando, por exemplo, resíduos da colheita, ou com consideráveis avanços tecnológicos.

No que diz respeito à oferta de matéria-prima celulósica, o bagaço de cana-de-açúcar tem um papel natural, e seu emprego para este fim pode ser compensado com a recuperação da palha do campo para atendimento das necessidades energéticas de toda a unidade de processamento, permitindo a formação de um mix de uso de bagaço e palha para geração de energia.

Verifica-se que, em termos de custo da matéria-prima para etanol celulósico, a produção de biomassa no setor sucroalcooleiro apresenta condições muito competitivas aos custos internacionais, mesmo os estimados para o horizonte de 2020, conforme visto na Figura 10 do item 3.5. A palha cana-de-açúcar, conforme apresentado na Tabela 6 do item 3.3 pode chegar à usina em torno dos 13,70 US\$/t_{Bbs}, e o custo econômico do bagaço estimado apresentado na Tabela 8 do item 3.4 gira em torno de 22,60 R\$/t_{Bbs}, ou 9,85 US\$/t_{Bbs}⁹. Como visto na Figura 10, as projeções do USD OE (2006) apontam para custos da biomassa nos EUA se estabelecendo em torno dos 30,00 US\$/t_{Bbs} a 35,00 US\$/t_{Bbs} em 2020.

⁸ Grifo da fonte.

⁹ Calculada pela taxa de câmbio de 2,30 R\$/US\$.

No Brasil, há uma tecnologia em desenvolvimento cujo processo é uma variante dos processos que utilizam solvente orgânico. Atualmente, obtém-se cerca de 100 litros de etanol por tonelada de bagaço hidrolisado, esperando-se atingir uma produtividade 80% superior com o aperfeiçoamento da tecnologia. No estágio atual, não se recupera para etanol os açúcares derivados de hemicelulose, mas as análises técnico-econômicas são animadoras, quando este processo é utilizado nas usinas em associação com o sistema convencional existente (MACEDO e NOGUEIRA, 2005).

Em 2001, MACEDO e NOGUEIRA (2005) quantificaram o custo de produção do etanol no Brasil na faixa de 0,42 R\$/l a 0,43 R\$/l, com custo da cana-de-açúcar da ordem de 23,00 R\$/t. Com a elevação dos custos da cana-de-açúcar verificados recentemente, recalculamos este valores e verificamos que chegam ao patamar de 55 R\$/l, o que equivale a 0,24 US\$/l¹⁰. Verificamos que mesmo no cenário otimista da produção de etanol celulósico, o etanol derivado de sacarose do setor sucroalcooleiro brasileiro manteria sua competitividade, que deve ser ainda elevada, pois este valor é atual e não incorpora os ganhos de produtividade do setor até 2020.

Ainda sobre o custo do etanol produzido a partir da sacarose da cana-de-açúcar no Brasil, é importante destacar que por questões históricas, tradicionalmente a quantificação de custo trata a cana-de-açúcar entregue na usina como um produto único, o que significa que o custo do bagaço é, teoricamente, nulo, embora tenhamos condições de estimar seu custo econômico, como apresentado no item 3.4. Isto significa que esta parcela de matéria-prima para o etanol celulósico saia a custo zero ou que o custo do etanol da sacarose é inferior ao tradicionalmente quantificado.

Assim, entre pontos fundamentais para a penetração da tecnologia de etanol celulósico no setor sucroalcooleiro brasileiro destacam-se, entre outras:

I. Desenvolvimento industrial e domínio da tecnologia, particularmente do desenvolvimento dos processos enzimáticos, que por sua vez decorrem do domínio científico e industrial do processo bioquímico da reação e da produção das enzimas;

II. As condições mundiais de comercialização do etanol, não por questões de competitividade, mas devido às potenciais barreira de acesso aos mercados;

III. Custo final e competitividade do mix de etanol produzido pelas unidades de processamento;

IV. Composição e integração das unidades de negócio de produção de açúcar, etanol e energia elétrica, pela complementaridade entre a contratação firme por longo prazo da energia elétrica do setor sucroalcooleiro e as volatilidades do mercado interno e externo das commodities.

■ 3.6. Desenvolvimento tecnológico do setor sucroalcooleiro

A penetração das novas tecnologias de processamento da cana-de-açúcar nas unidades industriais, seja para a produção de açúcar ou etanol, e de geração termelétrica do setor sucroalcooleiro, impactam de forma significativa o potencial de exportação de energia elétrica destas unidades para o sistema elétrico, pois há uma associação íntima entre o processo produtivo e o sistema de autoprodução de energia, ainda que não sejam completamente dependentes, fundamentalmente porque toda a energia consumida no sistema produtivo, seja térmica, mecânica ou elétrica, resulta em menos energia excedente para geração de energia elétrica para exportação.

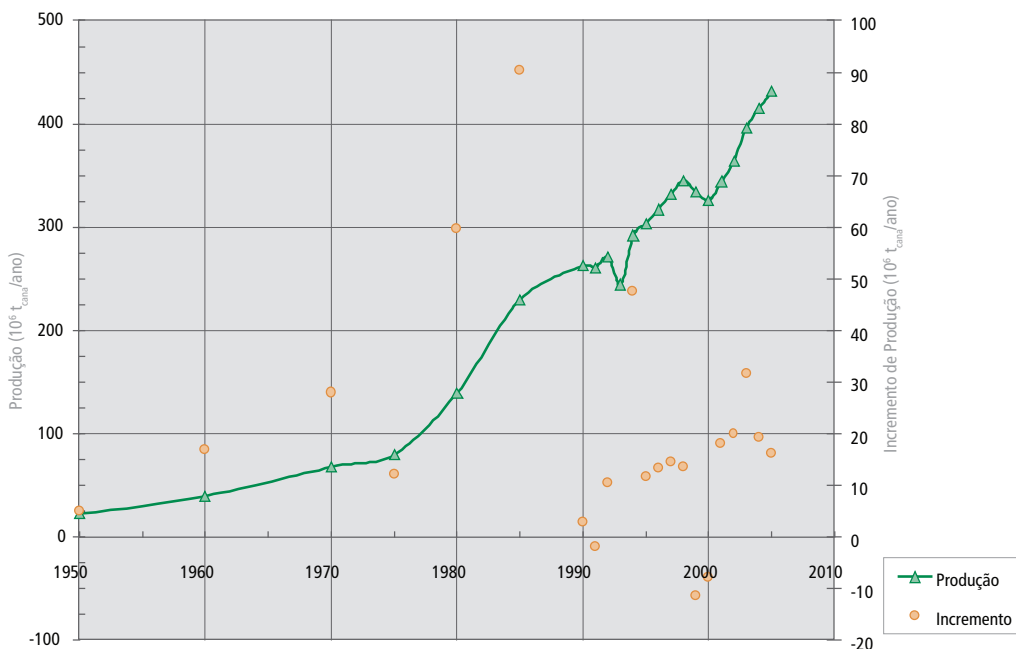
¹⁰ Calculada pela taxa de câmbio de 2,30 R\$/US\$.

Os crescimentos na produção de cana-de-açúcar, de açúcar e de etanol no horizonte do estudo são muito significativos em termos absolutos, e promoverão uma quebra estrutural no paradigma tecnológico do setor. Em primeiro lugar, porque o bagaço da cana-de-açúcar deixou de ser um resíduo a ser eliminado e passou a ser tratado como um produto residual a ter seu custo de oportunidade maximizado, sendo uma das formas viáveis desta valorização a sua aplicação como combustível para geração de energia elétrica comercializável. Em segundo lugar, destaca-se a evolução tecnológica do sistema produtivo de açúcar e etanol, que confere ao Brasil posição competitiva de destaque no momento, mas frente à movimentação mundial para a expansão da produção de etanol através de diferentes rotas tecnológicas, manter o atual patamar de competitividade dependerá de esforços contínuos de otimização dos sistemas agrícola e industrial, tecnológica e gerencial.

■ 3.6.1. Expansão e renovação do parque industrial do setor sucroalcooleiro

O momento atual é particularmente importante, pois as expectativas do próprio setor apontam para a duplicação da capacidade de produção e processamento de cana-de-açúcar, passando dos atuais 430 milhões de toneladas por ano para, aproximadamente, 715 milhões de toneladas por ano, em 2015, um crescimento de 65 % em um período de 10 anos, sendo que o setor levou 25 anos para crescer este mesmo quantitativo, em valores absolutos, 285 milhões de toneladas por ano, como verificado na Figura 11. Se considerarmos os exercícios de projeção realizados na Nota Técnica Avaliação do Potencial da Biomassa como Recurso Energético, para o período até 2030, esta capacidade de produção e processamento deverá atingir 1,14 bilhões de toneladas por ano.

Figura 11 – Série histórica de produção anual e incremento anual da produção de cana-de-açúcar
Brasil – 1970 a 2005



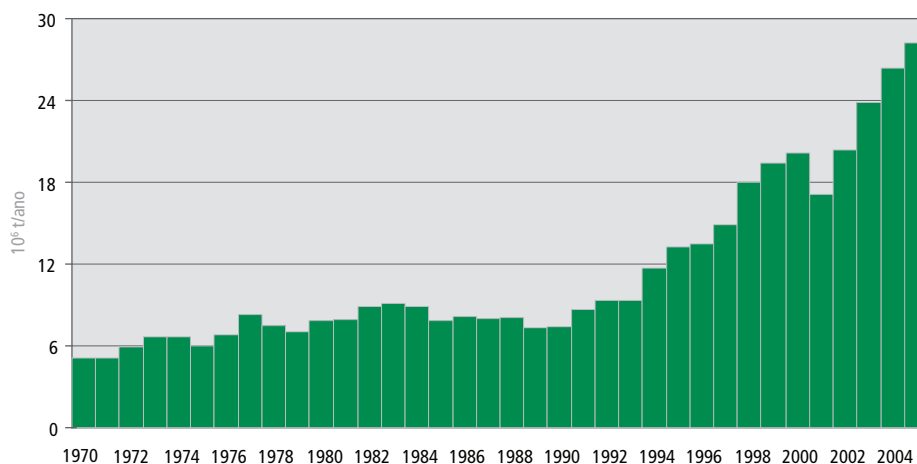
Fonte: SIDRA/IBGE – Produção Agrícola Municipal (2006), para os dados de 1950 a 2004
MAPA/AGE (2005), para os dados de 2005.

Em termos da capacidade industrial de produção de açúcar e etanol, as perspectivas até 2015 indicam uma expansão de 60 % e 125 %, respectivamente, e os exercícios de projeção para 2030 elevam estes valores a 135 % e 235 %. Tais crescimentos referem-se a produções de açúcar e etanol, respectivamente, em 2005: 28,2 milhões de toneladas e 16,2 milhões de m³; em 2015: 45,2 milhões de toneladas e 36,9 milhões de m³; em 2030: 66,9 milhões de toneladas e 54,2 milhões de m³.

Estes grandes degraus de expansão nas capacidades de produção, associado à própria necessidade de renovação das capacidades de processamento existentes, transformarão rapidamente o perfil tecnológico do setor. Para avaliar este impacto e, na falta de informações detalhadas sobre a evolução da capacidade instalada de processamento de açúcar e etanol, adotamos a série de produção anual para estimar a evolução da capacidade instalada, e consequentemente, poder conjecturar as taxas de renovação da capacidade de processamento de cana-de-açúcar.

Para o açúcar, vemos na Figura 12, que a capacidade instalada de produção atingiu o patamar de 8,3 milhões de toneladas por ano no início da década de 70 (1973), e só ultrapassando este valor no início dos anos 80, quando chegou a 9,1 milhões de toneladas por ano, e aí permaneceu até 1993. Portanto, quase 20 anos de estagnação na capacidade de produção. A partir de 1993, reverteu-se o quadro de estagnação e a capacidade de produção de açúcar cresceu até atingir os atuais 28,2 milhões de toneladas por ano, crescendo a uma taxa média de 9,7 % a.a.

Figura 12 – Série histórica de produção anual de açúcar
Brasil – 1970 a 2005

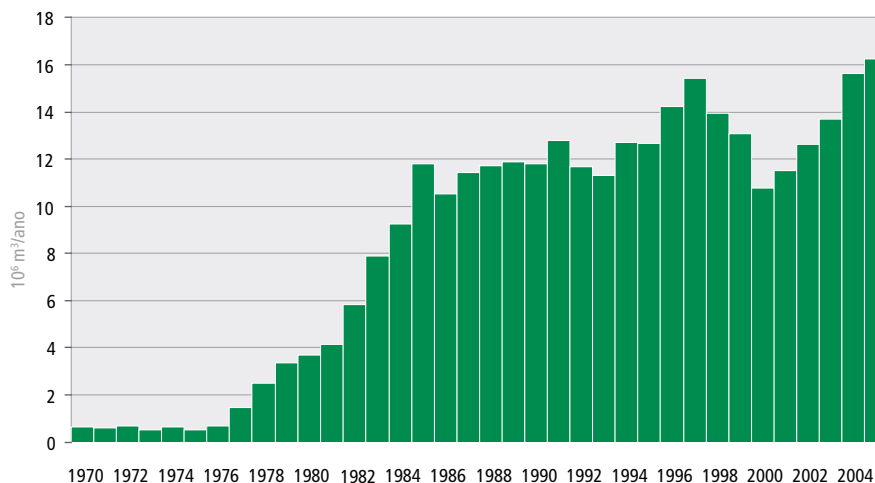


Fonte: MAPA/AGE (2005), para os dados de 2001 a 2005.

DATAGRO (2006), para os dados de 1970 a 2000.

Para o etanol, vemos na Figura 13, que a capacidade instalada de produção atingiu o patamar de 12 milhões de m³ por ano em meados da década de 80 (1985), e só ultrapassando este valor em meados dos anos 90 (1996), quando iniciou um período de expansão e a capacidade de produção de etanol cresceu até atingir os atuais 16 milhões de m³ por ano, crescendo a uma taxa média de 2,5 % a.a.

Figura 13 – Série histórica de produção anual de etanol
Brasil – 1970 a 2005



Fonte: MAPA/AGE (2005), para os dados de 2001 a 2005.

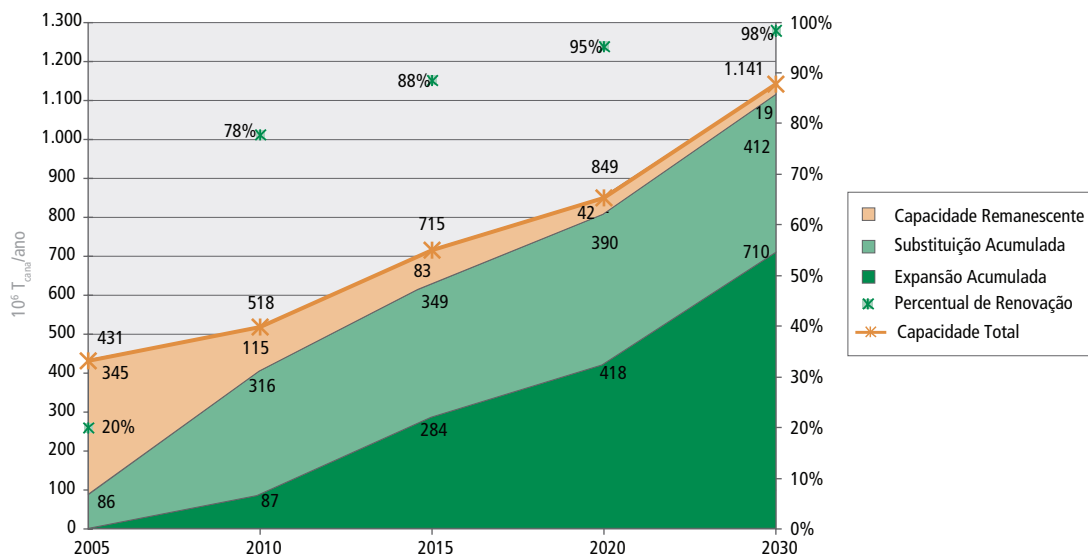
DATAGRO (2006), para os dados de 1970 a 2000.

Com base nestas referências da evolução da capacidade instalada de processamento da cana-de-açúcar para produção de açúcar e etanol, e assumindo uma vida útil de 30 anos para estas instalações, podemos projetar as taxas de substituição do parque industrial do setor sucroalcooleiro e, associando-o às projeções de expansão da produção, projetar a curva de renovação do mesmo.

Esta curva é apresentada na Figura 14, onde se vê a evolução da capacidade total de processamento da cana-de-açúcar projetada para o horizonte de 2030, as parcelas associadas à expansão projetada e a estimativa de substituição das unidades existentes.

Na mesma Figura 14, vemos a indicação da proporção da capacidade instalada que será composta por unidades novas, resultantes de expansão ou substituição, denominadas *Nova Capacidade de Processamento*. Vemos que em 2005, aproximadamente, 20 % da capacidade existente já se classificava como *Nova*, resultado dos investimentos realizados em expansão que se iniciaram na década de 90, para o açúcar especificamente a partir de 1994 e para o etanol a partir de 1997. Com as premissas adotadas, descritas acima, verifica-se que já em 2010, aproximadamente, 78 % do parque industrial do setor sucroalcooleiro já será composto por unidades *Novas*, sendo que, aproximadamente, 60 % desta capacidade será instalada no período compreendido entre os anos de 2005 e 2010, o que faz deste período de penetração tecnológica um fator determinante nos resultados de competitividade, eficiência e geração de energia elétrica do horizonte do estudo do PNE 2030.

Figura 14 – Projeção da evolução da capacidade industrial de processamento da cana-de-açúcar
Brasil – 2005 a 2030



Fonte: Com base nas estimativas de produção da COGEN/UNICA (2006) até 2015 e estimativas de 3,5 % a.a. entre 2015 e 2020 e de 3,0 % a.a. entre 2020 e 2030.

Os resultados da base de dados primários obtidos para elaboração do Balanço Energético Nacional, fornecidos por 74 usinas informantes, entre as 344 cadastradas na Relação das Unidades Produtoras Cadastradas no Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia em junho de 2006, refletem os resultados acima apresentados, onde um conjunto de 27 unidades já ultrapassam a marca de 25 kWh de energia elétrica produzida por tonelada de cana-de-açúcar processada ($\text{kWh}_{\text{elét}}/\text{t}_{\text{Cana}}$), sendo que 22 exportam mais que 4,0 $\text{kWh}_{\text{elét}}/\text{t}_{\text{Cana}}$, 17 exportam mais que 10 $\text{kWh}_{\text{elét}}/\text{t}_{\text{Cana}}$ e 10 exportam mais que 20 $\text{kWh}_{\text{elét}}/\text{t}_{\text{Cana}}$. Algumas unidades ultrapassam já o patamar de geração 50 $\text{kWh}_{\text{elét}}/\text{t}_{\text{Cana}}$ e chegam mesmo a atingir 120 $\text{kWh}_{\text{elét}}/\text{t}_{\text{Cana}}$.

No ano de 2005, o setor sucroalcooleiro gerou um total de 7.442 GWh e exportou 1.100 GWh, crescendo, respectivamente, 6,8 % e 28,2 %, em relação a 2004, com a geração crescendo a uma taxa de 11,2 % a.a. em relação ao ano de 1994, quando gerou 2.314 GWh e importou da rede 992 GWh. A capacidade de geração de energia elétrica instalada ao final de 2005 no setor sucroalcooleiro era de 2.310 MW, tendo crescido 37 % em relação a 2004, que era de 1.685 MW.

Diante desta perspectiva de renovação de, aproximadamente, 60 % da capacidade instalada de processamento da cana-de-açúcar no período compreendido entre os anos de 2005 e 2010, e da valorização da biomassa residual da cana-de-açúcar, tanto o bagaço quanto a palha, as novas unidades de processamento de cana-de-açúcar já incorporam avanços tecnológicos de desenvolvimento nacional, que seguirão evoluindo, sendo os principais, sob o ponto de vista do interesse deste estudo, aqueles relativos à redução da demanda energética total do processo produtivo e a elevação das eficiências globais de aproveitamento do conteúdo energético da biomassa usada, seja usada como matéria-prima ou como combustível.

A evolução tecnológica do sistema produtivo de açúcar e etanol já permite alcançar níveis de eficiência energética bastante superiores aos de duas décadas atrás. Devido às peculiaridades de desenvolvimento do setor sucroalcooleiro no Brasil, bem como a necessidade de se descartar o bagaço de cana-de-açúcar, sub-

produto durante muito tempo considerado como um resíduo indesejável, o ciclo vapor, conjunto de equipamentos constituído de: caldeira geradora de vapor; tubulações de vapor; turbinas a vapor; e equipamentos de processo da produção de açúcar e etanol consumidores de vapor, apresentam concepção de baixa eficiência energética.

Nestes sistemas, as caldeiras geradoras de vapor foram por décadas tratadas como incineradores para eliminação de bagaço (CAMARGO *et al.*, 1990) e os equipamentos de processo, tanto para acionamento como de consumo térmico, foram projetados para auxiliar na eliminação da energia contida no vapor. O resultado deste fato, a despeito do emprego de uma tecnologia de alta racionalidade energética como a co-geração, é que a geração termelétrica em ciclo de co-geração *topping* a vapor em contrapressão nas usinas de açúcar e etanol tem como principais características o reduzido aproveitamento da potencialidade energética do bagaço de cana-de-açúcar, baixa eficiência energética e a baixa capacidade.

Como o conteúdo energético do bagaço de cana-de-açúcar é muitas vezes superior às necessidades energéticas de uma usina sucroalcooleira, este elevado superávit energético pode auferir valor econômico através da redução do consumo no processo quando usinas adequadamente projetadas exportam energia elétrica ou disponibilizam bagaço para uso como matéria-prima.

Os principais indicadores técnicos dos sistemas industriais e energéticos das usinas sucroalcooleiras até o final da década de 90 são: a pressão de geração do vapor saturado nas caldeiras, da ordem de 20 kgf/cm², a temperatura de superaquecimento do vapor entre 280 °C e 350 °C (AZOLA *et al.* 1999), a produção de vapor de processo entre 400 kg_{Vapor}/ton_{Cana} a 600 kg_{Vapor}/ton_{Cana} e a produção total de energia elétrica entre 5 kWh/ton_{Cana} e 20 kWh/ton_{Cana} (CAMARGO *et al.*, 1990), equivalente à geração entre 20 kWh/ton_{Biomassa} e 75 kWh/ton_{Biomassa}. Os consumos específicos de insumos energéticos nas usinas de açúcar e etanol são, em média, entre 10 kWh/ton_{Cana} e 12,5 kWh/ton_{Cana} de energia elétrica e entre 400 kg_{Vapor}/ton_{Cana} e 600 kg_{Vapor}/ton_{Cana} de vapor de processo (CAMARGO *et al.*, 1990).

As unidades de processamento atualmente consideradas, chamadas flexíveis, que podem produzir um mix de açúcar e etanol variável dentro de uma faixa significativamente larga, sem perder as eficiências globais de conversão dos açúcares em ambos os processos, apresentam parâmetros de consumo de energia caracterizados por consumo de vapor ao redor dos 320 kg_{Vapor}/ton_{Cana} a 380 kg_{Vapor}/ton_{Cana}, conforme OLIVÉRIO (2006) e consumo de energia elétrica da ordem de 13 kWh/ton_{Cana} a 19 kWh/ton_{Cana} (LEITE *et al.*, 2005). Embora cresça o consumo específico de energia elétrica, as expressivas melhoras nas eficiências de geração de vapor, consumo de processo e produção de energia elétrica, tornam esta elevação desprezível diante do superávit alcançado para exportação.

■ 3.6.2. Tecnologias de geração termelétrica para expansão e renovação no setor sucroalcooleiro

A biomassa foi o primeiro vetor energético empregado pela humanidade e ainda é uma fonte energética de importância, verificando-se na atualidade um maior interesse pelas alternativas tecnológicas capazes de transformá-la em formas nobres de energia, como a energia elétrica e os combustíveis líquidos.

Várias são as vias tecnológicas para a geração de energia elétrica a partir da biomassa, e em todas elas há um processo de conversão da biomassa em um produto intermediário que será então utilizado em uma máquina motriz onde será produzida a energia mecânica que acionará o gerador de energia elétrica.

Com a expansão e renovação das unidades de processamento do setor sucroalcooleiro, e a valorização

dos resíduos agrícolas e industriais do processo, também as centrais termelétricas de co-geração integradas aos sistemas produtivos deverão incorporar os avanços tecnológicos viabilizados em cada período de tempo dentro do horizonte deste estudo, elevando sobremaneira a produção de energia elétrica excedente ou minimizando o consumo de biomassa para atendimento das necessidades energéticas do processo e disponibilizando-a para uso como matéria-prima em aplicações mais rentáveis.

Como apresentado na Nota Técnica Geração termelétrica a partir da biomassa: caracterização técnico-econômica, as principais tecnologias que fazem parte da esfera de inovações tecnológicas propostas para viabilizar a melhora do aproveitamento dos recursos energéticos da biomassa através da geração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro são:

- a) Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão, empregado de forma integrada a processos produtivos através da co-geração;
- b) Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração, que podem operar de forma integrada a processos produtivos através da co-geração ou isoladamente;
- c) Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa.

Para cada tecnologia de geração de energia elétrica a partir da biomassa são apresentados o balanço de energia, os custos de instalação, os custos operacionais, a eficiência global em condição de co-geração e de geração de energia elétrica pura, as vantagens e desvantagens técnicas e operacionais. Com a definição dos aspectos técnico-econômicos dos sistemas, as demandas de processo e a disponibilidade de biomassa já definidos, realizaremos a modelação de análise econômica.

Na Tabela 11, reproduzimos os parâmetros de referência consolidados na Nota Técnica Geração termelétrica a partir da biomassa: caracterização técnico-econômica para cada uma das tecnologias relevantes. Considerando que os sistemas de atendimento energético em usinas sucroalcooleiras é, necessariamente, um ciclo de co-geração *topping* a vapor, devido à necessidade de atendimento das demandas energéticas do processo, destaca-se que entre as três possibilidades tecnológicas apresentadas, o ciclo de co-geração *topping* a vapor com turbinas de contrapressão é o que apresenta maiores perspectivas de aplicação na expansão setorial descrita anteriormente.

A diferença fundamental destes ciclos, que teoricamente são os mesmos utilizados até então, está na especificação de suas características técnicas, que passam a privilegiar a eficiência energética através da elevação da eficiência geral da caldeira de geração de vapor, dos níveis de pressão e temperatura deste vapor, que passa a patamares de 80 kgf/cm² a 100 kgf/cm², na atualidade, e a podem atingir valores da ordem de 150 kgf/cm² a 180 kgf/cm², no horizonte do estudo, com desenvolvimento de tecnologia nacional.

Além dos ganhos de eficiência do processo produtivo e da caldeira já descritos, há também a aplicação de turbinas a vapor com melhores especificações fluído-mecânicas e termodinâmicas, com maior número de estágios e melhores desempenhos.

Tabela 11 – Geração específica de energia elétrica das tecnologias a partir da biomassa
Excedente exportável segundo o modo de operação

Tecnologia	Em co-geração (kWh/ton _{biomassa}) ⁽¹⁾	Em geração pura (kWh/ton _{biomassa}) ⁽¹⁾
Ciclos de baixa eficiência em operação	15	-
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	215	-
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	340	530
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	1.050	1.150

Nota: (1) Referenciado a biomassa em base seca

A segunda tecnologia em termos de potencial de penetração é aquela que incorpora ao sistema anteriormente descrito um condensador, cuja função principal é permitir a expansão do até pressões inferiores à atmosférica, elevando o aproveitamento da energia contida no vapor.

Entre as principais diferenças entre estas duas tecnologias, que determinarão a sua adoção em novas unidades de processamento da cana-de-açúcar, em função das estratégias dos operadores das unidades, entre outras considerações, destacam-se:

- Nos ciclos a vapor de contrapressão, o processo produtivo efetua o papel de condensador do vapor, obrigando a um casamento entre as dimensões da geração de vapor e do processo produtivo, bem como limitando o tempo de operação de exportação de energia elétrica ao período da safra. Os esforços de desenvolvimento das culturas e técnicas agrícolas vêm expandindo os períodos de safra, reduzindo o tempo de indisponibilidade dos equipamentos;

- Nos ciclo a vapor de condensação e extração, há existência do dispositivo de condensação que permite a operação fora do período da safra, quando a eficiência do ciclo é ainda maior, além oferecer maior flexibilidade nas relações entre a quantidade de vapor gerado e consumido pelo processo produtivo. Entre as inconveniências destes ciclos destacam-se maiores investimentos, a necessidade de providenciar a oferta de combustível durante os períodos de entressafra, seja acumulando resíduos vegetais como bagaço e palha ou empregando outros energéticos. Além disso, os sistemas com condensação em escalas como as projetadas para as usinas do setor sucroalcooleiro demandam quantidade expressiva de água para o processo de condensação, limitando as regiões onde se podem instalar usinas desta tecnologia e, ainda mais, quando se consideram as possibilidades de culturas da cana-de-açúcar com irrigação.

Por fim, cabe apresentar algumas considerações sobre o ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa, cuja eficiência é muito elevada, como verificado na Tabela 11, mas que ainda não estão disponíveis comercialmente, ao menos nas escalas em que se considera para integração às unidades de processamento da cana-de-açúcar. Além disso, são ciclos que possuem condensadores e apresenta as mesmas vantagens e desvantagens descritas para o ciclo a vapor de condensação e extração.

Apesar das considerações sobre custo e disponibilidade comercial da tecnologia, esta não pode ser descartada, pois, como foi descrito no início deste item, há na atualidade um grande interesse pelas alternativas tecnológicas capazes de transformar a biomassa em formas nobres de energia, como os combustíveis líquidos. Uma das rotas tecnológicas em estudo se apóia na gaseificação da biomassa para geração de um gás de síntese que posteriormente é processado para produzir combustíveis sintéticos como gasolina e óleo diesel, similarmente à orientações tecnológicas de mesmo objetivo que utilizam gás natural e carvão para o mesmo fim. A concomitância de interesses para o desenvolvimento da tecnologia de gaseificação e a ampliação de

sua escala de produção industrial tenderão a diminuir as dificuldades verificadas atualmente, exigindo, portanto, que se considere a possibilidade de sua aplicação ao final do horizonte de estudo.

■ 3.7. Perspectivas de geração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro

Conforme a Nota Técnica Avaliação do Potencial da Biomassa como Recurso Energético, a Tabela 12 apresenta em suas duas primeiras seções os resultados sumarizados da produção de cana-de-açúcar, a área plantada, produção de açúcar e de etanol, bem como a oferta mássica de biomassa do setor sucroalcooleiro em termos do resíduo do processo industrial, o bagaço, e do resíduo agrícola, a palha.

Uma vez quantificado o crescimento da produção e a oferta teórica de resíduos da biomassa do setor sucroalcooleiro, a Tabela 12 apresenta em suas seções seguintes, respectivamente, os parâmetros adotados que quantificam o cenário de recuperação da palha no campo e de destinação da biomassa para outros usos, especificamente o bagaço para produção de etanol através da hidrólise. A partir deste cenário, a quantificação da oferta de biomassa do setor sucroalcooleiro para geração de energia elétrica é apresentada na última seção da Tabela 12.

Tabela 12 – Cenário de referências do setor sucroalcooleiro
Expansão da produção de cana-de-açúcar, recuperação da palha, uso do bagaço para hidrólise e oferta da biomassa residual
Brasil

	2005	2010	2015	2020	2030
Produção de cana-de-açúcar (10⁶ t/ano)	431,4	518,4	715,0	849,2	1.141,2
Área plantada	5,6	7,1	9,2	11,1	17,0
Produção de açúcar (10⁶ t/ano)	28,2	33,0	45,2	57,7	66,9
Produção de etanol (10⁶ m³/ano)	16,2	25,4	36,8	47,0	54,5
Oferta mássica de biomassa do setor sucroalcooleiro	2005	2010	2015	2020	2030
Resíduos do setor sucroalcooleiro (10 ⁶ t/ano)	118,6	142,6	196,6	233,5	313,8
Cana-de-açúcar (bagaço) (10 ⁶ t/ano)	58,2	70,0	96,5	114,6	154,1
Cana-de-açúcar (palha) (10 ⁶ t/ano)	60,4	72,6	100,1	118,9	159,8
Cenário de recuperação da palha no campo	2005	2010	2015	2020	2030
Recuperação da palha (10 ⁶ t/ano)	-	3,6	9,0	17,7	38,9
Associada à capacidade produção existente (%)	-	5	5	10	15
Associada à capacidade de produção adicional (%)	-	5	15	20	30
Proporção da palha total (%)	-	5,0	9,0	14,9	24,3
Cenário de outros usos da biomassa - hidrólise	2005	2010	2015	2020	2030
Destinação para hidrólise e outros usos (10 ⁶ t/ano)	-	0,6	7,0	17,7	25,9
Associada à capacidade produção existente (%)	-	0	5	10	10
Associada à capacidade de produção adicional (%)	-	5	10	20	20
Equivalência do total de biomassa (bagaço e palha) (%)	-	0,4	3,6	7,6	8,3
Cenário de oferta da biomassa	2005	2010	2015	2020	2030
Resíduos do setor sucroalcooleiro (10 ⁶ t/ano)	58,2	73,0	98,5	114,6	167,0
Associada à capacidade produção existente (10 ⁶ t/ano)	58,2	61,3	58,2	58,2	61,3
Associada à capacidade de produção adicional (10 ⁶ t/ano)	0,0	11,7	40,3	56,4	105,8

Como pode ser verificado, a oferta de biomassa do setor foi associada à capacidade de produção existente de cana-de-açúcar e à capacidade de produção adicional, que deverá ser expandida no horizonte de estudo. Esta opção reflete o entendimento de que as novas áreas de produção agrícola serão implantadas para o atendimento da capacidade de processamento adicional, para produção de açúcar e etanol, e serão implementadas incorporando os novos paradigmas tecnológicos do setor, onde a mecanização da cultura e a recuperação

da palha apresentem maiores viabilidades, de forma a permitir o aproveitamento econômico desta biomassa, seja como combustível ou como matéria-prima. Desta mesma forma, as perspectivas de que estas novas unidades de processamento estejam estrategicamente preparadas para a implantação das tecnologias de produção do etanol através da hidrólise as coloca como as que maiores quantidades de bagaço podem desviar da geração de energia elétrica.

Seguindo esta mesma lógica, e segmentando a utilização da cana-de-açúcar entre a capacidade de processamento existente e a capacidade de processamento adicional, incorporando na evolução da capacidade de processamento existente os quantitativos de renovação do parque industrial, apresentamos na Tabela 13 o cenário de participação das tecnologias de geração termelétrica na expansão e renovação no setor sucroalcooleiro percentualmente à sua penetração na capacidade de processamento de cana-de-açúcar.

Tabela 13 – Cenário de participação das tecnologias de geração termelétrica na expansão e renovação no setor sucroalcooleiro
Percentual da capacidade de processamento de cana-de-açúcar associada a cada tecnologia de geração termelétrica

Capacidade de processamento existente em 2005 ⁽¹⁾	2005	2010	2015	2020	2030
Ciclos de baixa eficiência em operação	100%	40%	30%	20%	10%
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	-	55%	60%	63%	65%
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	-	5%	10%	15%	20%
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	-	-	-	2%	5%
Capacidade de processamento adicional ⁽²⁾	2005	2010	2015	2020	2030
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	90%	85%	80%	73%	70%
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	10%	15%	20%	25%	25%
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	-	-	-	2%	5%

Notas: (1) Refere-se ao percentual de participação de cada tecnologia de geração termelétrica empregada na capacidade de processamento de cana-de-açúcar existente em 2005.

(2) Refere-se ao percentual de cada tecnologia de geração termelétrica que é empregada no incremento de capacidade de processamento de cana-de-açúcar a partir de 2005.

Os fatos que habilitam e as premissas que explicam o cenário de participação das tecnologias de geração termelétrica, segundo a qualificação adotada para a capacidade de processamento de cana-de-açúcar, se fundamentam, no caso da associada à capacidade de processamento existente em 2005, primeiramente pela curva de substituição e renovação da capacidade industrial do setor, demonstrada pela Figura 14 Projeção da evolução da capacidade industrial de processamento da cana-de-açúcar. Nesta curva, verificamos que as estimativas indicam que até 78 % da capacidade instalada de processamento pode estar renovada já em 2010, 88 % até 2015 e 95 % até 2020.

Cabe destacar que os percentuais apresentados para o ano de 2005 refletem a taxa de renovação verificada na Figura 14 para o ano, quando 20 % da capacidade de processamento instalada já é composta por unidades novas. Portanto, os percentuais de manutenção dos ciclos de baixa eficiência em operação, relativamente a 2005, de 40 %, 30 %, 20 % e 10 %, não só respeitam estes limites como são conservadores devido, tanto à necessidade de conservadorismo pela existência de incerteza na estimativa de renovação, quanto pelo fato de que algumas unidade de processamento podem ter sua vida útil estendida além dos 30 anos de referência adotados para a substituição.

Para tratar da substituição da capacidade de processamento existente e da expansão da capacidade de processamento, abordaremos a questão pelo lado tecnológico, e iniciaremos pela tecnologia de menor perspectiva de penetração no horizonte de estudo, o ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa,

que não apresenta perspectivas de comercialização no curto e médio prazo, principalmente pela ausência de desenvolvimento nacional nas escalas consideradas, colocando seu emprego como uma possibilidade mais distante, e em pequena quantidade, refletidas nas participações apresentadas na Tabela 13.

Passamos a considerar então, as condições de aplicação das duas tecnologias mais compatíveis com a realidade de renovação e expansão da capacidade de processamento do setor sucroalcooleiro brasileiro: o ciclo a vapor com turbinas de contrapressão e o ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração.

Ambos os sistemas de geração termelétrica apresentam condições de integração com as unidades de processamento de cana-de-açúcar no formato de co-geração com elevadas eficiências e disponibilidade de geração de excedentes de energia elétrica. A principal distinção entre elas, e que prejudica a opção pela tecnologia com condensação e extração, deriva não de questões econômicas ou tecnológicas, mas de aspectos logísticos.

Por demandar uma grande quantidade de água para refrigeração e condensação, estes sistemas exigem, para um impacto ambiental aceitável, sua instalação junto a corpos de água de magnitude superior aos requeridos para atender às demandas do processo industrial de processamento da cana-de-açúcar, limitando sua instalação em novas unidades, e restringindo ainda mais sua aplicação na substituição de unidades existentes, que não foram locadas com esta perspectiva.

Mesmo nas novas unidades, os sinais locacionais não deverão ser determinados por esta prioridade, uma vez que questões como o posicionamento em relação às melhores áreas para produção da matéria-prima e o acesso aos canais logísticos de escoamento da produção têm muito mais impacto na estrutura do negócio que os benefícios auferidos com a geração de energia elétrica.

O outro aspecto logístico importante no caso da tecnologia com condensação é a disponibilidade de combustível para a operação fora do período de safra. Embora a estocagem de resíduos de biomassa venha sendo praticada e experimentada, com o objetivo de encontrar as alternativas que permitam seu uso nos períodos de entressafra, esta questão ainda não está completamente resolvida, reduzindo ainda mais a aplicação desta opção tecnológica de geração termelétrica.

Isto posto, destacamos a natural prevalência e conseqüente importância para o setor sucroalcooleiro nesta fase de expansão e renovação das unidades industriais de processamento de cana-de-açúcar da tecnologia de geração termelétrica em co-geração baseada nos ciclos a vapor com turbinas de contrapressão eficientes, que incorporam as melhores opções técnicas de maximização do aproveitamento do conteúdo energético da biomassa combustível.

Importante é ressaltar que ambas as tecnologias de geração termelétrica têm seu processo industrial de produção completamente dominado pela engenharia nacional, sendo possível a execução integral do empreendimento sem a necessidade de importar equipamentos, facilitando consideravelmente as questões econômicas. Em alguns aspectos específicos, como as caldeiras de pressões e temperaturas mais elevadas, o domínio para produção nacional só não é mais vigoroso pela falta de demanda, que agora começa a ser expressa através da implantação de diferentes sistemas termelétricos.

Tabela 14 – Geração de energia elétrica excedente a partir da biomassa do setor sucroalcooleiro
Segundo as tecnologias de geração termelétrica empregadas na expansão e renovação no parque industrial do setor sucroalcooleiro
Brasil – GWh/ano

	2005	2010	2015	2020	2030
Geração de energia elétrica excedente	1.100	11.397	19.346	26.089	44.083
Associada à capacidade de processamento existente em 2005	612	8.653	9.755	12.256	16.034
Ciclos de baixa eficiência em operação	612	368	262	175	92
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	-	7.244	7.513	7.888	8.561
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	-	1.041	1.980	2.970	4.165
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	-	-	-	1.223	3.216
Associada à capacidade de produção adicional	488	2.745	9.591	13.833	28.050
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	415	2.146	7.053	9.584	17.013
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	73	599	2.539	3.910	8.106
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	-	-	-	339	2.930

Assim, a partir do cenário de oferta de biomassa residual do setor sucroalcooleiro, resultante das projeções de expansão da demanda interna e das exportações de açúcar e etanol, considerados o aumento proporcionado pela recuperação da palha e a redução devido a aplicação na hidrólise, sumarizados na Tabela 12, diante do cenário de participação das tecnologias de geração termelétrica na expansão e renovação no setor sucroalcooleiro, apresentados na Tabela 13, e em função da geração específica, a partir da biomassa, de energia elétrica excedente das tecnologias, apresentadas na Tabela 11, chegamos às estimativas de geração de energia elétrica excedente a partir da biomassa do setor sucroalcooleiro apresentadas na Tabela 14.

Tabela 15 – Cenários dos fatores de capacidade das tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa empregadas no setor sucroalcooleiro

Associada à capacidade de processamento existente em 2005	2005	2010	2015	2020	2030
Ciclos de baixa eficiência em operação	0,28	0,30	0,35	0,35	0,35
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	-	0,60	0,70	0,70	,70
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	-	0,80	0,80	0,80	0,80
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	-	-	-	0,80	0,80
Associada à capacidade de produção adicional	2005	2010	2015	2020	2030
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	0,50	0,60	0,70	0,70	0,70
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	-	-	-	0,80	0,80

A estimativa da capacidade de geração de energia elétrica excedente a partir da biomassa do setor sucroalcooleiro segundo as tecnologias de geração termelétrica empregadas na expansão e renovação no parque industrial do setor sucroalcooleiro foram calculadas, e apresentadas na Tabela 16, tomado-se como referência os valores de geração estimados e os fatores de capacidade típicos de cada tecnologia, como apresentados na Tabela 15.

Tabela 16 – Capacidade de geração de energia elétrica excedente a partir da biomassa do setor sucroalcooleiro
Segundo as tecnologias de geração termelétrica empregadas na expansão e renovação no parque industrial do setor sucroalcooleiro
Brasil – MW

	2005	2010	2015	2020	2030
Capacidade de geração de energia elétrica excedente	0,35	2,16	3,11	4,11	6,83
Associada à capacidade de processamento existente em 2005	0,25	1,67	1,59	1,94	2,48
Ciclos de baixa eficiência em operação	0,25	0,14	0,09	0,06	0,03
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	-	1,38	1,23	1,29	1,40
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	-	0,15	0,28	0,42	0,59
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	-	-	-	0,17	0,46
Associada à capacidade de produção adicional	0,11	0,49	1,51	2,17	4,35
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	0,09	0,41	1,15	1,56	2,77
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	0,01	0,09	0,36	0,56	1,16
Ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa	-	-	-	0,05	0,42

Em concordância com a distribuição regional da produção de cana-de-açúcar, explicitadas na Nota Técnica Avaliação do Potencial da Biomassa como Recurso Energético, a Tabela 17 apresenta a distribuição regional da capacidade instalada calculada.

Tabela 17 – Distribuição regional da capacidade de geração de energia elétrica excedente a partir da biomassa do setor sucroalcooleiro
Segundo as tecnologias de geração termelétrica empregadas na expansão e renovação no parque industrial do setor sucroalcooleiro
Brasil – MW

	2005	2010	2015	2020	2030
Capacidade de geração de energia elétrica excedente	355	2.160	3.106	4.111	6.829
Norte	1	2	5	6	10
Nordeste	47	301	494	654	1.087
Sudeste	251	1.455	1.962	2.597	4.315
Sul	25	146	210	278	462
Centro-Oeste	32	256	434	575	955

4. Conclusões

O Brasil é um país que reúne inúmeras vantagens comparativas que o tornam capaz de atuar como líder no mercado mundial de produtos agrícolas, agroindustriais e silviculturas, em particular aqueles dedicados à energia. O setor sucroalcooleiro e a produção de etanol são referências nacional e internacional de estruturação bem sucedida de uma cadeia produtiva agroindustrial integrada de alimentos e energia.

Com imenso potencial agrícola, áreas disponíveis para a agricultura com impactos ambientais circunscritos ao socialmente aceitos, a possibilidade de múltiplos cultivos ao longo de um único ano, a intensa radiação solar recebida, além da diversidade de clima, exuberância de biodiversidade e a existência de desenvolvimento científico e tecnológico agrícola específico da zona tropical, associado a uma agroindústria sólida e produtiva, o Brasil, e particularmente o setor sucroalcooleiro, apresentam um expressivo potencial de crescimento frente às perspectivas de expansão do mercado de açúcar e a consolidação do mercado internacional de etanol.

A produção de etanol no Brasil apresenta uma eficiência global bastante elevada, em torno de oito unidades energéticas para cada uma produzida, podendo alcançar valores ainda maiores se os resíduos agrícolas

puderem ser aproveitados para fins energéticos e um novo paradigma tecnológico for aplicado para o aproveitamento do conteúdo energético do bagaço de cana.

O setor sucroalcooleiro do país apresenta já uma produção de biomassa com enorme potencial de aproveitamento tanto para energia elétrica como para outras formas de produção de energia derivada da biomassa celulósica e também significativo avanço em termos das opções economicamente viáveis de desenvolvimento de rotas tecnológicas de recuperação e transporte da biomassa residual da cultura, podendo desempenhar no futuro próximo um papel fundamental na consolidação de um mercado deste tipo de equipamento, alavancando a economicidade da recuperação de resíduos de outras culturas agrícolas, como a da soja e a do milho, cujos quantitativos de oferta são expressivos.

Como se viu no corpo deste estudo, a recuperação de quantitativos da palha da cana-de-açúcar resultante da colheita mecanizada sem queima prévia pode chegar aos patamares de 60 % a 70 % do total produzido, sem com isso deixar de aproveitar os benefícios agrônômicos da manutenção desta biomassa no campo. Tal parcela representa algo em torno de $90 \text{ kg}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Cana}}$, entregues no pátio das unidades de processamento com custos da ordem de $13,70 \text{ US\$/t}_{\text{Bbs}}$.

Estes resultados podem ser alcançados através da rota de colheita mecanizada que se realiza no campo sem queima, com o equipamento tradicional de colheita operando com o ventilador de limpeza secundário desligado e o primário ajustado a uma rotação conveniente, resultando uma limpeza parcial da cana-de-açúcar colhida, deixando uma cobertura delgada de palha sobre o solo, e o restante da palha sendo carregada e transportada à unidade de processamento juntamente com os colmos da cana-de-açúcar, onde se realiza um processo da separação da palha/colmo em uma estação de limpeza a seco.

Se por um lado este desenvolvimento tecnológico aumenta, no curto prazo, a disponibilidade de biomassa para aplicação como combustível na geração de energia elétrica, outro desenvolvimento tecnológico de igual magnitude irá competir com esta aplicação, deslocando bagaço de cana para a produção de etanol derivado da celulose.

As quantidades de bagaço deslocadas dependerão de uma série de condicionantes, de variadas naturezas, em um negócio que inicia um processo de renovação com a incorporação de diversas unidades de negócios interdependentes, derivadas de uma mesma cadeia complexa, que combina aspectos tecnológicos, comerciais e estratégicos tão diversos quanto singulares, em mercados de commodity internacional como o do açúcar, passando por um mercado que pode ser tanto contratado como de commodity, o mercado internacional de etanol que se inicia, e um mercado cativo de contratos de longo prazo como o de fornecimento de energia elétrica ao sistema nacional através das contratações via leilões.

Depois de realizadas estas considerações, as quantificações e estimativas, o cenário traçado para cada um dos fatores acima descrito indica um potencial de oferta de biomassa residual da cultura da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica que alcança 73 milhões de toneladas de biomassa, em base seca, no ano de 2010, 115 milhões de t_{Bbs} /ano no ano de 2020 e 167 milhões de t_{Bbs} /ano no ano de 2030.

Uma vez quantificado o cenário de oferta da biomassa aplicável como combustível, o estudo da penetração das tecnologias de geração termelétrica a partir da biomassa destacou um aspecto de importância capital para a avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir da biomassa da cultura da cana-de-açúcar, que se torna ainda mais significativo quando se consideram as oportunidades oferecidas tanto pelos mercados tradicionais, de açúcar, de etanol interno, quanto pelos novos, de etanol internacional e de energia

elétrica via leilões, e diz respeito à vida útil da maior parte da capacidade industrial de processamento de cana-de-açúcar instalada no país, que se encontra próxima ao final.

Embora ofereçam uma incerteza que não pode ser negligenciada, as estimativas da necessidade de renovação do parque industrial do setor sucroalcooleiro, somadas à necessidade de expansão dada pelo crescimento da demanda, como já citado, indicam que no horizonte dos próximos 10 a 15 anos haverá uma janela de oportunidade para alteração do perfil tecnológico do setor através da instalação de um quantitativo expressivo de nova capacidade industrial no setor, podendo chegar à proporção estimada de 95 % em 2020.

Esta significativa taxa de renovação do parque industrial, somada à consolidada percepção de que o potencial energético dos resíduos deve ser aproveitada, e também à disponibilidade industrial nacional e sua capacidade de atendimento aos novos padrões tecnológicos, leva-nos às considerações quanto ao sistema de geração termelétrica propriamente dito.

Os sistemas mais compatíveis com a realidade de renovação e expansão da capacidade de processamento do setor sucroalcooleiro brasileiro são aqueles compostos por ciclo a vapor com turbinas de contrapressão e ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração. Ambos integram-se em co-geração às unidades de processamento de cana-de-açúcar, alcançando elevadas eficiências e disponibilidade de geração de excedentes de energia elétrica.

Os ciclos com condensação e extração demandam uma grande quantidade de água para refrigeração e condensação, exigindo sua instalação junto a corpos de água de magnitude superior aos requeridos para atender às demandas do processo industrial de processamento da cana-de-açúcar, que é da ordem de $5,0 \text{ m}^3/\text{t}_{\text{cana}}$ nos sistemas atuais e, em um sistema com condensação chegaria a ser 20 ou 30 vezes superior, a depender da capacidade instalada, limitando sua instalação em novas unidades, e restringindo ainda mais sua aplicação na substituição de unidades existentes, que não foram locadas com esta perspectiva. Embora esta água não seja consumida, apenas utilizada para refrigeração, sua disponibilidade nestas quantidades torna-se um fator crítico.

Mesmo nas novas unidades, os sinais locacionais não deverão ser determinados por esta prioridade, uma vez que questões como o posicionamento em relação às melhores áreas para produção da matéria-prima e o acesso aos canais logísticos de escoamento da produção têm muito mais impacto na estrutura do negócio que os benefícios auferidos com a geração de energia elétrica.

Destaca-se, assim, a prevalência no setor sucroalcooleiro, nesta fase de expansão e renovação das unidades industriais de processamento de cana-de-açúcar, da tecnologia de geração termelétrica em co-geração baseada nos ciclos a vapor com turbinas de contrapressão eficientes, que incorporam as melhores opções técnicas de maximização do aproveitamento do conteúdo energético da biomassa combustível. Com parâmetros técnicos de geração de excedentes de energia elétrica da ordem de $215 \text{ kWh}/\text{t}_{\text{Bbs}}$, atendidas as necessidades de calor, trabalho mecânico e energia elétrica da usina.

Nestas condições, a geração de energia elétrica excedente do setor sucroalcooleiro, que foi de 1.100 GWh em 2005, tem potencial para atingir o patamar de 11.400 GWh em 2010, 26.000 GWh em 2020 e 44.000 GWh em 2030. Considerando os fatores de carga compatíveis com as tecnologias de geração termelétrica adotadas e sua integração com o processo produtivo da unidade de processamento, chega-se a capacidade instalada de geração de energia elétrica excedente de 2.160 GW em 2010, 4.100 GW em 2020 e 6.800 GW em 2030.

5. Referências bibliográficas

5.1. Reuniões temáticas na EPE: outras fontes renováveis

Albert Cordeiro G. de Melo, Diretor de Pesquisa e Desenvolvimento do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL e ex-Coordenador do Comitê Técnico de Fontes Alternativas do GCPS/CCPE;

Luciano Basto Oliveira, Doutor em Planejamento Energético e pesquisador da COPPE e do Instituto Virtual de Mudanças Globais – IVIG;

Onório Kitayama, Consultor, Assessor da Presidência da União da Agroindústria Canavieira de São Paulo

Osvaldo Stella Martins, Doutor em Energia e Recursos Naturais, Pesquisador do Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO;

Pedro Villalobos, Consultor, M.Sc. Em Química, ex-pesquisador da COPPE/UFRJ;

Carlos Roberto Silvestrin, Vice-presidente Executivo da Associação Paulista de Cogeração de Energia – COGEN.

5.2. Documentos consultados

AGE/MAPA, 2006, *Projeções do Agronegócio – Mundial e Brasil*, Assessoria de Gestão Estratégica / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, Brasília, DF.

ARRIGONI, E. B., ALMEIDA, L. C., 2005, “Impacts on Terrestrial – Biological Environment”. In: HASSUANI, S. J., LEAL, M. R. L. V., MACEDO, I. C., *Biomass Power Generation: Sugar Cane Bagasse and Trash*, Série Caminhos para Sustentabilidade, n. 01, capítulo 20, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento / Centro de Tecnologia Canavieira – CTC, Piracicaba, Brazil.

AZOLA, E. P., ANDRADE, J. F. M., RIBEIRO, R. H. C., *et al.*, 1999, *Identificação dos Potenciais Econômicos e de Mercado de Cogeração no Setor Sucroalcooleiro*. In: Relatório para Inclusão no Plano Decenal de Expansão da ELETROBRÁS – ECV – 788/98, ELETRONUCLEAR, Rio de Janeiro.

CAMARGO, C. A., USHIMA, A. H., RIBEIRO, A. M. M., *et al.*, 1990, *Conservação de Energia na Indústria do Açúcar e do Alcool – Manual de Recomendações*. 1 ed. IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, Brasil.

COGEN/ÚNICA, 2006, *Produção de Cana-de-Açúcar – Brasil*, União da Agroindústria Canavieira de São Paulo / Associação Paulista de Cogeração de Energia – COGEN.

CONAB, 2006a, *Série Histórica de Grãos – Safra 1976/77 a 2005/06*, Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, disponível em <http://www.conab.gov.br/download/safra/BrasilProdutoSerieHist.xls>, acessado em 31/07/2006.

CONAB, 2006b, *Avaliação da Safra Agrícola de Cana-de-açúcar 2005/2006 – Primeiro Levantamento – maio/2005*, Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA, disponível em http://www.conab.gov.br/download/safra/Primeiro_Levantamento_Cana_2006-07_maio06.pdf, acessado em 04/08/2006.

CONDE, A. J., PENATTI, C. P., BELLINASSO, I. F., 2005, “Impacts on Soil”. In: HASSUANI, S. J., LEAL, M. R. L. V., MACEDO, I. C., *Biomass Power Generation: Sugar Cane Bagasse and Trash*, Série Caminhos para Sustentabilidade, n. 01, capítulo 19, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento / Centro de Tecnologia Canavieira – CTC, Piracicaba, Brazil.

F.O.LICHT, 2006, *World Ethanol Markets: The Outlook to 2015*, Special Report n.º 138, F.O. Licht, Kent, UK.

FAPRI, 2006, *U.S. and World Agricultural Outlook 2006*, In: FAPRI Staff Report 06-FSR 1, Food and Agricultural Policy Research Institute, Iowa State University / University of Missouri-Columbia, Iowa, USA, disponível em <http://www.fapri.iastate.edu/Outlook2006/>, acessado em 14/08/2006.

FULTON, L., HOWES, T. e HARDY, J., 2004, *Biofuels for Transport - An International Perspective*, Office of Energy Efficiency, Technology and R&D - International Energy Agency - IEA, France, disponível em <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/biofuels2004.pdf>, acessado em 18/10/2006.

GM et al., 2002, "GM Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - A European Study; ANNEX - Full Background Report", disponível em http://www.lbst.de/index__e.html?http://www.lbst.de/welcome__e.html, acessado em 18/10/2006.

GM/ANL et al., 2001, "Well-to-Wheel Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems - North American Analysis", Vols 1-3, disponível em <http://www.transportation.anl.gov/pdfs/TA/163.pdf>, acessado em 18/10/2006.

HAMELINCK, C. N., HOOIJDONK, G., FAAIJ, A. P. C., 2003, *Prospects for Ethanol from Lignocellulosic Biomass: Techno-Economic Performance as Development Progress*, Report NWS-E-2003-55, Copernicus Institute - Science Technology Society - University Utrecht, The Netherlands, disponível em <http://www.chem.uu.nl/nws/www/publica/Publicaties2003/e2003-55.pdf>, acessado em 16/10/2006.

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.

IEA, 2000a, "Liquid Fuels from Biomass: North America; Impact of Non-Technical Barriers on Implementation", prepared for the IEA Bioenergy Implementing Agreement, Task 27 Final Report, by (S&T)2 Consultants Inc.

LEITE, R. C. C., CORTEZ, L. A. B., SOBRAL, M., et al., 2005, *Estudo Sobre as Possibilidades e Impactos da Produção de Grandes Quantidades de Etanol Visando à Substituição Parcial de Gasolina no Mundo*, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético - NIPE / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, Campinas, SP.

LEVELTON, 2000b, "Assessment of Net Emissions of Greenhouse Gases from Ethanol-Blended Gasolines in Canada: Lignocellulosic Feedstock", Levelton Engineering Ltd, R-2000-2, in association with (S&T)2 Consultants Inc.

MACEDO, I. C., NOGUEIRA, L. A. H., 2005, "Avaliação da Expansão da Produção do Etanol no Brasil". In: *CADERNOS NAE / Biocombustíveis - Processos Estratégicos de Longo Prazo*, Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República, Secretaria de Comunicação de Governo e Gestão Estratégica, n.º 2, Brasília, Brasil.

MANECHINI, C., RICCI, A., DONZELLI, J. L., 2005, "Benefits and Problems of Trash Left in the Field". In: HASSUANI, S. J., LEAL, M. R. L. V., MACEDO, I. C., *Biomass Power Generation: Sugar Cane Bagasse and Trash*, *Série Caminhos para Sustentabilidade*, n. 01, capítulo 3, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento / Centro de Tecnologia Canavieira - CTC, Piracicaba, Brazil.

OLIVÉRIO, J. L., 2006, *Ganhos de Produtividade e Gestão nas Usinas, "Etanol: Perspectivas e Oportunidades para a Agroindústria"*, Dedini S/A Indústrias de Base, São Paulo, SP.

RODRIGUES FILHO, J. P., 2005, "Trash Recovery Cost". In: HASSUANI, S. J., LEAL, M. R. L. V., MACEDO, I. C., *Biomass Power Generation: Sugar Cane Bagasse and Trash*, *Série Caminhos para Sustentabilidade*, n. 01, capítulo 12, Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento / Centro de Tecnologia Canavieira - CTC, Piracicaba, Brazil.

SIDRA/IBGE, 2006, *Sistema IBGE de Recuperação Automática, Produção Agrícola Municipal*, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão - MP, Rio de Janeiro, Brasil.

SPA/ MAPA, 2006, *Açúcar e Álcool no Brasil*, Departamento da Cana-de-açúcar e Agroenergia - Secretaria de Produção e Agroenergia / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA, Brasília, DF.

TORQUATO, S. A., 2005, Álcool: projeção da produção e exportação no período 2005/06 a 2015/16, Instituto de Economia Agrícola - Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios - Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado de São Paulo, disponível em <http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=4010>, acessado em 16/08/2006.

USDE, 2006, The Biomass Program, Office of the Biomass Program Energy Efficiency and Renewable Energy.

Participantes da Empresa de Pesquisa Energética – EPE

Coordenação Geral

Mauricio Tiomno Tolmasquim
José Carlos de Miranda Farias
Amílcar Guerreiro

Coordenação Executiva

Ricardo Cavalcanti Furtado

Equipe Técnica

Ana Paula A. Coelho
Flávia Pompeu Serran
Paulo Nascimento Teixeira
Mírian Regini Nuti

GERAÇÃO TERMELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

SUMÁRIO

1.	Introdução	199
1.1.	A agricultura da energia	206
1.2.	Conceituação de biomassa e resíduo	207
1.3.	Biomassa moderna versus biomassa tradicional.....	208
1.4.	Biomassa vegetal.....	209
1.4.1.	Florestas energéticas e industriais	209
1.4.2.	Resíduos agrícolas e agroindústrias	210
1.4.3.	Resíduos orgânicos	210
1.4.4.	Óleos vegetais	213
1.5.	Características físico-químicas de diferentes biomassas.....	214
2.	Impactos potenciais da tecnologia de geração termelétrica a partir da biomassa	214
3.	Impactos causados pelas instalações e atividades da cadeia de produção energética	217
3.1.	A necessidade de consideração dos impactos da cadeia energética	217
3.2.	Impactos da cadeia energética	217
3.2.1.	Plantação das culturas de cana-de-açúcar.....	217
3.2.2.	Produção de açúcar e álcool nas usinas.....	220
4.	Benefícios socioambientais.....	223
4.1.	Benefícios estratégicos.....	223
4.2.	Benefícios sociais.....	223
4.3.	Benefícios ambientais	225
5.	Indicadores de sustentabilidade.....	226
5.1.	Princípios básicos para o desenvolvimento de critérios e indicadores de sustentabilidade para energia da biomassa.....	226
5.2.	Critérios e indicadores específicos para sustentabilidade da energia da biomassa	227
5.2.1.	Tipos de indicadores	227
5.2.2.	Indicadores ambientais	228
5.2.3.	Indicadores socioeconômicos	230

GERAÇÃO TERMELÉTRICA A PARTIR DA BIOMASSA

AValiação DOS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS

SUMÁRIO

Continuação

6.	Custos socioambientais	231
6.1.	Considerações iniciais	231
6.2.	Custos socioambientais e externalidades	232
7.	Desenvolvimento tecnológico em médio prazo	234
7.1.	Novas tecnologias.....	235
7.2.	Aplicações modernas da agroenergia.....	236
8.	Potencialidades para utilização de benefícios do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL).....	237
8.1.	Considerações iniciais	237
8.2.	Relevância do MDL para biomassa.....	239
8.3.	Oportunidades para a agroenergia	241
9.	Considerações finais	242
10.	Referências bibliográficas	244
	ANEXO	247

1. Introdução

Este trabalho objetiva apresentar os efeitos socioambientais decorrentes da utilização dos diversos tipos de biomassa para a produção de energia elétrica dentro do contexto do planejamento da expansão da oferta de energia no horizonte de longo prazo, sob um ponto de vista sistêmico, uma vez que a biomassa constitui-se em um dos vários tipos de fontes que podem ser empregados no planejamento da expansão.

A biomassa é uma fonte renovável de produção de energia em escala suficiente para desempenhar um papel expressivo no desenvolvimento de programas de energias renováveis e na criação de uma sociedade ecologicamente mais sustentável. Embora seja a primeira fonte de energia utilizada pela humanidade, nos dias atuais ainda apresenta um amplo potencial a ser explorado. Depois de um período de pouca atenção, o interesse pela biomassa como fonte de energia renasce e os novos avanços tecnológicos valorizam a eficiência e competitividade.

No caso do Brasil, dadas as condições climáticas favoráveis, a disponibilidade de terras e a experiência acumulada ao longo do tempo como pioneiro no ressurgimento de sistemas de energia a partir desta fonte, a biomassa deve desempenhar um papel fundamental na busca da diversidade de fontes de energia sustentáveis no país. A substituição de combustíveis fósseis por combustíveis oriundos de biomassa, por meio de tecnologias de conversão de energia eficientes e aceitáveis do ponto de vista ambiental, é uma alternativa importante, que contribui, simultaneamente, para a redução da poluição da atmosfera, inclusive para mitigação dos impactos gerados pelas emissões de gases de efeito estufa (GEE), e para a redução da pressão sobre os recursos não renováveis do país.

Dentre os Objetivos do Milênio estabelecidos pela ONU, dois relacionam-se diretamente com o uso energético da biomassa: o primeiro - erradicar a pobreza extrema e a fome, e o sétimo - assegurar o desenvolvimento sustentável.

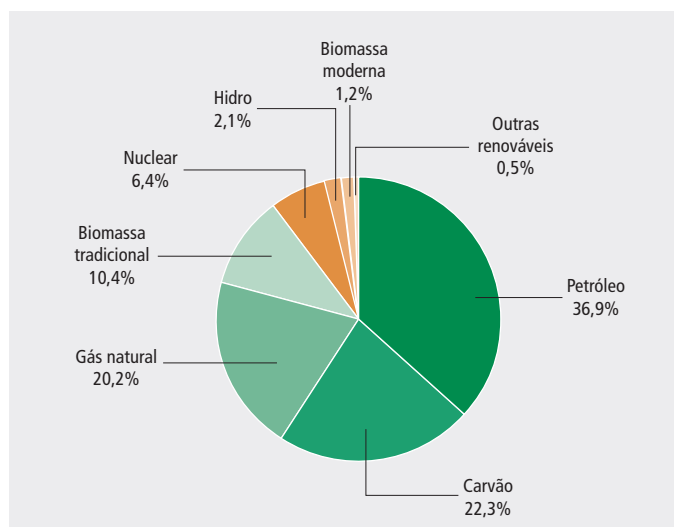
Tabela 1 - Consumo de biomassa (Mtep)

Região	Biomassa (Mtep)	Outros	Total	% Biomassa
Mundo	930	5.713	6.643	14
China	206	649	855	24
Leste Ásia	106	316	422	25
Sul Ásia	235	188	423	56
América Latina	73	342	415	18
África	205	136	341	60
Países em desenvolvimento	825	1.632	2.457	34

Fonte: International Energy Agency- IEA, 1998.

Embora grande parte dos diversos tipos de biomassa seja de difícil contabilização, devido ao uso não-comercial, estima-se que, atualmente, ela possa representar até cerca de 12% de todo o consumo mundial de energia primária. Em alguns países em desenvolvimento, essa parcela pode aumentar para 34%, chegando a 60% na África (Tabela 1). Na Figura 1, observa-se o panorama de utilização, no mundo, da biomassa como fonte de energia.

Figura 1 - Panorama de utilização de energia no mundo



Fonte: International Energy Agency- IEA, 2005

Considerando as previsões sobre as dificuldades crescentes da exploração das reservas de petróleo devido às instabilidades políticas e sociais dos principais países produtores de petróleo (GOLDEMBERG, 2004) e intensa divulgação do que se consideram evidências de aquecimento global oriundo da queima de combustíveis fósseis, torna-se consistente a perspectiva de uma era da bioenergia em escala global. Abre-se espaço para novo modelo de agricultura, não alimentar, responsável pela produção de matérias-primas energéticas renováveis, que substituem o carvão mineral e o petróleo e seus derivados.

A agroenergia torna-se cada vez mais viabilizada pelo desenvolvimento tecnológico e pela elevação dos preços do petróleo e seus derivados. A cotação desses combustíveis alcançou patamares que estimulam e justificam a procura intensa de novas fontes de energia.

Existe a necessidade de produzir energias alternativas às geradas pela queima de combustíveis fósseis. A agricultura é chamada para produzir estes combustíveis renováveis e de menor impacto ambiental. Nesse contexto, prevê-se a produção em massa de oleaginosas, álcool e biomassa energética. Para diminuir a necessidade de grande aumento da área agricultada, deve ser priorizada a mudança de processos produtivos, que valorize a qualidade, a competitividade e a sustentabilidade ambiental. Essa reconversão, além de gerar trabalho no campo, proporcionaria mudança na matriz produtiva rural, alterando o quadro das monoculturas. Com a irrigação, o controle da disponibilidade hídrica necessária à planta é fundamental para a regularidade da produção. A diminuição do impacto ambiental, causado pelos insumos químicos, está acontecendo graças aos avanços da biotecnologia, apresentando soluções substitutivas por controle biológico.

No Brasil, são irrigados cerca de três milhões de hectares de lavouras, pouco mais de 1% da área irrigada no planeta, sendo 1/3 representado pela lavoura de arroz do Rio Grande do Sul - RS. Nosso país apresenta dimensões continentais com 8,5 milhões de quilômetros quadrados de superfície. Tem quase todos os climas, todos os tipos de solo e os maiores índices de insolação. Possui a maior floresta natural, a mais extensa fronteira agrícola a ser explorada e a maior reserva de água doce localizada em região compatível com agricultura

intensiva. Todos esses fatores aportam enormes vantagens competitivas em termos de potencial comparativo na produção agrícola.

A questão da sustentabilidade da biomassa é, então, de especial importância nos países em desenvolvimento. Em muitos países, a biomassa tradicional é a fonte de energia mais utilizada para cocção e aquecimento de ambientes, principalmente por questões econômicas, porém da maneira como é utilizada causa impactos negativos à saúde humana e ao meio ambiente.

Existem, entretanto oportunidades para o desenvolvimento e utilização de biomassa moderna, com benefícios em termos de qualidade dos serviços de energia e impactos na saúde humana e no meio ambiente (KAREKESI et al, 2005). Constata-se, assim, que a questão das energias renováveis e do desenvolvimento sustentável tem sido tema recorrente e uma preocupação internacional.

Atualmente, várias tecnologias de aproveitamento estão em fase de desenvolvimento e aplicação. Mesmo assim, estimativas da Agência Internacional de Energia (IEA) indicam que, futuramente, a biomassa ocupará uma menor proporção na matriz energética mundial – cerca de 11% em 2020 (IEA, 1998). Outros estudos indicam que, ao contrário da visão geral que se tem, o uso da biomassa deverá se manter estável ou até mesmo aumentar, por duas razões, a saber:

- i. Crescimento populacional; e
- ii. Urbanização e melhoria nos padrões de vida (HALL; HOUSE; SCRASE, 2000).

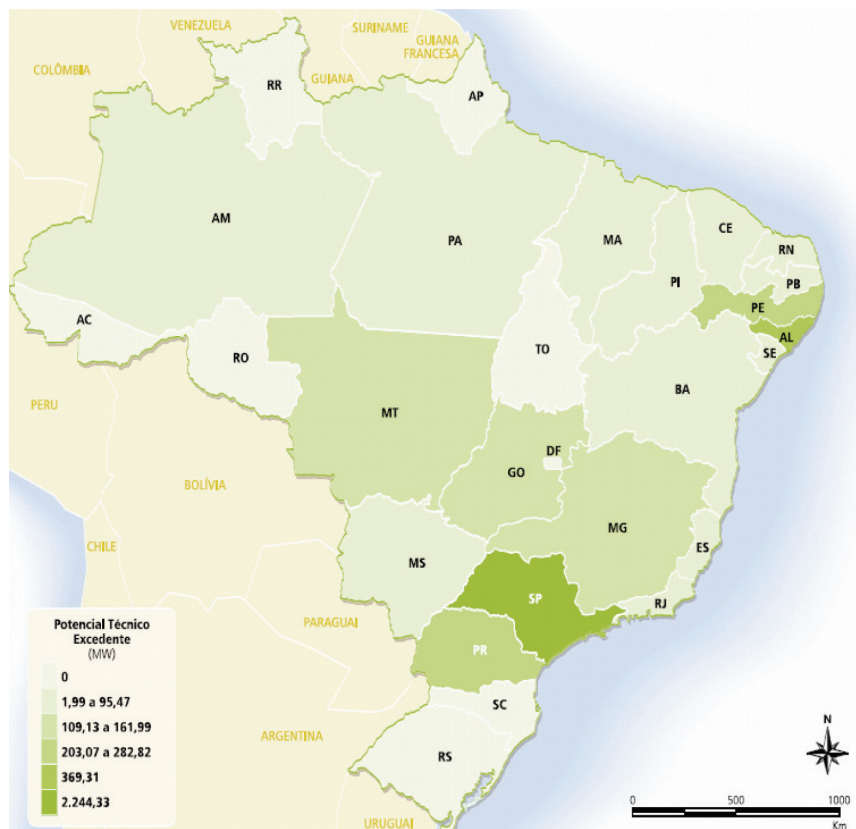
Um aumento nos padrões de vida faz com que pessoas de áreas rurais e urbanas de países em desenvolvimento passem a usar mais carvão vegetal e lenha, em lugar de resíduos (pequenos galhos de árvore, restos de materiais de construção, etc.). A precariedade e a falta de informações oficiais sobre o uso da biomassa para fins energéticos devem-se, principalmente, aos seguintes fatores:

- Trata-se de um energético tradicionalmente utilizado em países pobres e setores menos desenvolvidos;
- Trata-se de uma fonte energética dispersa, cujo uso, via de regra, é ineficiente;
- O uso da biomassa para fins energéticos é indevidamente associado a problemas de desflorestamento e desertificação.

Essa imagem da biomassa, entretanto, está mudando, graças aos esforços recentes de mensuração mais acurada do seu uso e potencial, por meio de novos estudos, demonstrações e plantas-piloto; ao uso crescente da biomassa como um vetor energético moderno (graças ao desenvolvimento de tecnologias eficientes de conversão), principalmente em países industrializados; e ao reconhecimento das vantagens ambientais do uso racional da biomassa, principalmente no controle das emissões de CO₂ e óxidos de enxofre (ROSILLO CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2000).

Estudos indicam que, nos Estados Unidos, a capacidade instalada do parque gerador de energia oriunda de biomassa, no final dos anos 70, era de apenas 200 MW, subindo para 8,4 GW no início dos anos 1990 (WALTER; NOGUEIRA, 1997). A maioria corresponde a plantas de co-geração, com utilização de resíduos agrícolas e florestais. Embora com eficiência termodinâmica relativamente baixa (18% a 26%), essas plantas têm sido economicamente competitivas. Os custos foram avaliados em cerca de US\$ 1.400,00 por kW instalado e entre US\$ 65,00 e US\$ 80,00 por MWh gerado.

Figura 2 - Potencial de geração de excedente de energia elétrica no setor sucroalcooleiro (por unidade da federação)



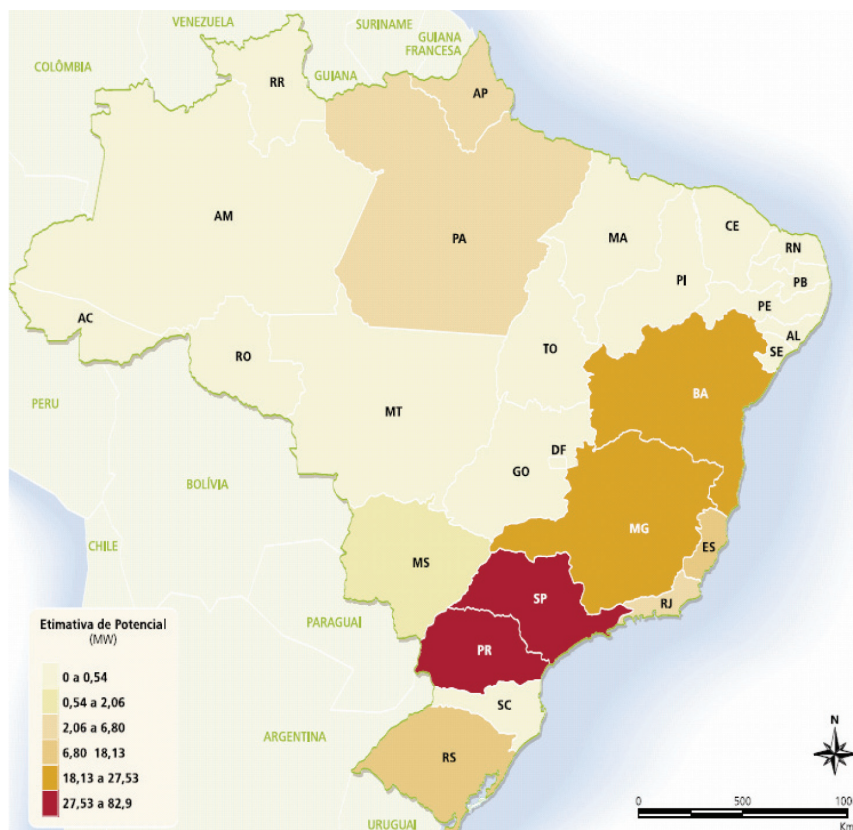
Fonte: Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO, 2003 (adaptado) apud Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2ª edição, 2005.

As metas do Departamento Americano de Energia (DAE) são de 18 GW de capacidade instalada em 2010 e, para 2030, 100 GW. Espera-se que o desenvolvimento de novas tecnologias, como o acoplamento de sistemas de gaseificação e a integração da pirólise às turbinas a gás, aumentem substancialmente a eficiência termodinâmica das plantas e reduza os custos de capital e geração. Em termos de eficiência, estima-se que os índices serão de 35% a 40%. Quanto aos custos, o kW instalado deverá ficar na faixa de US\$ 770 a US\$ 900 e o MWh gerado, entre US\$ 40 e US\$ 50.

No Brasil, a imensa superfície do território nacional, quase toda situada em regiões tropicais e chuvosas, oferece excelentes condições para a produção e o uso energético da biomassa em larga escala. Além dos resíduos da produção de álcool, queima em fornos, caldeiras e outros usos não-comerciais, a biomassa apresenta grande potencial no setor de geração de energia elétrica.

No caso específico do Estado de São Paulo, é intensa a produção de biomassa energética por meio do bagaço cana-de-açúcar (Figura 2). Verifica-se, portanto, que, apesar da produção de biomassa ser mundialmente considerada uma atividade extremamente demandante de terras, mesmo numa região com alta densidade demográfica é possível encontrar áreas para essa atividade. A maior parte da energia dessa biomassa é utilizada na produção de etanol utilizado como combustível.

Figura 3 - Potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos florestais (por unidade da federação)



Fonte: Centro Nacional de Referência em Biomassa – CENBIO, 2003 (adaptado) apud Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2ª edição, 2005.

A produção de madeira em forma de lenha, carvão vegetal ou toras, também gera uma grande quantidade de resíduos que podem igualmente ser aproveitados na geração de energia elétrica. Como ilustrado na Figura 3, os estados brasileiros com maior potencial de aproveitamento de resíduos da madeira oriunda de silvicultura, para a geração de energia elétrica são Paraná e São Paulo. O tipo de produção de madeira, atividade extrativista ou reflorestamento, influi na distribuição espacial dos resíduos gerados. Nos casos de extração seletiva e beneficiamento descentralizado, o aproveitamento de resíduos pode se tornar economicamente inviável.

Tabela 2 – Matriz de energia elétrica brasileira, atualizada em 23.10.2006

Empreendimentos em operação							
Tipo		Capacidade instalada			Total		
		N.º de usinas	kW	%	N.º de usinas	kW	%
Hidro	-	621	73.340.482	70,19	621	73.340.482	70,19
Gás	Natural	74	9.888.408	9,46	101	10.826.156	10,36
	Processo	27	937.748	0,90			
Petróleo	Óleo diesel	553	3.636.947	3,48	572	4.886.297	4,68
	Óleo residual	19	1.249.350	1,20			
Biomassa	Bagaço de cana	225	2.626.675	2,51	267	3.651.199	3,50
	Licor negro	13	785.262	0,75			
	Madeira	25	212.832	0,20			
	Biogás	2	20.030	0,02			
	Casca de arroz	2	6.400	0,01			
Nuclear	-	2	2.007.000	1,92	2	2.007.000	1,92
Carvão mineral	Carvão mineral	7	1.415.000	1,35	7	1.415.000	1,35
Eólica	-	14	186.850	0,18	14	186.850	0,18
Importação	Paraguai		5.650.000	5,46		8.170.000	7,82
	Argentina		2.250.000	2,17			
	Venezuela		200.000	0,19			
	Uruguai		70.000	0,07			
Total		1.584	104.482.984	100	1.584	104.482.984	100

Fonte: www.aneel.gov.br, Banco de Informações de Geração, acesso em 20.10.06.

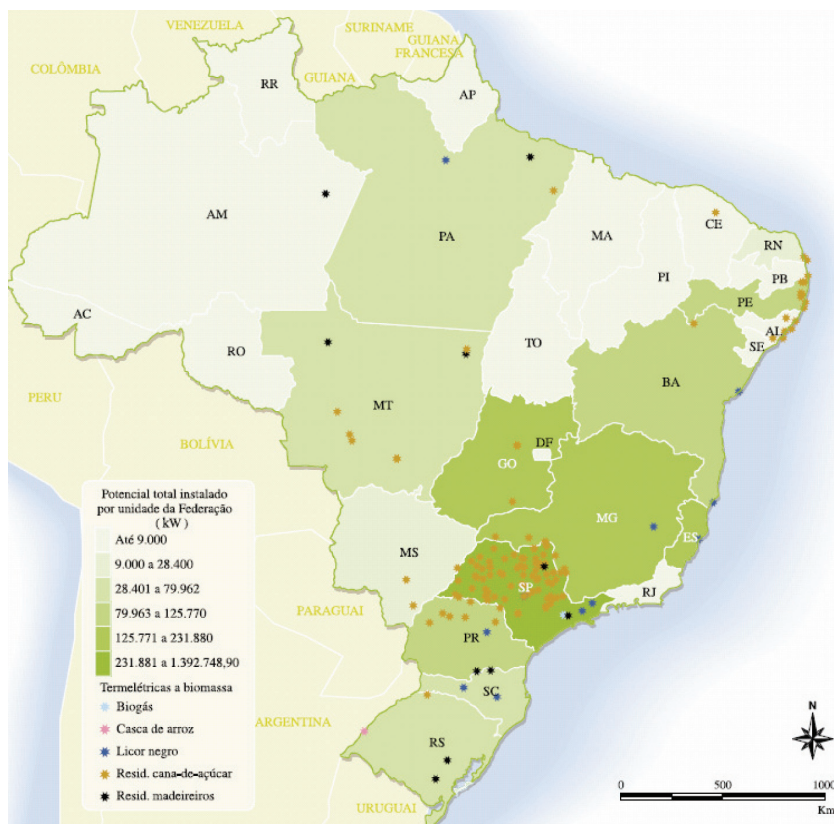
Atualmente, o recurso de maior potencial para geração de energia elétrica a partir de biomassa no País é o bagaço de cana-de-açúcar. A alta produtividade alcançada pela lavoura canavieira, e os ganhos sucessivos nos processos de transformação da biomassa sucroalcooleira, têm disponibilizado enorme quantidade de matéria orgânica sob a forma de bagaço nas usinas e destilarias de cana-de-açúcar. A geração nessas instalações interligadas aos principais sistemas elétricos, que atendem a grandes centros de consumo dos Estados das regiões Sul e Sudeste, torna-se bastante competitiva. 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 ainda mais vantajosa.

O setor sucroalcooleiro gera uma grande quantidade de resíduos, que pode ser aproveitado na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de co-geração. Ao contrário da produção de madeira, o cultivo e o beneficiamento da cana são realizados em grandes e contínuas extensões, e o aproveitamento de resíduos (bagaço, palha, etc.) é facilitado pela centralização dos processos de produção.

Em média, cada tonelada de cana processada requer cerca de 12 kWh de energia elétrica, o que pode ser gerado pelos próprios resíduos da cana (palha, bagaço, vinhaça, etc.). Os custos de geração já são competitivos com os do sistema convencional de suprimento, o que possibilita a auto-suficiência do setor em termos de suprimento energético, por meio da co-geração. É apresentado, na Tabela 2, a Matriz de Energia Elétrica Brasileira, onde verifica-se a presença de 267 usinas a biomassa em funcionamento, sendo que 225 são alimentadas com bagaço de cana-de-açúcar.

A Figura 4 apresenta a localização das Usinas Termelétricas a biomassa em operação no país. Verifica-se grande destaque para o Estado de São Paulo (maior produtor brasileiro de cana-de-açúcar), no que diz respeito à geração de energia por resíduos provenientes da cana.

Figura 4 – Usinas termelétricas a biomassa em operação e potência instalada por estado – situação em setembro de 2003



Fonte: Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2ª edição, 2005.

Foram habilitados tecnicamente para o Leilão de Energia Nova (A-5 em 2006, 107 empreendimentos, sendo 17 termelétricas a biomassa. Todas essas usinas apresentaram, como combustível, o bagaço da cana-de-açúcar (www.epe.gov.br/Lists/Leilao/AllItems.aspx, acesso em 20.10.06).

O PROINFA – Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia – MME e criado pela Lei nº 10.438 de 26 de abril de 2002, é um importante instrumento para a diversificação da matriz energética nacional, garantindo maior confiabilidade e segurança ao abastecimento. O Programa estabelece a contratação de 3.300 MW de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN), produzidos por fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), sendo 1.100 MW de cada fonte. A energia produzida pelas unidades geradoras selecionadas será adquirida pela Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (Eletrobrás). Os contratos dos geradores com a Eletrobrás terão duração de 20 anos, contados a partir da entrada em operação (http://www.mme.gov.br/programs_display.do?prg=5). Os benefícios obtidos pela implantação do PROINFA são divididos em cinco categorias, sendo:

- Social: geração de 150 mil postos de trabalho diretos e indiretos durante a construção e a operação, sem considerar o efeito-renda;
- Tecnológico: investimentos de R\$ 4 bilhões na indústria nacional de equipamentos e materiais;
- Estratégico: complementaridade energética sazonal entre os regimes hidrológico/eólico (NE) e hidro-

lógico/biomassa (SE e S). A cada 100 MW médios produzidos por parques eólicos, economizam-se 40 m³/s de água na cascata do rio São Francisco;

- Meio ambiente: a emissão evitada de 2,5 milhões de t CO₂/ano criará um ambiente potencial de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de Quioto;
- Econômico: investimento privado da ordem de R\$ 8,6 bilhões.

Adicionalmente, o mercado externo apresenta-se como bastante promissor em relação ao futuro do álcool combustível. As metas estabelecidas pelo Protocolo de Quioto, que serão contabilizadas a partir de 2008, juntamente com a elevação do preço do petróleo despertam o interesse internacional por combustíveis produzidos a partir de fontes renováveis (Diretrizes de Política de Agroenergia 2006-2011, 2005).

■ 1.1. A Agricultura da energia

Sob o conceito de biomassa, e segundo o Plano Agroenergético do Brasil três grandes vertentes dominam o mercado da agricultura de energia: os derivados de produtos intensivos em carboidratos ou amiláceos, como o etanol; os derivados de lipídios, como o biodiesel; e os derivados de madeira e outras formas de biomassa, como briquetes ou carvão vegetal.

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. Nesse particular, a área de expansão de cerrados, a integração pecuária-lavoura, a recuperação de pastagens, a ocupação de áreas de pastagens degradadas e outras áreas antropizadas, as áreas de reflorestamento e a incorporação de áreas atualmente marginais, pode aproximar-se de 200 milhões de hectares/ano, quando projetado o longo prazo (2030). Mesmo no médio prazo, o Brasil pode incorporar metade desse quantitativo, caso sejam viabilizadas as demais condições para a expansão da área (capitais, logística, insumos, mercado, etc).

O segundo aspecto a considerar é a possibilidade de múltiplos cultivos dentro do ano- calendário. O sistema de safra e safrinha, ou de cultivo de inverno e duplo cultivo de verão, já é o paradigma dominante na produção de grãos no país. Uma faceta importante do modelo é o surgimento de “janelas produtivas”, ou seja, períodos do calendário com riscos razoáveis para a cultura principal, porém com riscos aceitáveis para outras culturas, menos exigentes em recursos hídricos, como mamona ou girassol, o que viabiliza um nicho interessante para a agricultura de energia, a reboque de custos fixos amortizados, ou variáveis parcialmente amortizados.

Por situar-se, predominantemente, na faixa tropical e subtropical do planeta, o Brasil recebe intensa radiação solar, ao longo do ano. Também em decorrência de sua extensão e localização geográfica, o Brasil apresenta três outras vantagens comparativas importantes. A primeira é a diversidade de clima, o que permite administrar de forma mais flexível, o risco climático. O segundo aspecto é a exuberância de sua biodiversidade, o que significa que o Brasil necessita exercitar opções de novas alternativas associadas à agricultura de energia – selecionando aquelas que lhe forem mais convenientes - ao invés de depender de uma única espécie, como é o caso da Europa ou dos Estados Unidos. Finalmente, o Brasil detém um quarto das reservas superficiais e sub-superficiais de água doce, o que permite o desenvolvimento de culturas irrigadas, na super-veniência de condições climáticas desfavoráveis.

O sinergismo entre as vantagens comparativas naturais (solo, água, mão-de-obra, e radiação solar

intensa e abundante) e as captações de capital proveniente de projetos vinculados aos Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, tornarão o País ainda mais atrativo para macro-investidores. Esses capitais comporão um “portfólio” de investimento direto na produção, além de auxiliar na formação de uma logística adequada para o armazenamento e o escoamento da produção (comunicações, tancagem, ferrovias, hidrovias e instalações portuárias). Também existe a expectativa que o setor de P&D também será beneficiado com o aporte de recursos, o que permitirá ao Brasil manter-se no estado da arte da tecnologia da agroenergia. Isso posto, entende-se que a agricultura de energia poderá vir a ser a opção mais vantajosa do agronegócio brasileiro, no médio e longo prazo.

■ 1.2. Conceituação de biomassa e resíduo

Do ponto de vista energético, para fins de outorga de empreendimentos do setor elétrico, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica que pode ser utilizada na produção de energia.

Embora grande parte do planeta esteja desprovida de florestas, a quantidade de biomassa florestal existente na terra é da ordem de dois trilhões de toneladas, o que significa cerca de 400 toneladas per capita. Em termos energéticos, isso corresponde a mais ou menos 3.000 EJ (EJ = exa joule, que equivale a 10^{18} J) por ano, ou seja, oito vezes o consumo mundial de energia primária que é da ordem de 400 EJ por ano (RAMAGE; SCURLOCK, 1996).

A médio e longo prazo, a exaustão de fontes não-renováveis e as pressões ambientalistas poderão acarretar maior aproveitamento energético da biomassa. Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por intermédio da combustão em fornos, caldeiras, etc. Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais, tecnologias de conversão mais eficientes vêm sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas, como a gaseificação e a pirólise, também sendo comum a cogeração em sistemas que utilizam a biomassa como fonte energética e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica.

O termo resíduo engloba os diversos objetos utilizados pelo homem que tenham perdido sua utilidade para cumprir o fim a que foram destinados inicialmente (VOIGT et al, 1999) - diferentemente do significado usual de lixo como sujeira. Entretanto, a reutilização de resíduos, que se pode efetivar de várias formas (reciclagem, recuperação do biogás, compostagem, reutilização direta), é importante quanto aos aspectos ambientais, sanitários, sociais, energéticos e econômicos, aproximando-se da visão de que resíduo pode significar matéria-prima fora do lugar ou dinheiro jogado fora.

Os resíduos definidos como sólidos pela Norma Brasileira NBR 10.004 são aqueles: “(...) resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Considera-se também, resíduo sólido os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível” (ABNT, 2004).

■ 1.3. Biomassa moderna versus biomassa tradicional

A biomassa (lenha) é usada desde os tempos antigos como fonte de energia das sociedades sem, no entanto, apoiar-se em produção sustentável. Por este motivo, durante muito tempo o termo biomassa foi associado à idéia de desmatamento. Somente no século XX, teve início o uso da biomassa moderna, com o programa do álcool no Brasil (Proálcool) e a prática do reflorestamento para produção de madeira.

A biomassa tradicional é utilizada como fonte de energia primária para cerca de 2,4 bilhões de pessoas em países em desenvolvimento (IEA, 2002). Observa-se, assim, que a biomassa é uma importante fonte de energia para estes países e que o modo como esse combustível é utilizado pode ser aperfeiçoado, por meio de tecnologias mais eficientes promovendo melhorias socioambientais, tais como a redução dos níveis de poluição, aumento da qualidade de vida, geração de emprego e renda.

Os trabalhos mais recentes (KAREKESI et al, 2005) têm classificado a biomassa em três categorias, de acordo com a tecnologia empregada na sua utilização energética. São elas:

- **tecnologias tradicionais de uso da biomassa (ou biomassa tradicional):** combustão direta de madeira, lenha, carvão vegetal, resíduos agrícolas, resíduos de animais e urbanos, para cocção, secagem e produção de carvão;
- **tecnologias “aperfeiçoadas” de uso da biomassa (ou biomassa “aperfeiçoada”):** tecnologias aperfeiçoadas e mais eficientes de combustão direta de biomassa, tais como fogões e fornos.
- **tecnologias modernas de uso da biomassa (ou biomassa moderna):** tecnologias avançadas de conversão de biomassa em eletricidade e o uso de biocombustíveis.

Outra classificação foi apresentada por NOGUEIRA (2005) e caracteriza a sustentabilidade da biomassa a partir da relação entre oferta e demanda. Afinal, a identificação de um sistema não-sustentável é simples e direta (Figura 5). Porém, a determinação exata da sustentabilidade de um sistema energético é mais complexa. Por exemplo, quando a demanda de lenha supera a oferta, e o consumo / extração passa a ser maior do que a capacidade de regeneração da floresta, este sistema não é sustentável. Já a sustentabilidade do uso de recursos naturais é de mais complexa determinação, pois existem outros fatores envolvidos, necessitando uma análise criteriosa de aspectos sociais, econômicos e ambientais.

Figura 5 - Condições de sustentabilidade



Fonte: Nogueira, 2005

São consideradas “biomassas modernas”, os biocombustíveis (etanol e biodiesel), madeira de reflorestamento, bagaço de cana-de-açúcar e outras fontes desde que utilizadas de maneira sustentável, utilizadas em processos tecnológicos avançados e eficientes.

As chamadas “biomassas tradicionais” são aquelas não sustentáveis, utilizadas de maneira rústica, em geral para suprimento residencial (cocção e aquecimento de ambientes) em comunidades isoladas. Pode-se destacar a madeira de desflorestamento, resíduos florestais e dejetos de animais (KAREKESI; COELHO; LATA, 2004).

Existem diversas experiências com o uso de biomassa moderna; um exemplo são os biocombustíveis. No Brasil, o Programa do Álcool, por meio da obrigatoriedade da utilização do etanol de cana-de-açúcar em todos os veículos leves do País, foi responsável pelo crescimento do setor sucroalcooleiro que promoveu o desenvolvimento tecnológico de processos industriais e da agroindústria e atualmente é responsável por 700 mil empregos diretos e mais de 3,5 milhões de empregos indiretos (COELHO, 2005). Programas de utilização de biocombustíveis estão sendo disseminados pelo mundo, como mostra o exemplo da Colômbia, onde a legislação federal prevê a adição de 10% de etanol na gasolina, nas sete maiores cidades do País, o que deverá acontecer até 2006.

Outro exemplo de uso de biomassa moderna acontece nas ilhas Maurício, onde a co-geração de energia a partir de resíduos de cana-de-açúcar foi responsável em 2002, pelo atendimento de 40% da demanda nacional de eletricidade. Neste país, a utilização de biomassa foi responsável pela redução da dependência externa de petróleo, a diversificação da matriz energética e a melhoria da eficiência de geração no setor energético como um todo (VERAGOO, 2003 *apud* KAREKESI *et al*, 2005).

Em geral a biomassa é considerada fonte renovável de energia, entretanto é necessário esclarecer que nem sempre é utilizada de maneira sustentável.

■ 1.4. Biomassa vegetal

■ 1.4.1. Florestas energéticas e industriais

Florestas energéticas são aquelas cultivadas com a finalidade de obter lenha, carvão vegetal, briquetes e licor negro, cujo objetivo principal é alimentar a indústria de celulose e a indústria moveleira. Em ambas são aproveitados os galhos, gravetos, cavacos e serragem como biomassa energética.

Na produção de florestas, o Brasil apresenta atualmente vantagens extraordinárias. Em pólos florestais como a Escandinávia, Península Ibérica e Canadá, as florestas implantadas crescem de dez a trinta metros cúbicos por ha/ano, enquanto no Brasil, crescem de cinquenta a setenta metros cúbicos/ha/ano. Alguns bosques de eucalipto plantados pela indústria de celulose no sul da Bahia chegam a atingir o crescimento de cem metros cúbicos/ha/ano. São matas obtidas pela implantação de mudas clonadas por reprodução meristemática de árvores previamente escolhidas por seleção fenotípica.

O solo recebe adubação racional em macro e micro nutrientes. A engenharia florestal brasileira está muito avançada em biotecnologia, existindo projetos em desenvolvimento para obter árvores com menor teor de lignina, cuja madeira exigirá menor quantidade de insumos químicos no processo de redução desta substância para liberar as fibras de celulose. Isso diminuirá consideravelmente o impacto ambiental do processo. Culturas não florestais produtoras de biomassa energética vêm sendo desenvolvidas.

A Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária criou variedades de capim-elefante, que denominou capim-guaçu, cuja produção atinge sessenta toneladas de biomassa seca por ha/ano. O plantio de florestas está em expansão no Brasil, embora a área plantada ocupe apenas 1% do território nacional. O potencial agricultável é muito grande em zonas degradadas, sem precisar avançar em locais de preservação, ou vegetação primária. Os Estados com maiores áreas de florestas plantadas são Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina, Bahia e Espírito Santo.

Florestas naturais manejadas adequadamente, processo já regulamentado por Lei, são fontes inesgotáveis de biomassa. O manejo florestal consiste na retirada planejada de árvores adultas e reposição de mudas

novas em seu lugar, de forma que a floresta tenha maior número de plantas em crescimento. Assim, estará aumentando a capacidade florestal depuradora da atmosfera, seqüestrando CO_2 , e transformando-o em celulose. Projetos florestais de implantação e manejo podem ser caracterizados e formatados como Mecanismos de Desenvolvimento Limpo – MDL, preconizados no Protocolo de Quioto, gerando negócios no já existente mercado mundial de carbono.

■ 1.4.2. Resíduos agrícolas e agroindustriais

É enorme o potencial dos resíduos agrícolas e agroindustriais como biomassa energética. Cascas, palhas, bagaços de vegetais, transformados tecnologicamente, se constituem em cadeias de insumos energéticos e industriais. Como exemplo eloqüente existe o bagaço da cana-de-açúcar. Na safra 2005/2006, a produção de cana no Brasil atingiu quatrocentos e quarenta milhões de toneladas. Esse volume contém cerca de cento e vinte milhões de toneladas de bagaço que, se queimado adequadamente em caldeiras de alta pressão, poderá gerar o equivalente a 50 GW de energia elétrica, quatro vezes a geração de Itaipu.

O setor sucroalcooleiro brasileiro é auto-suficiente em energia, queimando bagaço, que é um resíduo do processamento da cana. Mais que 10% das usinas e destilarias de açúcar e álcool brasileiras estão vendendo energia excedente de seu consumo ao sistema nacional de abastecimento energético.

Sistemas de bactérias desenvolvidos em meio de cultura, formado por resíduos agrícolas, produzem resinas vegetais que substituem polímeros petroquímicos. Os avanços da biotecnologia apontam para um futuro ambientalmente sustentável.

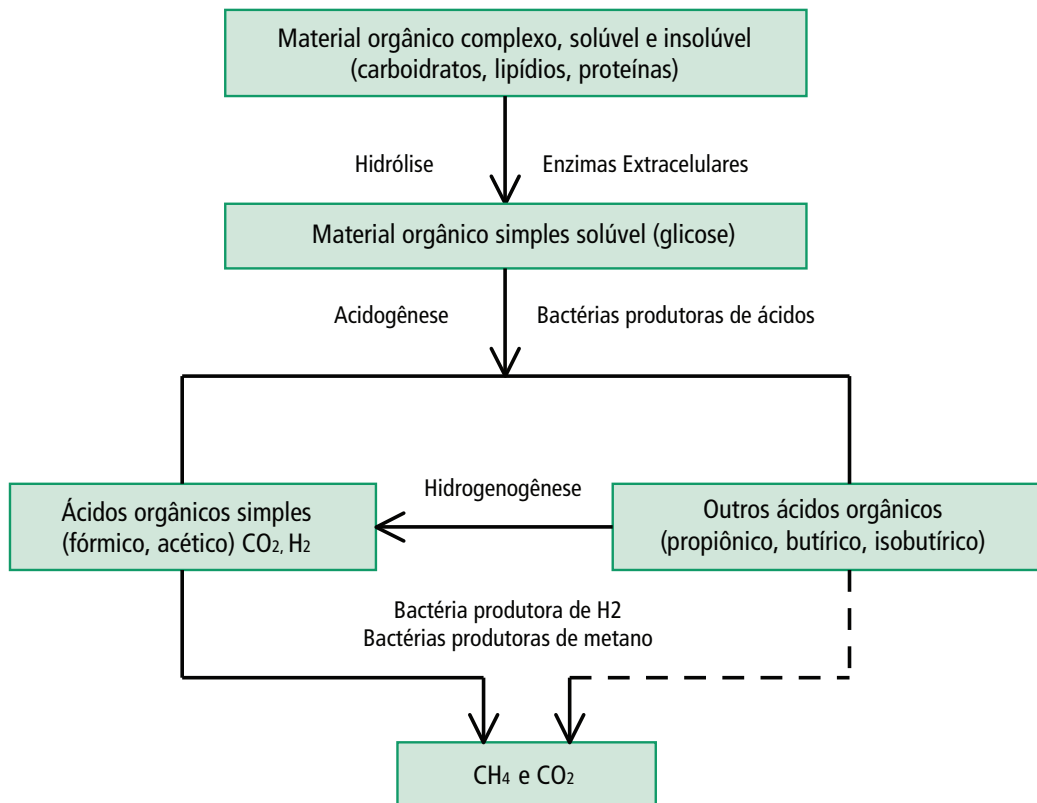
Entretanto, como elo fundamental desta imensa cadeia de desenvolvimento, está a agricultura. Para que possa cumprir adequadamente este papel, é preciso que esteja viva, saudável e com sua importância reconhecida pela sociedade e pelos governos. Possuindo essas condições, o mercado agroenergético poderá transformar em riqueza o incomparável potencial comparativo que o país detém.

■ 1.4.3. Resíduos orgânicos

Os resíduos sólidos oriundos dos setores industrial, comercial e residencial poderiam, após recolhidos, passarem por um sistema de gerenciamento que identificaria sua destinação, em função de algumas características. Esta destinação poderia ser para a reciclagem, para a compostagem ou para a geração de energia – a partir da queima, da gaseificação direta ou através do biogás (também chamado de GDL – gás do lixo) de um aterro energético – ou, ainda, para um aterro sanitário.

Relativamente ao grande volume de resíduos provenientes das explorações agrícolas e pecuárias, assim como aqueles produzidos por matadouros, destilarias, fábricas de laticínios, esgotos domésticos e estações de tratamento de lixo urbanos (a partir dos quais é possível obter biogás), estes apresentam uma carga poluente de tal forma 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.

Figura 6 – Etapas metabólicas do processo de digestão anaeróbia em biodigestores



Fonte: Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011, 2005.

Assim, o tratamento desses efluentes pode processar-se por intermédio da fermentação anaeróbica que, além da 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.

Atribui-se o nome de biogás à mistura gasosa, combustível, resultante da fermentação anaeróbica da matéria orgânica. A Figura 6 apresenta as etapas metabólicas da produção anaeróbica de biogás.

A proporção de cada gás na mistura depende de vários parâmetros, como o tipo de digestor e o substrato a digerir. De qualquer forma, esta mistura é essencialmente constituída por metano (CH₄), com valores médios na ordem de 60 a 65%, e por dióxido de carbono (CO₂), com aproximadamente 35 a 45% de sua composição. A Tabela 3 apresenta a composição média do biogás.

O poder calorífico do biogás é diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa, o qual 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.

Tabela 3 – Composição média do biogás

Tipo de gás	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: SGANZERLA, 1983.

Neste momento, existem duas situações 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 exploração pecuária auto-suficiente em termos energéticos, bem como contribuir para a resolução de problemas de poluição de efluentes.

Em vários países, o biogás é produzido em aterros sanitários e aplicado como fonte energética em processos sanitários, e em alguns casos existe até a comercialização do biogás para uso nas indústrias. Em São Paulo, o biogás chegou a ser utilizado, experimentalmente, em caminhões de coleta de lixo.

Tabela 4 - Estimativas de emissão de metano em aterros sanitários

País	Emissões estimadas (milhões t/ano)
EUA	8 – 12
Reino Unido	1 – 3
Brasil	0,7 – 2,2
Índia	0,2 – 0,8
Polônia	0,1 – 0,4
Outros	11 – 39
Total	21 – 57

Fonte: MUYLAERT, 2000.

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 (MUYLAERT, 2000), o que pode ser visto na Tabela 4. Ainda que cerca de dois terços destas emissões sejam de países desenvolvidos, a contribuição relativa dos países em desenvolvimento está mudando rapidamente e, devido às tendências de crescimento populacional e urbanização, bem como às necessidades de crescimento econômico, estes serão responsáveis por uma parcela cada vez maior das emissões de metano (OLIVEIRA, 2004).

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. Se o metano for utilizado para a geração de energia em substituição ao combustível fóssil, esta redução de impacto será mais significativa, sendo possível a cada unidade elétrica gerada com resíduos (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 5 apresenta a comparação do biogás com outras fontes energéticas.

Tabela 5 – Equivalência entre biogás e outros combustíveis

Combustível	1 m³ de Biogás equivale a:
Gasolina	0,613 L
Óleo diesel	0,553 L
GLP	0,454 kg
Lenha	1,536 kg
Elettricidade	1,428 kW

Fonte: BARRERA, 1993.

■ 1.4.4. Óleos vegetais

Óleos vegetais são gorduras ou ácidos graxos extraídos dos grãos das oleaginosas e outras espécies vegetais. Podem ser usados como óleo bruto após esmagamento e filtragem. Os óleos vegetais podem ser otimizados como combustível através de várias tecnologias como craqueamento catalítico, alcoolize e vários outros processos que se encontram em desenvolvimento.

O biodiesel é um combustível que pode ser fabricado a partir de uma série de matérias-primas (óleos vegetais diversos, gordura animal, óleo de fritura) através dos processos de transesterificação e craqueamento. O processo que tem apresentado resultados técnico-econômicos mais satisfatórios é a transesterificação. Nesse processo ocorre uma reação entre o óleo vegetal e um álcool (metílico ou etílico) na presença de um catalisador, e seus produtos são um éster de ácido graxo (biodiesel) e glicerina.

A utilização do biodiesel é bastante difundida principalmente na Europa Ocidental, onde a produção anual em 2003 atingiu 2,5 – 2,7 milhões de toneladas. A Alemanha é o maior produtor mundial, respondendo por 42% da produção de 2002 (FULTON *et al*, 2004). Nestes países, o biodiesel é produzido a partir da reação de transesterificação entre o óleo de canola e o metanol derivado do gás natural ou petróleo (NOGUEIRA; MACEDO, 2005).

No caso brasileiro, deverão ser utilizados óleos vegetais de diversas oleaginosas. Por exemplo, óleo de palma na região Norte, óleo de mamona na região Nordeste, óleo de soja na região Centro-Oeste. O álcool utilizado na reação será o etanol, produzido a partir da cana-de-açúcar. Sendo assim, o biodiesel produzido será um combustível totalmente renovável. A Tabela 6 apresenta as características principais de alguns vegetais que podem produzir biodiesel.

Tabela 6 – Características de vegetais que podem produzir biodiesel

Espécie	Origem do óleo	Conteúdo de óleo (%)	Meses de colheita	Rendimento em óleo (t/ha)
Dendê / Palma	Amêndoa	26	12	3,0 - 6,0
Babuaçu	Amêndoa	66	12	0,4 - 0,8
Girassol	Grão	38-48	3	0,5 - 1,5
Colza	Grão	40-48	3	0,5 - 0,9
Mamona	Grão	43-45	3	0,5 - 1,0
Amendoim	Grão	40-50	3	0,6 - 0,8
Soja	Grão	17	3	0,2 - 0,6
Algodão	Grão	15	3	0,1 - 0,2

Fonte: Scientific American Brasil, ano 5 – nº 53. 2006.

O Governo Federal estabeleceu o Plano Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB). Seus objetivos são a implantação sustentável do programa do biodiesel, promovendo a inclusão social, garantia de preços competitivos, suprimento, qualidade e produção de biodiesel a partir de diferentes oleaginosas, em todo o território nacional.

Em 13 de janeiro de 2005, foi publicada a Lei nº 11.097, que dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, estabelece a obrigatoriedade da adição de um percentual mínimo de biodiesel ao óleo diesel vendido ao consumidor final em qualquer parte do território nacional. Esse percentual obrigatório será de 5% a partir de janeiro de 2013, oito anos após a publicação desta Lei, havendo um percentual obrigatório intermediário de 2% três anos após a publicação da mesma.

O Decreto nº 5.298, de 6 de dezembro de 2004, autoriza, a partir da data de sua publicação, a adição de até 2% de biodiesel ao diesel vendido no Brasil. A mistura já pode ser encontrada em alguns postos de combustível nos Estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Goiás e no Distrito Federal (www.biodiesel.gov.br).

■ 1.5. Características físico-químicas de diferentes biomassas

Na Tabela 7 são apresentadas, para diferentes classes de biomassa, algumas características físico-químicas de importância no processo de geração de energia elétrica.

Tabela 7 - Características físico-químicas de diferentes biomassas

Biomassa	Massa específica	Poder calorífico superior
Biodiesel	8,7 a 8,9 kg/m ³	9.400 a 10.000 kcal/kg
Biogás	0,716 kg/m ³	5.600 a 5.800 kcal/m ³
Óleo de dendê palma	8,6 a 9,5 kg/m ³	9.450 kcal/kg
Cana-de-açúcar	150 kg/m ³	Var.
Madeira (florestas)	Var.	3.800 a 4.500 kcal/m ³
Resíduo urbano	Var.	1.500 kcal/kg

Fonte: Lactec / EPE, 2006.

2. Impactos potenciais da tecnologia de geração termelétrica a partir da biomassa

Nesta seção são discutidos os impactos negativos causados durante a produção de energia elétrica a partir da biomassa. Os demais impactos causados ao longo da cadeia energética completa são apresentados na Seção 3.

Para a indicação inicial dos impactos da produção de energia elétrica a partir da biomassa foi utilizada como base a proposta adotada pelo Comitê Coordenador das Atividades de Meio Ambiente do Setor Elétrico - COMASE, quando estabeleceu o “Referencial para Orçamento dos Programas Socioambientais”, abordando usinas hidroelétricas, usinas térmicas convencionais e sistemas de transmissão, trabalhos estes publicados em 1994 (COMASE, 1994), adaptado para fins desta Nota Técnica.

Os impactos socioambientais discutidos nesta seção referem-se a qualquer alteração nas características físicas, químicas ou biológicas do ambiente, causada por qualquer forma de material ou energia resultante de uma atividade humana, que direta ou indiretamente afete a saúde humana, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições sanitárias e estéticas do ambiente e a qualidade dos recursos naturais.

Cabe salientar que a biomassa sustentável, bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo, apresenta balanço praticamente nulo de emissões de CO_2 , pois essas, resultantes da queima do bagaço, são absorvidas e fixadas pela planta durante o seu crescimento.

A utilização de biomassa apresenta, ainda, um benefício indireto, através da utilização de biocombustíveis, como tem sido observado no Brasil desde a adoção do etanol como combustível (total ou parcialmente) em toda a frota de veículos leves. Dados da CETESB (Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo) revelam que os níveis de emissão de monóxido de carbono foram reduzidos em cerca de 50% (CETESB, 2004).

Além de ambientalmente favorável, o aproveitamento energético e racional da biomassa tende a promover o desenvolvimento de regiões menos favorecidas economicamente, por meio da criação de empregos e da geração de receita local/regional, contribuindo para reduzir o êxodo rural e a dependência externa de energia.

A Tabela 8 apresenta os impactos socioambientais causados durante a construção e operação normal de usinas termelétricas a biomassa. A tabela apresenta os impactos de uma forma geral, uma vez que os impactos específicos causados por uma usina em particular dependem do tipo de usina, das condições do sítio e das práticas de gerenciamento empregadas pelo pessoal da empresa operadora. A Tabela apresenta a seguinte estrutura:

Coluna 1: Identificação das possíveis causas (aspectos) dos impactos socioambientais;

Coluna 2: Tipos de impactos socioambientais que possam ocorrer devido às causas indicadas na coluna 1. Os impactos estão listados de forma genérica, sem considerar as características específicas da usina e a efetividade das medidas que objetivam evitar ou mitigar os impactos indicados.

Coluna 3: Tempo de ocorrência do impacto (construção, operação ou pós-operação).

Coluna 4: Identificação dos programas e medidas que possam ser utilizadas para mitigar os impactos ou compensar a população, direta ou indiretamente envolvida pelo projeto, pelos danos causados. Tais medidas podem ser adaptadas para cada tipo de usina, tanto durante o projeto ou por ocasião de uma possível parada para introduzir melhorias em uma usina em operação, processo estes ("retrofit") que são utilizados freqüentemente. Muitas das medidas indicadas podem ser implantadas simultaneamente.

Tabela 8 - Impactos socioambientais decorrentes da construção e operação de usinas termoeletricas a biomassa

Aspectos	Impactos	TO	Medidas mitigadoras ou compensatórias / Projetos / Programas
Ocupação do solo (preparação, terraplenagem, desmatamento, etc.)	- interferência com população local - interferência com flora e fauna - produção de ruído e poeira - erosão do solo - alteração do uso do solo - emissão de gases de efeito estufa e causadores de deposição ácida pelas máquinas e caminhões utilizando derivados de petróleo	C	Compensação monetária ou permuta de áreas Recuperação das áreas degradadas Arborização - criação de cinturões verdes Utilização de sistemas anti-poeiras Regulagem das máquinas utilizadas evitando produção de ruídos e emissões desnecessárias
Transporte de equipamento pesado	- poluição sonora - perturbação do trânsito local	C	Planejamento do sistema de tráfego de modo a se evitar os horários de pico
Movimentos migratórios causados pela construção da usina	- aumento da demanda por serviços públicos, habitação e infra-estrutura de transporte - alteração da organização sócio-cultural e política da região - aumento das atividades econômicas da região com possível posterior retração após o término do empreendimento.	C/O	Apoio na construção do Plano Diretor do Município Adequação das infra-estruturas de habitação, educação e transporte Gestão institucional
Distorção estética	poluição visual	C/O	Projetos paisagísticos e arquitetônicos para redução do impacto visual
Produção de efluentes sanitários	- disseminação de doenças - diminuição de oxigênio dissolvido nos corpos receptores - interferência com fauna e flora aquáticas	C/O	Utilização de sistemas compactos para tratamento de esgotos (separado do tratamento de outros efluentes líquidos)
Produção de Ruído	poluição sonora no interior e fora da usina	C/O	Projetos e programas específicos para redução de ruído Monitoramento de ruídos
Produção de emissões aéreas de material particulado	Dependendo da concentração: - problemas respiratórios - interferência na flora e na fauna - efeito estético indesejável	O	Remoção dos inertes após a combustão (filtros) Dispersão em chaminés adequadas Utilização de tecnologias modernas de combustão com maior eficiência Monitoramento das emissões
Produção de emissões aéreas de dióxido de carbono (CO ₂)	Contribuição para o efeito estufa	O	Manejo da plantação na região para fixação do carbono Utilização de tecnologias modernas de combustão com maior eficiência (gaseificação, pirólise)
Vazamentos involuntários do sistema de manuseio e estocagem de combustíveis líquidos	- Contaminação dos cursos de água - Interferência na flora e fauna aquáticas	O	Sistemas de retenção de óleo (caixas separadoras, diques de contenção e bacias de emergência) Impermeabilização das áreas de estocagem
Efluentes líquidos da drenagem pluvial, lavagens, tratamento de água e purgas de processo	- elevação do teor de sólidos suspensos e dissolvidos - interferência na flora e fauna aquáticas - contaminação do lençol freático	O	Implantação de sistemas enclausurados de manuseio de combustível sólido e cinzas Cuidados operacionais evitando o espalhamento de partículas combustíveis e cinzas no pátio da usina Bacias de sedimentação e neutralização Monitoramento dos efluentes líquidos
Produção de efluentes provenientes do sistema de água de resfriamento	Dependendo da tecnologia empregada: <u>Sistema aberto:</u> - elevação da temperatura da água no corpo receptor - redução de oxigênio dissolvido - interferência com fauna e flora aquáticas <u>Sistema fechado/torre úmida:</u> - névoa quimicamente ativa (biocidas e agentes anti-corrosivos) - redução da visibilidade - interação da névoa úmida com a pluma da chaminé (causando acidificação da atmosfera) <u>Sistema fechado/torre seca de refrigeração:</u> - alguns (pequenos) impactos na atmosfera e recursos hídricos	O	Estudos de dispersão térmica no corpo receptor de água Avaliação dos impactos no ecossistema aquático Monitoração do ecossistema Utilização de torres com sistemas de diminuição de névoa ("demisters") Localização das torres levando em conta os ventos predominantes na região Medidas para evitar a superposição da névoa com a pluma Verificação da interferência aerodinâmica da torre de refrigeração com as condições de dispersão da pluma da chaminé

Fonte: MME/ELETRÓBRÁS/COMASE. Referencial para Orçamentação dos Programas Socioambientais. Vol II – Usinas Termelétricas. Rio de Janeiro, 1994 (adaptado para usinas a biomassa)

Legenda: TO = Tempo de Ocorrência; C = Construção; O = Operação; PO = Pós-operação

3. Impactos causados pelas instalações e atividades da cadeia de produção energética

Nesta seção, são abordados os impactos associados com a cadeia completa de produção energética, a partir da biomassa. O objetivo primordial desta abordagem é de ilustrar a ampla gama de rejeitos e emissões que devem ser considerados em qualquer comparação entre as diversas fontes de energia. São indicados, sempre que possível, as características básicas e valores aproximados das grandezas envolvidas, devendo-se sempre tomar em consideração que as quantidades de rejeitos e emissões por unidade de energia elétrica produzida podem ser reduzidas significativamente com a evolução da tecnologia e com melhoria de práticas operacionais, mesmo para usinas já existentes.

■ 3.1. A Necessidade de consideração dos impactos da cadeia energética

Embora somente uma etapa dentro da cadeia energética de cada combustível, a geração de energia por usinas termelétricas, seja de responsabilidade direta do setor elétrico, é fundamental que, na comparação de todas as opções disponíveis, sejam considerados os impactos da cadeia energética completa.

Por isso, o setor elétrico também é indiretamente responsável pelos eventuais impactos de toda a cadeia energética. Assim, não só o gerenciamento de emissões, efluentes e resíduos, que são de responsabilidade direta do setor elétrico, devem ser considerados, mas também os impactos da cadeia energética completa que podem afetar a sociedade como um todo.

■ 3.2. Impactos da cadeia energética

As cadeias energéticas – fóssil, nuclear e energias renováveis – apresentam várias opções tecnológicas, cada uma delas produzindo uma gama de rejeitos e efeitos socioeconômicos. A cadeia de produção energética a partir da biomassa (devido à sua relevância, foi considerada, nessa análise, o bagaço da cana-de-açúcar) inclui várias etapas que variam de acordo com a tecnologia empregada, podendo, no entanto, ser generalizada no seguinte:

■ 3.2.1. Plantação das culturas de cana-de-açúcar

Alguns pontos importantes que devem ser levados em consideração são a seleção cuidadosa do local e da variedade a ser plantada, além do manejo eficiente do plantio. As paisagens e a visibilidade, o tipo de solo, o uso da água, o acesso aos veículos, a conservação da natureza, a arqueologia, pragas e doenças e o acesso ao público também são fatores que devem ser levados em conta.

Em São Paulo, de modo geral, planta-se de outubro a março e colhe-se de maio a outubro enquanto que nos estados produtores do Nordeste o plantio se faz de julho a novembro e a colheita de dezembro a maio.

Apresentam-se a seguir, alguns impactos relevantes que podem ser oriundos desse tipo de cultura e de sua expansão, caso não sejam observados princípios e critérios compatíveis com a prática sustentável na agricultura.

- Alteração no uso e ocupação do solo (alteração da cobertura vegetal)

A cultura de cana-de-açúcar ocupa grandes porções de área. A terra a ser utilizada deve ser essencialmente agrícola e os plantios energéticos não devem nunca ser implementados em terras usadas para práticas que tenham um valor ecológico maior. É importante que as áreas utilizadas na expansão das culturas sejam áreas

já antropizadas (como por exemplo pastos) ou degradadas, evitando o uso de áreas de fronteira agrícola (que em geral, se dá sobre áreas de vegetação primária).

- Ocorrência de processos erosivos e conseqüente assoreamento dos corpos d'água superficiais

O manejo predatório da área da cultura pode causar processos erosivos e assoreamento dos corpos hídricos. As principais causas da erosão são o desmatamento de encostas e margens de rios, as queimadas e o uso inadequado de maquinários e implementos agrícolas, que aceleram o processo erosivo. Segundo o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), cada hectare cultivado no país perde, em média, 25 toneladas de solo por hectare. Isso significa perda anual de cerca de um bilhão de toneladas ou cerca de um centímetro da camada superficial do solo de todo o País (http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/prog_projetos/agricultura/agr_soja/agr_soja_problemas/agr_soja_problemas_erosao/index.cfm, acesso em 20.10.06). Sugere-se como medida mitigadora, a implantação de boas práticas de manejo do solo.

- Alteração da qualidade do solo e dos recursos hídricos pelo uso de fertilizantes e defensivos agrícolas

O sistema de monocultura exige a aplicação de maiores quantidades de insumos agrícolas para manter a fertilidade do solo. Para minimizar o uso de fertilizantes, sugere-se a utilização da vinhaça produzida no processo de fabricação do etanol. Para a minimização de uso de defensivos agrícolas, sugere-se a implantação do Manejo Integrado de Pragas e Doenças (MIPD), que tem por objetivo reduzir a população dos agentes de modo a permitir que seus inimigos naturais permaneça na plantação, agindo sobre suas presas e facilitando a volta do equilíbrio natural da cultura (http://www.wwf.org.br/natureza_brasileira/prog_projetos/agricultura/index.cfm, acesso em 20.10.06).

- Geração de emissões atmosféricas devido às queimadas

A maioria dos produtores ainda faz uso das queimadas como método facilitador do corte da cana-de-açúcar. Dessa forma, se a queimada for utilizada, haverá a produção de material particulado (MP), CO, CO₂, CH₄, NO_x e SO_x. CO₂ e CH₄, que são gases de efeito estufa enquanto que NO_x e SO_x são causadores de chuva ácida. Como medida mitigadora, sugere-se a não utilização do processo de queimada. A Lei nº 11.241 de 19 de setembro de 2002, do Estado de São Paulo, dispõe sobre a eliminação gradativa da queima da palha da cana-de-açúcar. Além disso, a Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo possui um projeto de monitoramento das condições meteorológicas e da qualidade do ar, com o objetivo de proibir essa prática caso julgue necessário (<http://sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/default.aspx?idPagina=123>, acesso em 18.10.06). A Figura 7 apresenta o processo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, sem a utilização da queimada.

Figura 7 – Processo de colheita da cana-de-açúcar mecanizada, sem utilização de queimada



Fonte: <http://www.portalunica.com.br/portalunica/?Secao=referencia&SubSecao=banco%20de%20imagens&SubSubSecao=cana-de-açúcar&Titulo=Colheita>, acesso em 23.10.06.

- Alteração da dinâmica populacional das comunidades faunísticas, em virtude da alteração de habitats
É recomendável a expansão da cultura com a utilização de áreas antropizadas, se a expansão se der em áreas naturais poderá ocorrer a alteração de habitats e a perda na diversidade biológica.

- Perda de diversidade biológica pela implantação da monocultura

Como dito anteriormente, é primordial que na expansão da cultura sejam utilizadas áreas antropizadas, evitando o uso de áreas naturais, minimizando a alteração de habitats e perda na diversidade biológica.

- Aumento da pressão sobre a infra-estrutura viária

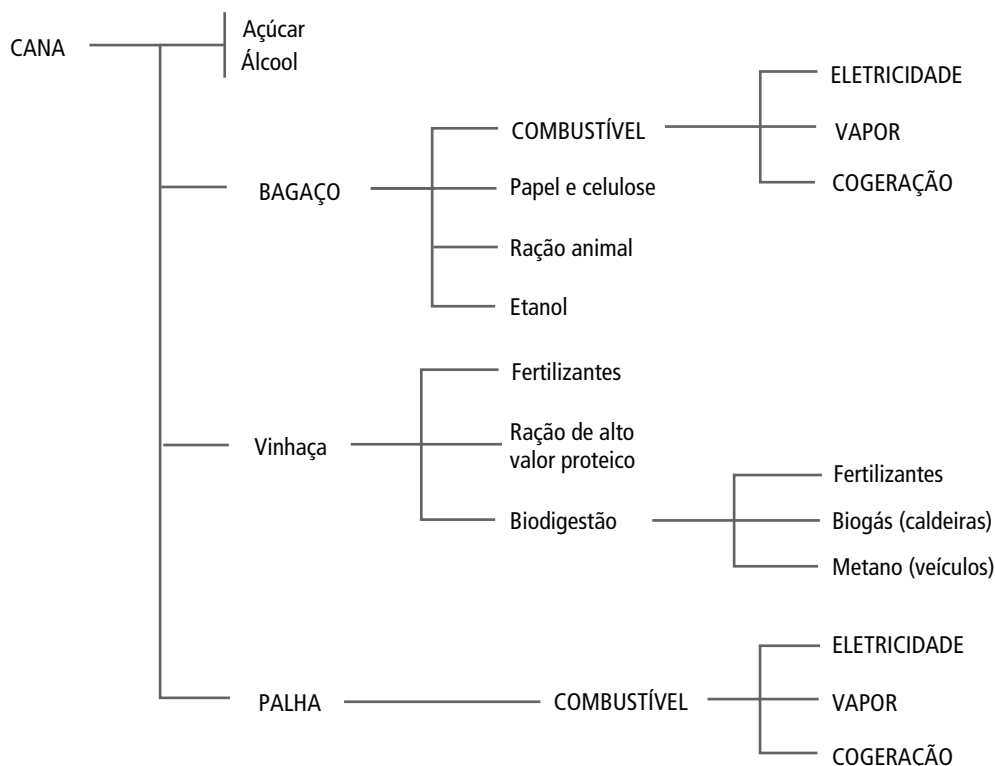
A infra-estrutura viária poderá sofrer maior pressão devido ao tráfego de veículos pesados escoando a produção e fornecendo insumos. Como medida mitigadora para esse impacto, sugere-se dar preferência, para realização das operações de carga e descarga, a horários que não sejam de pico.

- Aumento da pressão sobre a infra-estrutura urbana dos municípios sob influência da cultura

Poderão ocorrer movimentos migratórios em função da cultura, atraídos pela oferta de trabalho, causando uma pressão sobre a infra-estrutura urbana dos municípios (saúde, habitação, transportes, etc.). Como medida mitigadora, sugere-se que o empreendedor contribua para a elaboração e implementação do Plano Diretor dos municípios afetados.

A Figura 8 apresenta os produtos e resíduos do processamento da cana-de-açúcar. Nota-se a capacidade de aproveitamento de todos os resíduos gerados.

Figura 8 – Produtos e resíduos gerados no processamento da cana-de-açúcar



Fonte: Dedini apud Silvestrin in www.mme.gov.br/site/menu/selectmainnenuitem.do?channelId=8213, acesso em 18.10.06

Conforme indicado nas páginas anteriores, vale ressaltar que, se a biomassa não for produzida e empregada de forma sustentável, com políticas adequadas e esquemas de manejo, pode causar impactos ambientais adversos, de ordem econômica, social ou ambiental e interferir na produção de alimentos. Por exemplo, a ocupação contínua de grandes áreas para a prática da monocultura, além de inibir outras atividades agrícolas relevantes – principalmente a produção de alimentos – pode concorrer para a extinção de uma vegetação nativa importante, afetando o habitat natural de espécies selvagens e contribuindo para a redução da biodiversidade (ROSILLO-CALLE et al., 2005).

■ 3.2.2. Produção de açúcar e álcool nas usinas

Os principais impactos oriundos dessa etapa do processo estão apresentados abaixo.

- Alteração da qualidade do ar devido à geração de emissões atmosféricas no processo industrial

Os processos industriais de produção de álcool geram material particulado (MP) e NO_x nas caldeiras, enquanto que o processo de fermentação gera odor desagradável e CO_2 . Como medida mitigadora para esse impacto, sugere-se a instalação de filtros para contenção do MP e do NO_x .

- Alteração da qualidade do corpo hídrico receptor ou solo devido à disposição inadequada da vinhaça

A vinhaça é produzida na razão de 13 litros para cada litro de etanol (Biomass Power Generation, 2005).

Sua composição química varia de acordo com a variedade da cana-de-açúcar e vários outros fatores do processo, porém o potássio na forma de K_2O , é o elemento mais significativo. Esse efluente apresenta alta carga orgânica (DBO/DQO) podendo contaminar corpos d'água e águas superficiais se não for tratado/disposto de forma adequada. Como medida mitigadora para esse impacto, sugere-se a utilização da vinhaça devidamente processada na irrigação da cultura (Figura 9). Essa prática é altamente difundida no país, sendo viável técnica e economicamente.

- Alteração da qualidade do corpo hídrico receptor devido à disposição inadequada da águas servidas

A água utilizada no processo (lavagem da cana-de-açúcar, por exemplo) deve ser tratada e reutilizada, sempre que possível, evitando a sua disposição nos corpos hídricos receptores.

- Alteração da qualidade do solo devido à disposição inadequada da torta do filtro

A torta do filtro é um resíduo da produção de açúcar e etanol, sendo produzido na razão de 35 kg por tonelada de cana (Biomass Power Generation, 2005). Sua composição química apresenta alto conteúdo de matéria orgânica e vários nutrientes como nitrogênio, cálcio e especialmente fósforo na forma de P_2O_5 . Como medida mitigadora, sugere-se a aplicação da torta do filtro na cultura. Vários estudos indicam ganhos na produtividade da cana-de-açúcar com a adoção dessa prática.

Figura 9 – Aplicação de vinhaça em cultura de cana-de-açúcar



Fonte: <http://www.portalunica.com.br/portalunica/?Secao=referencia&SubSecao=banco%20de%20imagens>, acesso em 23.10.06.

- Distorção estética e geração de ruído devido ao funcionamento da usina

A presença da usina causa distorção estética e sua operação causa ruídos que podem vir a incomodar a população sob influência do empreendimento. Como medidas mitigadoras, são sugeridas a implantação de projetos paisagísticos e arquitetônicos para redução do impacto visual, além de programas específicos para monitoramento e redução de ruídos.

- Aumento da pressão sobre a infra-estrutura viária

Os impactos a seguir são observados da mesma maneira que o observado no item 3.2.1.

Infra-estrutura viária poderá sofrer maior pressão devido ao tráfego de veículos pesados entrando e

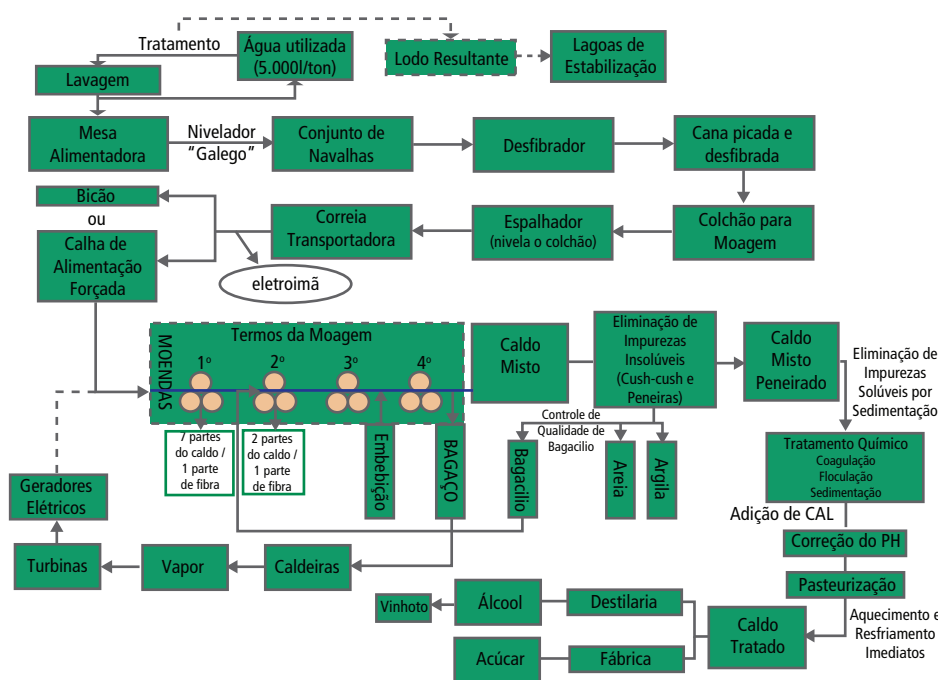
saindo da usina. Como medida mitigadora para esse impacto, sugere-se dar preferência, para realização das operações de carga e descarga, a horários que não sejam de pico.

- Aumento da pressão sobre a infra-estrutura urbana dos municípios sob influência do empreendimento

Poderão ocorrer movimentos migratórios em função do empreendimento, causando uma pressão sobre a infra-estrutura urbana dos municípios (saúde, habitação, transportes) sob influência do empreendimento. Como medida mitigadora, sugere-se que o empreendedor contribua para a elaboração e implementação do Plano Diretor dos municípios afetados.

A Figura 10 apresenta, de forma esquemática, o processo de produção de açúcar e álcool a partir da cana-de-açúcar.

Figura 10 – Esquema da produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar



Fonte: Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial da gasolina no mundo. UNICAMP, 2005.

Do ponto de vista técnico-econômico, os principais entraves ao maior uso da biomassa na geração de energia elétrica são a baixa eficiência termodinâmica das plantas e os custos relativamente altos do transporte. Esses entraves tendem a ser contornados, a médio e longo prazos, pelo desenvolvimento, aplicação e aprimoramento de novas e eficientes tecnologias de conversão energética da biomassa (CORTEZ; BAJAY; BRAUNBECK, 1999) e por meio dos incentivos instituídos pelas políticas do setor elétrico.

Se os sistemas de biomassa energéticos forem bem manejados, eles poderão integrar uma matriz energética ambientalmente confiável e, portanto, contribuir para o desenvolvimento sustentável. Quando comparados, por exemplo, aos combustíveis fósseis convencionais, os sistemas bioenergéticos podem causar impactos menos prejudiciais ao meio ambiente. Embora os sistemas bioenergéticos provoquem muitos impactos

ambientais, estes são locais e relativamente pequenos em comparação àqueles causados pelos combustíveis fósseis, que geram impactos em menor número, porém de grandes proporções, e atingem áreas maiores. São essas características que podem fazer com que impactos ambientais causados pelos sistemas bioenergéticos sejam mais controláveis, reversíveis e, consequentemente, menos prejudiciais (ROSILLO-CALLE et al., 2005).

4. Benefícios socioambientais

Em regiões isoladas onde linhas de transmissão não podem ser instaladas por motivos técnicos e/ou econômicos, a alternativa mais comum é a geração de energia utilizando-se óleo diesel. Muitas vezes, porém, essas comunidades não dispõem de recursos para comprar o próprio combustível, devido ao seu alto custo de transporte, que o faz dobrar de preço em algumas situações.

As energias renováveis são, muitas vezes, a única opção para o atendimento a comunidades em regiões isoladas. Porém, a instalação de um sistema para a produção de energia deve ser vinculada a uma atividade produtiva, para que a comunidade possa criar meios de manter o sistema em funcionamento e não fique dependente de programas assistencialistas.

Como será discutido adiante, o uso de biocombustíveis por países em desenvolvimento é uma oportunidade de reduzir a dependência externa de petróleo, além de criar localmente uma atividade produtiva. O emprego de energias renováveis implica vantagens em diversas áreas, como descrito nas seções a seguir.

■ 4.1. Benefícios estratégicos

Aumentar a diversificação da matriz energética de um país e reduzir sua dependência de combustíveis fósseis é uma medida estratégica importante para a garantia de suprimento energia. Desta maneira, não se fica tão vulnerável às oscilações dos preços do petróleo e às instabilidades políticas dos países produtores (COELHO, 2005).

Outra vantagem estratégica é a redução dos gastos com importação de petróleo. No Brasil, com a implementação do Programa do Alcool o país economizou, entre 1975 e 2002, US\$ 52,1 bilhões em divisas (GOLDEMBERG et al, 2003). Há países, como a Nigéria, que não possuem refinarias e são exportadores de petróleo, e estão interessados em iniciar programas de produção e uso de biocombustíveis.

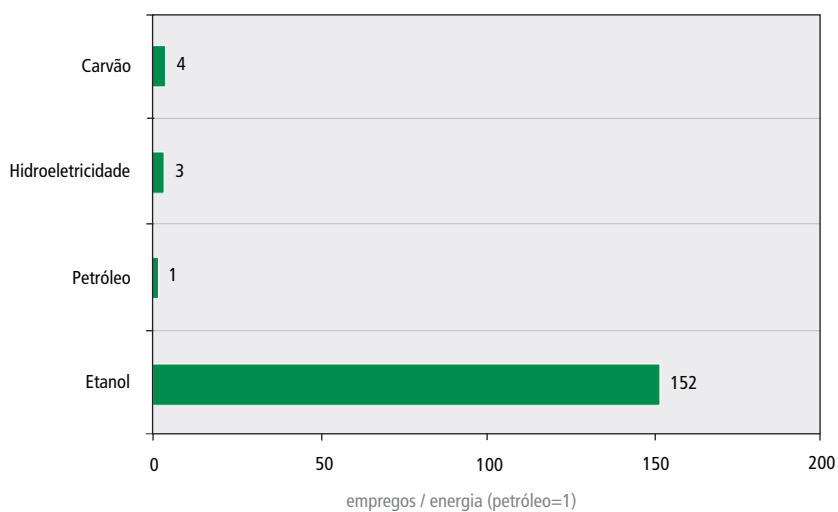
Além disso, deve-se salientar a existência de tecnologia nacional disponível, devido à experiência acumulada desde a implantação do Proálcool, por meio da lei nº 76.593/75.

■ 4.2. Benefícios sociais

A geração de empregos tem sido reconhecida como uma das maiores vantagens das energias renováveis, em especial a biomassa. Isso porque a geração de empregos diretos e indiretos promove um ciclo virtuoso de aumento dos níveis de consumo e qualidade de vida, inclusão social, geração de mais atividades econômicas, fortalecimento da indústria local, promoção do desenvolvimento regional e redução do êxodo rural.

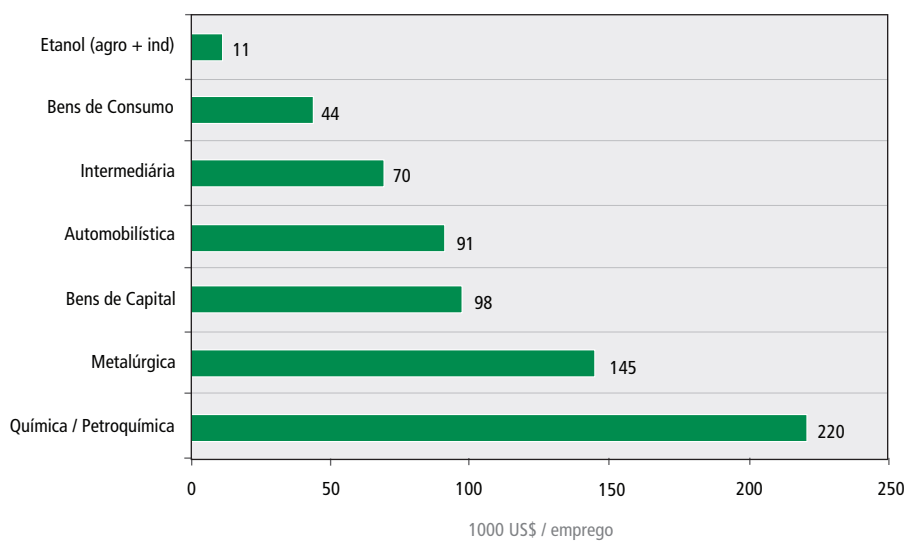
O setor agroindustrial da cana-de-açúcar, no país, tem importância relevante na geração de empregos. São diretamente empregados cerca de um milhão de pessoas, sendo que 80% na área agrícola. A cana-de-açúcar é uma das culturas que mais gera emprego por área cultivada (Biomass Power Generation, 2005).

Figura 11 - Empregos por fonte de energia



Fonte: GOLDBERG, 2002.

Figura 12 - Empregos nos diversos setores industriais



Fonte: Goldberg, 2002.

Em especial a produção de biomassa, em comparação com as outras energias, é uma atividade que envolve muitos empregos, porém com mão-de-obra barata, (GOLDBERG, 2002). A Figura 11 apresenta a relação de empregos por fonte de energia e a Figura 12 nos diversos setores industriais.

As energias renováveis, em alguns casos, podem ser uma alternativa em locais sem disponibilidade de combustíveis fósseis, como, por exemplo, as comunidades isoladas da região amazônica brasileira que podem utilizar resíduos agrícolas para geração de energia, contribuindo para a melhoria das condições socioeconômicas dessas regiões.

Mais uma vantagem social que merece ser mencionada é que a redução dos níveis de emissão melhora a qualidade do ar, que está diretamente relacionada à saúde (não só problemas respiratórios) e reduz, consequentemente, os gastos públicos no setor da saúde (internações e medicamentos) (CIFUENTES et al, 2001; SALDIVA et al, 2005; MIRAGLIA et al, 2005).

■ 4.3. Benefícios ambientais

O aquecimento global, agravado pelo aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE) por fontes antrópicas, tem trazido grande preocupação à sociedade moderna. Esta preocupação levou os países da Organização das Nações Unidas a assinarem o Protocolo de Quioto que determina a redução nas emissões de GEE em 5,2%, em média, relativas ao ano de 1990, durante o período de 2008 a 2012, para os países desenvolvidos.

Para o segundo período de compromisso do Protocolo de Quioto, existe uma tendência para que haja pressão sobre alguns países em desenvolvimento, como China, Índia e Brasil, para que estes venham a ter algum tipo de meta de redução de emissões.

O Brasil é um país que apresenta uma matriz energética considerada “limpa”. Entretanto, pesam as elevadas taxas de desmatamento e queimadas, especialmente na região amazônica.

Como as pressões são fortes, as oportunidades também são crescentes. Dentre estas, destaca-se o aproveitamento da vocação natural do Brasil para a produção de energia de biomassa, permitindo que o país se lance como um fornecedor regular de combustíveis renováveis, além de maior participação no mercado de créditos de carbono.

Esse mercado surge em decorrência de mecanismos de implementação conjunta, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), baseado em projetos entre países desenvolvidos e países em desenvolvimento.

O MDL trata do comércio de créditos de carbono baseado em projetos de seqüestro ou mitigação, no qual países desenvolvidos comprariam créditos de carbono, em termos de tonelada de CO₂ equivalente, de países em desenvolvimento responsáveis por tais projetos, desde que estes atendam a uma série de critérios, como estarem alinhados às premissas de desenvolvimento sustentável do país hospedeiro.

As possibilidades de inserção da agroenergia nesse contexto são grandes, e estão ligadas basicamente à produção de combustíveis verdes como o etanol, o biodiesel, o biogás, co-geração de energia elétrica a partir do bagaço de cana e atividades de reflorestamento, as quais poderão atrelar-se à produção de energia de biomassa florestal.

É apresentado, no Anexo 1, um exemplo de proposta de utilização de biomassa para recebimento de créditos de carbono.

Vale lembrar que as fontes de energia precisam ser utilizadas de maneira sustentável, economicamente viável e ambientalmente correta, para que possam garantir sua utilização de forma contínua e segura.

As fontes renováveis são uma opção para a geração de energia (eletricidade e calor), provocando impactos ambientais reduzidos, se comparados a outras fontes, e substituindo os combustíveis fósseis.

5. Indicadores de sustentabilidade

O Brasil tem seu desenvolvimento econômico histórico fortemente ligado ao uso da energia da biomassa. Desde seus primórdios históricos, nos primeiros ciclos econômicos ligados ao açúcar, até as florestas energéticas para a siderurgia e o Proálcool nas últimas décadas do século XX e, mais recentemente, o programa do governo federal para o biodiesel. Muitas foram as ações, políticas públicas e investimentos privados que desenvolveram tecnologias e mecanismos de gestão capazes de gerar um salto em direção a uma grande ampliação da escala de geração desta fonte de energia. No entanto, este mesmo processo histórico deixou marcas com a alteração acentuada de biomas, a concentração de renda e o deslocamento de populações tradicionais de suas terras.

■ 5.1. Princípios básicos para o desenvolvimento de critérios e indicadores de sustentabilidade para energia da biomassa

A proposta aqui apresentada visa desenvolver um conjunto de critérios e indicadores de sustentabilidade para balizar a discussão entre os diversos segmentos sociais e econômicos envolvidos nos empreendimentos de geração de energia a partir da biomassa, nas suas dimensões sociais, ambientais e econômicas.

Entende-se neste texto como critérios de sustentabilidade um conjunto de definições de diferentes aspectos que devem ser considerados, de forma complementar e interdependente, na avaliação de empreendimentos, conjugados a metas e princípios que se pretende alcançar para o desenvolvimento socioambiental do país e de suas diferentes populações.

Entende-se por indicadores de sustentabilidade parâmetros que possam ser utilizados como medida do cumprimento destes critérios. Para a definição dos critérios e indicadores partem-se dos seguintes princípios:

a) Princípio da visão de um futuro sustentável

Os empreendimentos devem ser analisados quanto à sua sustentabilidade a partir de uma visão de futuro para o país, o que vai além da análise de projetos específicos. A questão da produção de energia, mesmo que de forma renovável, não pode ser vista dissociada de um contexto de desenvolvimento de um modelo de sociedade, que contemple o fortalecimento da agroecologia e da agricultura familiar como modelo transformador e auto-suficiente em alimentos e energia; o uso prudente e eficiente dos recursos naturais; a melhoria da distribuição de renda; o controle social sobre o que se produz e o como se produz; a descentralização da produção e consumo e o menor impacto negativo possível sobre os biomas naturais.

Em relação aos biomas, dado o avançado estágio de degradação da Mata Atlântica, do Cerrado e dos Campos Sulinos e a aceleração dos processos de degradação de outros biomas como o da Floresta Amazônica, quaisquer novos empreendimentos não os devem ameaçar. Pelo contrário, devem contribuir para sua recuperação, de maneira que as próximas gerações possam usufruir destes biomas nas suas dimensões econômicas e de geração de prazer e alegria.

b) Princípio da justiça ambiental

A justiça ambiental deve ser tomada como princípio básico da sustentabilidade, o que implica pensar o acesso democrático aos recursos naturais e a imposição do menor ônus possível das consequências do

desenvolvimento econômico às populações pobres, sejam urbanas, rurais ou étnicas. Isto porque se trata de construir uma sociedade sustentável e não meramente de avaliar a viabilidade ou sustentabilidade de projetos voltados a interesses econômicos restritos. Para isto, as ações ou medidas de cunho político ou econômico que visam o desenvolvimento devem ser ancoradas em objetivos de longo prazo e no uso dos recursos naturais de forma sustentável, sempre promovendo a equidade, o respeito às diferenças sociais, de gênero e culturais.

c) Princípio do interesse social

Segundo o qual os empreendimentos de geração de energia devem visar à inclusão social e ao acesso à energia e não apenas aos interesses específicos de setores econômicos energo-intensivos.

d) Princípio da autonomia

Segundo o qual os empreendimentos devem contribuir para a autonomia energética das comunidades e dos povos, para a inovação tecnológica, a utilização de tecnologias apropriadas, a transferência de tecnologia, o desenvolvimento de tecnologias nacionais por meio da aplicação dos recursos existentes de Ciência, Tecnologia e Informação e para a promoção da descentralização da geração de energia.

e) Princípio da avaliação prévia

Parte-se do princípio que a sustentabilidade de projetos com impactos relevantes deve ser avaliada quanto a seus aspectos individuais e cumulativos antes mesmo de se iniciar sua avaliação econômica, financeira, institucional e técnica.

f) Princípio de economia ecológica

Sendo o sistema econômico um subsistema, é necessário que os limites ecológicos à economia, aí consideradas as atenuações resultantes dos progressos tecnológicos, sejam respeitados e considerados nos modelos de desenvolvimento que venham a ser adotados. O objetivo de lucro no curto prazo deve ser substituído por aqueles que visem o desenvolvimento alicerçado no uso prudente e eficiente dos recursos naturais. Os fluxos materiais e energéticos desnecessários devem ser evitados, dando lugar aos sistemas socioeconômicos descentralizados e diversificados com maior potencial de auto-suficiência e com capacidade de integração solidária aos sistemas vizinhos, que não implique exploração dos mesmos para a satisfação de suas demandas econômicas.

■ 5.2. Critérios e indicadores específicos para sustentabilidade da energia da biomassa

■ 5.2.1. Tipos de indicadores

Durante os últimos anos, tem-se discutido intensamente o tema da sustentabilidade das diversas fontes de energia e procurado estabelecer parâmetros de avaliação através do estabelecimento de indicadores apropriados. Várias publicações técnicas disponíveis na literatura mundial sobre o assunto têm estabelecido indicadores de natureza mais ampla, mais ligados aos aspectos macro e socioeconômicos, bem como alguns mais específicos que podem ser aplicados às diversas fontes energéticas (IEA, 2005).

Dentre os primeiros, pode-se citar a utilização de energia per capita, o número de lares atendidos por

energia elétrica, a importação líquida de energia. Com relação aos segundos, pode-se citar o custo da produção de energia, a disponibilidade no país do combustível considerado, a emissão de poluentes e gases de efeito estufa de cada cadeia energética, a produção de resíduos e rejeitos por unidade de energia gerada, o uso da terra por unidade de energia produzida, etc. Embora o primeiro tipo de indicador seja importante para se avaliar o desempenho de um sistema energético como um todo, os resultados são consequência do “mix” atingido pelo sistema nos limites de certo horizonte, e não se enquadram no escopo deste trabalho.

Por outro lado, os indicadores do segundo tipo são pertinentes para a análise “a priori” de todas as fontes energéticas, e são aplicados especificamente para a produção de energia a partir da biomassa. Optou-se por, na medida do possível, utilizar os mesmos indicadores para a análise das diferentes fontes consideradas no Plano, de forma a permitir, em um momento posterior, a comparação entre as diversas fontes.

■ 5.2.2. Indicadores ambientais

Os indicadores ambientais podem ser divididos em três temas principais: Atmosfera, Água e Solo (IEA, 2005). Cada um destes três temas principais pode ser subdividido em subtemas, como se segue.

Atmosfera: mudanças climáticas e qualidade do ar. Para estes subtemas as questões principais estão relacionadas a acidificação, impactos na camada de ozônio e outras emissões que afetam a qualidade do ar de áreas urbanas e emissão de gases de efeito estufa.

Água: a qualidade da água é, em geral, afetada pela descarga de contaminantes, em especial nas atividades de mineração.

Solo: a qualidade dos solos deve ser considerada além da sua importância como espaço físico e relevo. O solo deve ser considerado como um importante recurso, junto com os recursos hídricos, essencial para a agricultura e como habitat para as diversas espécies de plantas e animais. As atividades de produção de energia podem resultar na degradação e acidificação dos solos.

Para os indicadores ambientais, utilizou-se, para esta primeira análise, os mesmos indicadores sugeridos para a análise da fonte nuclear, carvão, derivados do petróleo e gás natural.

• Emissões de gases de efeito estufa (GEE)

A biomassa sustentável, bagaço de cana-de-açúcar, por exemplo, apresenta balanço praticamente nulo de emissões de CO₂, pois as emissões resultantes da queima do bagaço são absorvidas e fixadas pela planta durante o seu crescimento.

MACEDO et al. (2004) realizaram um trabalho que determinou o balanço de emissões de GEE na produção e no uso de etanol no Brasil. Foram considerados dois cenários, sendo o primeiro baseado nas médias de consumo de energia e insumos, enquanto que o segundo foi baseado nos melhores valores praticados (valores mínimos de consumo com o uso da melhor tecnologia existente e praticada na região). Foram levados em conta, entre outros, os fluxos relacionados à utilização de combustíveis fósseis na produção de insumos agrícolas e industriais e construção de prédios e instalações. Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Emissões no ciclo de vida do etanol - (kg CO₂ eq./tc)

Emissões no ciclo de vida do etanol	Cenário 1 (média)	Cenário 2 (melhores valores)
Emissões		
Combustíveis fósseis	19,2	17,7
Metano e N ₂ O, queima de palha	9,0	9,0
N ₂ O do solo	6,3	6,3
Total de emissões	34,5	33,0
Emissões evitadas		
Uso de bagaço excedente	12,5	23,3
Uso do etanol	242,5 (A); 169,4 (H)	259,0 (A); 180,8 (H)
Total de emissões evitadas	255,0 (A); 181,9 (H)	282,3 (A); 204,2 (H)
Emissões evitadas (valor líquido)	220,5 (A); 147,4 (H)	249,3 (A); 171,1 (H)

Fonte: MACEDO et al., 2004

Notas: (A) – etanol anidro; (H) – etanol hidratado; e tc – tonelada métrica de cana-de-açúcar

• Poluição do ar

As queimadas, quando realizadas nas plantações, que apresentam produção de material particulado (MP), CO₂, CH₄, SO_x e NO_x. CO₂ e CH₄ são gases de efeito estufa enquanto que SO_x e NO_x são gases formadores de chuva ácida.

Em termos de poluição global do ar, o uso do bagaço da cana-de-açúcar como fonte de energia pode ser considerado como uma medida mitigadora, uma vez que as emissões de CO₂ durante a combustão são compensadas pelo processo fotossintético inerente à fase de cultivo da biomassa. As atividades da agroindústria no Brasil são responsáveis pela fixação anual de 12,74 Mt de carbono (ROSILLO-CALLE et al, 2005).

Os impactos prioritários na produção de eletricidade a partir de cana-de-açúcar provavelmente serão aqueles associados às emissões de poluentes no ar resultantes da coleta, do transporte e das atividades de conversão (ROSILLO-CALLE et al., 2005).

A Tabela 10 apresenta uma comparação dos níveis de emissão do ciclo de combustível de resíduos da cana para geração de eletricidade por meio do uso da tecnologia BIG-CC com os níveis de emissão do ciclo de combustível do gás natural para a geração de eletricidade por meio do uso da tecnologia CCGT. Analisando a tabela abaixo, percebe-se o benefício da utilização da biomassa, comparada ao gás, no que tange às emissões de NO_x, SO₂, NMHC e CO₂.

Tabela 10 – Comparação das emissões dos ciclos de combustíveis obtidos a partir de resíduos da cana e a partir de gás natural

	Produção (mg/kWh)		Conversão (mg/kWh)		Total (mg/kWh)	
	Biomassa	Gás natural	Biomassa	Gás natural	Biomassa	Gás natural
NO _x	21,1	28,8	213	787	234	816
SO ₂	0,442	16,9	5,56	0	6,01	16,9
Particulados	3,09	11,8	11,8	0	14,9	0
CO	8,36	556	556	393	563	403
NMHC	3,68	11,9	0	11,0	3,68	22,9
CO ₂	1.355	2.700	0	392.870	1.355	395.570

Fonte: ROSILLO-CALLE et al., 2005

NMHC = hidrocarbonetos não metano

- Uso de material e produção de rejeitos

Os rejeitos produzidos na fabricação do etanol a partir da cana-de-açúcar são a torta de filtro, a vinhaça e o bagaço de cana.

A torta de filtro é aplicada no campo, pois sua composição química apresenta alto conteúdo de matéria orgânica e vários nutrientes como nitrogênio, cálcio e especialmente fósforo (P_2O_5).

A vinhaça é utilizada para irrigação da plantação, sendo essa uma prática difundida no Brasil. Muitos estudos a respeito dessa prática foram realizados e é comum a conclusão de que essa é tecnicamente e economicamente viável (Biomass Power Generation, 2005).

O bagaço de cana é aproveitado como energético. Sendo assim, verifica-se que os rejeitos gerados são aproveitados ao longo da cadeia energética. A utilização de bagaço de cana, da palha da cana ou de resíduos da cultura de arroz para produção de energia também contribui para a redução dos resíduos.

- Uso da Terra

A produção da biomassa para a geração de energia implica utilização de grandes áreas, o que, aliado às correntes práticas monoculturais, gera impactos ambientais significativos sobre a biodiversidade e os modos de produção.

Portanto, o aproveitamento de resíduos da produção de biomassa para a geração de eletricidade, calor e de biocombustíveis, seja a partir de bagaço de cana ou de resíduos da cultura de arroz, podem ser consideradas boas práticas para a geração de energia com sustentabilidade, desde que não inviabilizem outros usos importantes dos resíduos agrícolas, como a conservação de solos, por exemplo.

De uma forma simplificada, estima-se que as necessidades de terra para cada GW de capacidade instalada, incluindo, no caso de geração a carvão e nuclear, as necessidades de mineração e de todo o ciclo do combustível, para algumas fontes de energia são as seguintes:

- Carvão e nuclear 1-10 km²;
- Solar 20-50 km²;
- Eólica 50-150 km²;
- Biomassa 4.000-6.000 km².

Deve-se levar em conta que, a utilização da biomassa para geração de energia elétrica também contribui para a redução dos resíduos. Por outro lado, a grande área requerida para a implantação de biomassa energética causa, naturalmente, um potencial conflito entre produção de alimentos e energia.

Além do indicador de quantidade de área utilizada, outros indicadores de sustentabilidade do uso da terra podem ser analisados no caso da biomassa, tais como: a descentralização e diversificação dos sistemas produtivos na área ou região; tamanho das áreas contínuas de monoculturas; a distância da fonte energética até seus centros de consumo; distância percorrida e tempo gasto pelos trabalhadores no empreendimento; tempo necessário aos trabalhadores fora de sua terra para o manejo de suas culturas de subsistência, entre outros.

■ 5.2.3. Indicadores socioeconômicos

- Esgotamento das reservas de combustível

A projeção do potencial da agroenergia no Brasil, para os próximos 30 anos, vislumbra a possibilidade de produção de mais de 120 milhões de toneladas equivalentes de petróleo (tep) anualmente, o que significa

quase dobrar a oferta atual, estimada em 57 milhões de tep. Na medida em que este combustível é renovável, não é esperado o esgotamento deste recurso.

- Garantia de suprimento

A garantia de suprimento de biomassa está garantida, visto que a indústria de açúcar e álcool está em larga expansão. Os resíduos da cultura de arroz também estão disponíveis para serem utilizados na geração de eletricidade.

6. Custos socioambientais

■ 6.1. Considerações iniciais

Os custos e benefícios totais das atividades econômicas frequentemente não são calculados. Os processos de tomada de decisão consideram os custos e benefícios privados, mas, na maioria das vezes, ignoram uma série de custos e benefícios adiconais, conhecidos como externalidades, com os quais a sociedade arca. Um exemplo gritante de externalidade está nos danos causados pela poluição. A contabilização dos custos totais das atividades econômicas é um possível passo na busca de estratégias para se chegar a um desenvolvimento sustentável (ROSILLO-CALLE et al., 2005).

Em geral, o valor econômico de impactos ambientais de fontes de energia elétrica não é internalizado no custo total de usinas.

Existem dois métodos de internalizar externalidades ambientais: (i) estimando os valores dos custos de controle e (ii) estimando valores monetários de custos de degradação (Furtado, 1996).

Custos de controle representam o valor monetário da proteção ambiental, isto é, eles representam quanto a sociedade tem de pagar para evitar os impactos ambientais. Como afirmado por Woolf (1992; p. 4):

Quando os custos de controle são usados para representar externalidades ambientais, existe uma suposição explícita que os reguladores estabeleceram padrões ambientais de modo que os custos da regulação igualem aproximadamente os benefícios. Em outras palavras, supõe-se que os reguladores estabelecem padrões ambientais no ponto onde os custos de degradação são aproximadamente iguais aos custos de controle. Isto pressupõe que os reguladores são bem informados e livres de restrições, inclusive políticas, ao estabelecerem padrões ambientais.

Neste método, os custos internalizados usualmente referem-se às medidas de mitigação dos efeitos ou medidas de prevenção da ocorrência dos efeitos. Estes custos são também conhecidos como custos de controle e de mitigação. Custo de controle é o custo de evitar os efeitos ambientais, enquanto o custo de mitigação é o custo de gerir ou aliviar os efeitos ambientais (COMASE 1993a). O termo custo de mitigação é usado quando não existe uma ação na causa do impacto, tentando reduzi-lo. As medidas objetivam apenas conviver com ou mitigar os impactos. Por outro lado, quando as medidas visam reduzir os efeitos ambientais, agindo diretamente nas fontes poluidoras, seus custos são chamados custos de controle.

Neste método, os custos internalizados usualmente referem-se às medidas de mitigação dos efeitos ou medidas de prevenção da ocorrência dos efeitos.

A segunda abordagem, custos de degradação, utilizado para a internalização dos custos ambientais de

usinas, se baseia na avaliação econômica da degradação causada (Furtado, 1996). Esta medida avalia o efeito ambiental como uma perda econômica devido aos impactos causados pelo projeto. Os custos de degradação representam o benefício à sociedade em se evitar estas externalidades, ou seja, representam o benefício monetário da proteção ambiental.

Exceto quando o nível de controle é considerado “ótimo”, o uso dos custos de controle para quantificar o dano ambiental em geral apresenta erros de super ou sub estimativa. Teoricamente, não existem dúvidas de que os custos de degradação geram melhores estimativas das externalidades ambientais do que os custos de controle. No entanto, a sua determinação apresenta um elevado grau de incerteza.

■ 6.2. Custos socioambientais e externalidades

As tecnologias modernas empregadas na maior parte das opções energéticas foram desenvolvidas de modo a minimizar os danos ambientais. Contudo, os riscos de danos à saúde e meio ambiente não podem nunca serem reduzidos a zero para qualquer opção energética. A Tabela 11 apresenta alguns exemplos de externalidades ambientais e não-ambientais.

Tabela 11 – Exemplos de categorias de impactos que resultam em possíveis externalidades

Ambientais	Não-ambientais
Saúde humana	Uso dos recursos
Ecotoxicidade (impacto de substâncias nocivas sobre a flora e a fauna)	Geração de empregos
Acidificação	Segurança e confiabilidade no fornecimento
Eutroficação	Efeitos sobre o PIB
Qualidade do solo	Desenvolvimento rural
Mudança climática	
Amenidades (barulho, odores e impactos visuais)	
Biodiversidade	

Fonte: Rosillo-Calle et al., 2005.

No que se refere aos empreendimentos termelétricos, a relevância das emissões aéreas para a análise de fontes de geração termelétrica tem levado a que a grande maioria dos estudos realizados tenham sido direcionados para a valoração de impactos ambientais na produção de energia elétrica, especialmente nos Estados Unidos da América, voltados para os custos das externalidades das emissões aéreas, sendo os resultados apresentados em US\$ por tonelada de poluente, em US\$ por tipo de poluente e em US\$ por kWh para cada usina elétrica. Como estes tipos de emissão não são significativos para as usinas que utilizam biomassa como combustível, não se encontram disponíveis valores destas emissões para a biomassa.

O projeto ExternE estabeleceu metodologias para estimar os impactos do setor elétrico em termos de custos externos ou externalidade, ou seja aqueles custos não incluídos diretamente nas tarifas, mas que a sociedade arca de alguma maneira. Um resumo comparativo desses custos é apresentado na Tabela 12, em termos de Euro/MWh (ExterneE, 1998).

Tabela 12 - Custos das Externalidades

Tipo de geração elétrica	Externalidades (Euro/MWh) (as faixas cobrem diferentes tecnologias e países)
Carvão e linhito	20 a 150
Óleo	30 a 110
Gás	10 a 40
Nuclear	2 a 7
Biomassa	10 a 30
Eólica	0,5 a 2,5
Hidroelétrica	1 a 10

A Tabela 13 apresenta os custos das externalidades da produção de energia elétrica a partir da biomassa obtidos em alguns estudos.

Tabela 13 – Custo das externalidades da energia⁽¹⁾ oriunda da biomassa

Estudo	Valor (centavo de dólar/kwh)
Ottinger et al. (1990)	0 – 0,8
RCG-Tellus (1995)	0,3
Ornl-RFF ⁽²⁾ (1994)	0,19
Pearce (1995 a, b)	0,4 (0,04)
CEC (1998a)	0,1 – 4,2 (0,08 – 0,3)

(1) Os valores entre parênteses indicam a contribuição da externalidade da mudança climática ao valor da externalidade fornecido.

(2) Dados apresentados por Lee (1996).

Fonte: ROSILLO-CALLE et al., 2005.

A título de exemplo dos custos de produção, na Tabela 14 são apresentados alguns desses custos no Brasil e no Reino Unido.

Tabela 14 - Externalidades verificadas na produção agrícola

	Brasil (R\$/ha/ano)	Reino Unido (US\$/ha/ano)
Erosão dos solos	110,00	13,80
Danos a água	Tratamento – 0,55 Reposição de reservatórios – 0,90 Recarga de aquíferos – 5,60	Pesticidas – 20,80 Nitratos – 3,00 Fosfatos – 11,69 Zoonoses – 4,20 TOTAL – 39,70
Manutenção de estradas rurais	Terraceamento, planejamento e conservação do solo – 1,46	
Irrigação por aspersão	Bombeamento de água, perda de 40% por evaporação, custo de energia elétrica – 115,50	
Poluição do ar	Desperdício de combustível – 31L/ha/ano – 49,60 Efeito estufa – emissão de 160.000 tC – 0,01	186,00
Perdas na biodiversidade	Mata Atlântica Prevenção inundações – 3250,00 Prevenção de erosão e sedimentação – 537,00 Fixação de nutrientes e M. O. – 90,00 Controle biológico – 137,00 Proteção da natureza – 25,00 TOTAL – 4039,00	50% dos custos referem-se a gastos com Planos de recuperação de espécies e habitats TOTAL: 4,00
Intoxicações humanas	0,27	0,20
Desemprego rural	130,00	

Fonte: ORTEGA e WATANABE, 2005.

A Tabela 15 apresenta a comparação, em U\$/ha/ano entre os dois levantamentos realizados, com agregação diferenciada.

Tabela 15 - Comparação entre externalidades na agricultura observadas no Brasil e Reino Unido

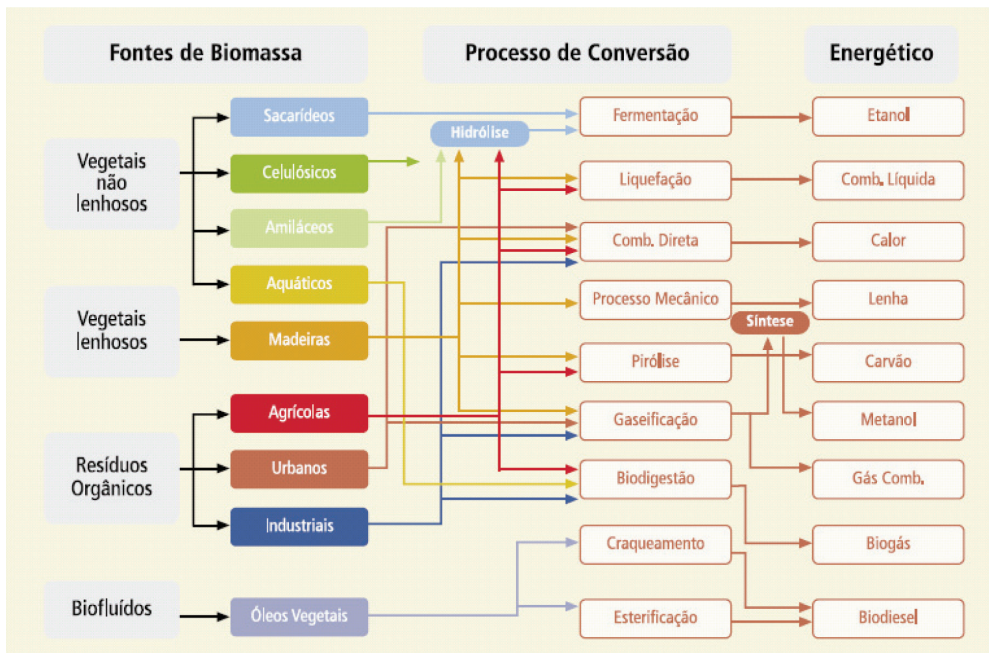
Efeito avaliado	Custo internacional – Reino Unido (us\$/ha/ano)	Custo nacional – Brasil (us\$/ha/ano) *
Perda nutrientes e M.O.	13,6	42,30
Tratamento total da água	39,70	-
Retirada da turbidez da água	1,00	0,21
Manutenção de estradas	-	0,55
Emissões de gás carbônico	7,84	-
Emissões de metano	46,76	-
Emissões de amônia	8,02	-
Emissões de óxido nitroso	123,24	-
Desperdício de combustível	-	19,07
Eleticidade (irrigação)	-	44,42
Perda de Biodiversidade	4,00	621,7
Intoxicações	0,20	0,01
Desemprego	-	50,00

Fonte: Ortega e Watanabe, 2005

7. Desenvolvimento tecnológico em médio prazo

O aproveitamento da biomassa pode ser feito por meio da combustão direta (com ou sem processos físicos de secagem, classificação, compressão, corte / quebra, etc), de processos termoquímicos (gaseificação, pirólise, liquefação e transesterificação) ou por processos biológicos (digestão anaeróbia e fermentação). A Figura 13 apresenta os principais processos de conversão da biomassa em energéticos.

Figura 13 – Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa



Fonte: Balanço Energético Nacional – BEN. Brasília: MME, 1982 (adaptado) apud Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2ª edição, 2005.

■ 7.1. Novas tecnologias

Duas novas tecnologias que têm sido consideradas para conversão termelétrica a biomassa são:

- Combustão mista de biomassa/carvão, com até 10-15% de madeira, e custo de US\$ 100-700/kW;
- Gaseificação da biomassa e uso do gás em ciclos combinados.

Esta última não é ainda uma tecnologia comercial, existindo apenas na etapa de planta piloto, com potência variável entre 5 a 30 MWe. Outras tecnologias envolvem a gaseificação pressurizada ou atmosférica; o aquecimento direto ou indireto, leito fixo (limitado a pequeno porte) ou CFB; com injeção de ar ou oxigênio. Em todos os casos, há necessidade de avanços tecnológicos para sua viabilização.

A gaseificação é a conversão de combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas, envolvendo vapor quente e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiométrica (mínimo teórico para a combustão). O gás resultante é uma mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio, cujas proporções variam de acordo com as condições de processo, particularmente se é ar ou oxigênio que está sendo usado na oxidação.

Nos países do Primeiro Mundo, com a tecnologia atualmente disponível, uma planta de 30 MWe, usando madeira (com custo de US\$ 4/GJ) teria eficiência elétrica líquida de 41-45%, gerando energia na faixa de US\$ 4000/kWe. As projeções para a próxima década indicam plantas com potência de 110 MWe, com custos de US\$ 1600 a 2400/KWe instalado, e com custo da energia gerada de US\$ 0,07 a 0,09/kWh, considerando o custo da biomassa a US\$ 4/GJ.

Considerando a evolução nos custos internacionais de biomassa e da tecnologia, as projeções futuras indicam que, em 2030, o custo poderá cair para US\$ 1100/kW, quando o kWh de energia produzida atingiria, a valores de hoje, US\$ 0,04/kWh.

No Brasil, já foi possível antecipar a redução de custos. A planta projetada para construção na Bahia, utilizando madeira (abaixo de US\$ 1,5/GJ), com potência instalada de 32 MWe, teria 37% de eficiência elétrica líquida – base PCS – com custo de US\$ 2500/kWe, uma redução superior a 40% em relação aos países do Hemisfério Norte.

O Relatório Especial sobre os Cenários de Emissões, do Painel para a Mudança Climática (IPCC) estima que o maior potencial em energia renovável, no médio prazo (2025) seja proveniente do desenvolvimento de biomassa moderna (70 a 140 EJ), seguido pela energia solar (16-22 EJ) e eólica (7-10 EJ). O conceito de biomassa moderna incorpora tanto a madeira na forma de briquetes, como carvão e licor negro. No longo prazo, a contribuição de energias renováveis é estimada em 1.300 EJ/ano, metade do que será obtido diretamente da energia solar (2.600 EJ/ano).

Pesquisa e desenvolvimento na área de eficiência energética também são necessárias, de forma a aumentar a eficiência no processo de geração e minimizar as perdas nos processos de geração, transmissão e distribuição.

■ 7.2. Aplicações modernas da agroenergia

São visíveis os investimentos efetuados em diversas partes do planeta, visando inovações tecnológicas para o aproveitamento da bioenergia, sendo a produção de etanol um dos exemplos de sucesso. Sistemas de gaseificação de biomassa acopladas a turbinas a gás (IBGT) para geração de eletricidade, turbinas de ciclo combinado gás/vapor (GTCC), cama de circulação fluidizada (CFB), gaseificação integrada de ciclos combinados (IGCC), co-geração, tecnologia de aproveitamento de óleos vegetais como biocombustíveis, extração de etanol e metanol de celulose, desenvolvimento de combustíveis, além de melhoria de processos de produção, colheita, armazenagem, transporte e processamento de biomassa, são alguns exemplos de inovações tecnológicas. Já existem tecnologias de cama de circulação fluidizada operando à pressão atmosférica, que produzem gás combustível aquecido que pode ser aproveitado para geração de energia. Plantas pilotos utilizando o sistema IGCC estão disponíveis na Suécia, produzindo 6-9 MW.

A queima conjugada (“co-firing”) de combustíveis fósseis (especialmente carvão) com biomassa tem atraído cientistas e empresários da Dinamarca, Holanda e dos EUA. Adiciona-se biomassa na proporção de 2-25% ao carvão, permitindo aproveitar os sistemas instalados. Os testes demonstraram que, sem modificações de monta, é possível obter até 15% da energia total a partir da biomassa, alterando apenas os sistemas de alimentação e os queimadores.

Os cientistas estão investindo na melhoria da eficiência do boiler, sistemas de controle de alimentação, estabilidade do combustível, separação dos resíduos, etc. Em especial, há necessidade de melhorar o processo a ponto de torná-lo economicamente compatível, com os custos do processo original (com gás ou carvão), além de eficiência energética comparável, considerando-se ser esta uma etapa para atingir-se o ponto futuro de uso de plantas movidas exclusivamente com biomassa. Por exemplo, no estado da arte tecnológico, o uso de biomassa para geração de eletricidade apresenta eficiência de 33-37%, comparada ao carvão mineral (Plano Nacional de Agroenergia, 2005).

Uma das alternativas tecnológicas é a micro-produção, ou seja, o atendimento às comunidades isoladas, em que os custos de transmissão ou de transporte de energia a longa distância são incompatíveis com a capacidade de investimento do Estado e com o poder aquisitivo dos consumidores. A combinação entre tecnologia agrícola adequada, para produção de biomassa, e sistemas de produção de eletricidade, como micro-turbinas,

pode revolucionar completamente a qualidade de vida das comunidades isoladas. Turbinas com capacidade para produzir entre 15 e 500 kW têm a vantagem do baixo custo, facilidade de operação e manutenção e longa durabilidade, fundindo os conceitos de gaseificação com motor de combustão interna (Plano Nacional de Agroenergia, 2005).

8. Potencialidades para utilização de benefícios do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)

■ 8.1. Considerações iniciais

A Convenção sobre Mudanças Climáticas é um acordo das Nações Unidas para estabilizar os gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera a um nível que impeça a ocorrência de mudanças climáticas danosas. Foi convocada na Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED) realizada no Rio de Janeiro, em 1992. Até hoje, 186 países ratificaram a Convenção.

Para implantá-la, foi criado um protocolo na cidade de Quioto, em 1997. O aspecto mais importante do Protocolo de Quioto consiste no compromisso legal assumido por 39 países desenvolvidos no sentido de reduzir suas emissões de GEE em 5,2%, em média, abaixo dos níveis de 1990. Esse nível de emissão deve ser alcançado no período 2008–2012, denominado o “primeiro período de compromisso”. Os países desenvolvidos que possuem metas de redução de emissão são chamados de países do Anexo 1, ao passo que os que não têm metas são os países Não-Anexo 1. O Protocolo de Quioto permite que os países desenvolvidos alcancem suas metas de diferentes formas através dos “Mecanismos de Flexibilidade”. Dentre esses mecanismos, destacam-se o Comércio de Emissões (comércio de cotas de emissão entre as nações desenvolvidas), a Implementação Conjunta (transferência de cotas de emissão entre as nações desenvolvidas vinculadas a projetos específicos de redução de emissão) e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL.

O MDL é o único mecanismo de flexibilidade que envolve os países em desenvolvimento. Os principais objetivos do MDL são: diminuir o custo global de redução de emissões de gases lançados na atmosfera e que produzem o efeito estufa e, ao mesmo tempo, também apoiar iniciativas que promovam o desenvolvimento sustentável em países em desenvolvimento. Esses objetivos simultâneos refletem a necessidade de ação coordenada entre países desenvolvidos e em desenvolvimento, que, apesar de posicionamentos distintos, dividem o objetivo comum de reduzir o acúmulo de GEE.

O princípio básico do MDL é simples. Ele permite que países desenvolvidos invistam nos países em desenvolvimento em oportunidades de redução de baixo custo e que recebam créditos pela redução obtida nas emissões. Os países desenvolvidos podem então aplicar esses créditos nas metas fixadas para 2008-2012, reduzindo assim os cortes que teriam de ser feitos nas próprias economias.

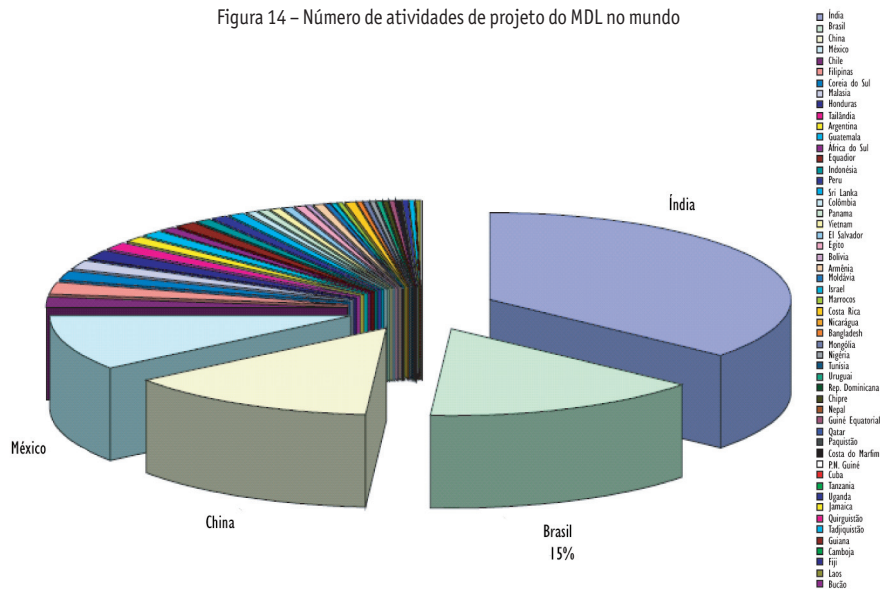
Como muitas das oportunidades de redução de emissões são mais baratas em países em desenvolvimento, isso aumenta a eficiência econômica para alcançar as metas iniciais de redução de emissões de GEE. Como a contribuição das emissões de GEE para as mudanças climáticas é a mesma, independentemente de onde elas ocorram, o impacto no meio ambiente global é o mesmo. Há uma série de requisitos que devem ser atendidos para elegibilidade dos projetos, tais como:

- participação voluntária;
- contar com a aprovação do país hospedeiro;

- atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável do país hospedeiro;
- reduzir as emissões de GEE de forma adicional ao que ocorreria na ausência da atividade de projeto do MDL;
- contabilizar o aumento de emissões de GEE que ocorram fora dos limites da atividade de projeto e que sejam mensuráveis e atribuíveis a essas atividades;
- levar em consideração a opinião de todos os atores que sofrerão os impactos das atividades do projeto;
- não causar impactos colaterais negativos ao meio ambiente local;
- proporcionar benefícios mensuráveis, reais e de longo prazo relacionados com a mitigação da mudança do clima;
- estejam relacionados aos gases e setores definidos no Anexo A do Protocolo de Quioto ou se refiram às atividades de projetos de reflorestamento e florestamento.

A Figura 14 apresenta o status atual das atividades de projeto em estágio de validação, aprovação e registro. Como pode ser visto, o Brasil ocupa o segundo lugar, com 193 projetos (15%), sendo que em primeiro lugar encontra-se a Índia com 460 e, em terceiro, a China, com 175 projetos (Status atual das atividades de projeto no âmbito do MDL no Brasil e no Mundo, 2006).

Figura 14 – Número de atividades de projeto do MDL no mundo



Fonte: Status atual das atividades de projeto no âmbito do MDL no Brasil e no Mundo, 2006

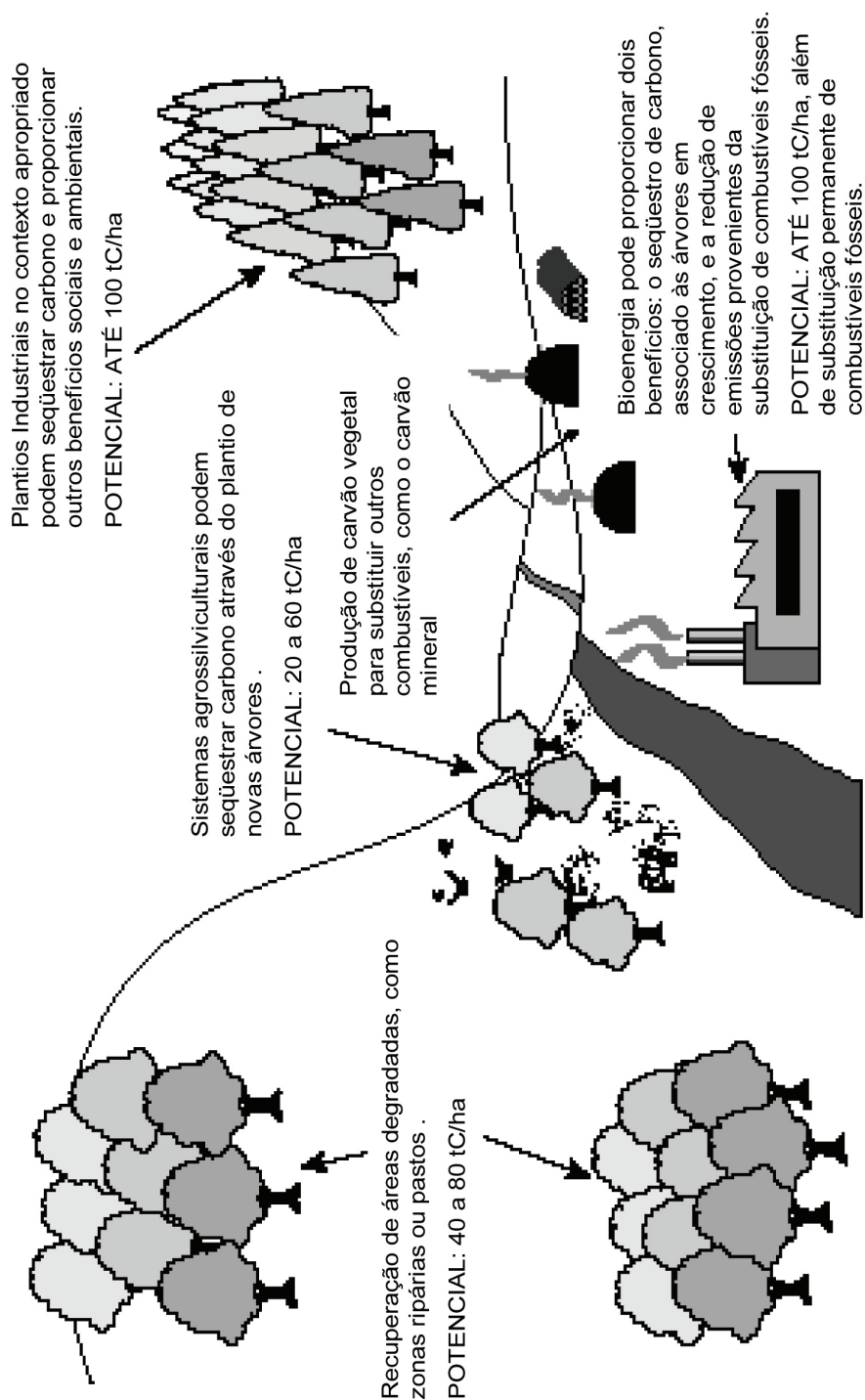
■ 8.2. Relevância do MDL para biomassa

Os crescentes níveis de CO_2 na atmosfera estão entre os principais responsáveis pela mudança do clima. No entanto, o plantio de árvores ou a recuperação de ecossistemas florestais removem CO_2 da atmosfera à medida que a vegetação cresce. Esse processo é chamado de “seqüestro de carbono”. Cerca de 50% do peso seco de vegetação é composto de carbono.

O gerenciamento do solo também é uma atividade fundamental, já que os solos contêm muito mais carbono que a atmosfera. Diferentes atividades de uso do solo terão, portanto, diversos impactos na contabilidade do carbono: algumas podem resultar em seqüestro líquido e outras em emissões líquidas de CO_2 . O papel da silvicultura em relação aos objetivos da Convenção Sobre Mudanças Climáticas foi objeto de grandes controvérsias ao longo de todas as negociações do Protocolo de Quioto. Embora se reconheça que a gestão de uso da terra seja fundamental para o ciclo do carbono, são muitas as opiniões e divergências sobre seu papel com relação às metas de redução de emissão de CO_2 . Em julho de 2001, participantes de uma reunião realizada em Bonn decidiram que o florestamento e o reflorestamento serão as únicas atividades de gestão de uso da terra passíveis de se candidatarem ao MDL. Essas atividades podem ser implantadas em grande ou pequena escala, fazendo-se uso de uma ou várias espécies florestais e envolvendo áreas florestais ou sistemas agrícolas (Figura 15), tais como:

- estabelecimento de plantios em áreas comunitárias;
- reflorestamento de áreas marginais com espécies nativas, por exemplo, áreas ripárias, encostas, áreas de entorno e entre fragmentos existentes de floresta nativa (através do plantio e da regeneração natural);
- novas plantações em escala industrial (florestamento);
- estabelecimento de plantações para produção de biomassa e geração de energia para substituição de combustíveis fósseis;
- plantações em pequena escala feitas por pequenos fazendeiros;
- introdução de árvores em sistemas agrícolas existentes (agrossilviculturas);
- recuperação de áreas degradadas através do plantio de árvores ou de regeneração natural assistida.

Figura 15 – Atividades de uso da terra elegíveis para participação no MDL e estimativa do potencial de geração de fluxos positivos de Carbono (tC/ha)



Fonte: AUKLAND et al, 2002.

■ 8.3. Oportunidades para a agroenergia

Uma das grandes oportunidades para a agroenergia é a geração de energia a partir de resíduos ou co-produtos. Os projetos de co-geração a partir do bagaço da cana, por exemplo, geram créditos e estão sendo implementados.

Por ter metodologia já aprovada, espera-se que um grande número de projetos seja apresentado. Isto abre margem para outras oportunidades, como o aproveitamento de palha de arroz, resíduos da indústria madeireira, entre outros.

Apesar da limitação quanto ao mercado para seqüestro de carbono, as atividades florestais podem se beneficiar de créditos pela substituição de fontes de energia fóssil (carvão mineral) por fonte de energia renovável (carvão vegetal) em siderurgias. Outra possibilidade seria o uso dos resíduos de serrarias para geração de energia por biomassa, já que a eficiência do aproveitamento da madeira é de cerca de 50%.

O manejo de dejetos animais, para aproveitamento do gás metano para geração de energia, é uma atividade com grande potencial, especialmente por já existir metodologia aprovada. Por se apresentar como um programa de governo, que tem uma série de barreiras técnicas e de viabilidade econômica a serem transpostas, o biodiesel possui grande potencial, especialmente quando se pensa em substituição de fonte energética. Outro fator positivo são os benefícios sociais, amplamente contemplados neste programa. Oportunidades indiretas, decorrentes das exigências do Protocolo de Quioto, devem ser também consideradas. A exemplo disso, o Japão, em um esforço para reduzir suas emissões, autorizou a mistura de 3% de álcool em sua gasolina, o que abre um mercado grande às exportações brasileiras de etanol.

A Tabela 16 demonstra que o maior número de projetos brasileiros é desenvolvido na área de geração elétrica e de cogeração com biomassa, os quais representam a maioria das atividades de projeto (55%).

Tabela 16 – Distribuição das atividades de projetos no Brasil, por tipo de projeto (continua)

Projetos na CIMGC	Número de projetos	Redução anual de emissão	Redução de emissão no 1º período de obtenção de crédito	Número de projetos	Redução anual de emissão	Redução de emissão no 1º período de obtenção de crédito
Geração elétrica	36	2.284.713	17.322.802	26%	10%	10%
Cogeração com biomassa	51	2.486.835	17.503.738	37%	11%	10%
Substituição de combustíveis	8	555.821	4.104.695	6%	3%	2%
Disposição e manejo de dejetos	20	1.652.643	16.313.797	14%	7%	10%
Indústria química	1	17.137	119.960	1%	0%	0%
Aterros sanitários	20	8.965.007	67.278.510	14%	40%	40%
Redução de N ₂ O	1	5.961.165	41.728.155	1%	27%	25%
Recuperação de metano	1	241.576	2.415.758	1%	1%	1%
Total	138	22.164.897	166.787.415	100%	100%	100%

Tabela 16 – Distribuição das atividades de projetos no Brasil, por tipo de projeto (continuação)

Projeto em Validação/ Aprovação	Número de projetos	Redução anual de emissão	Redução de emissão no 1º período de obtenção de crédito	Número de projetos	Redução anual de emissão	Redução de emissão no 1º período de obtenção de crédito
Geração elétrica	44	2.502.251	18.949.098	23%	10%	10%
Cogeração com biomassa	61	3.259.820	22.579.903	32%	13%	12%
Substituição de combustíveis	14	1.588.297	11.402.253	7%	6%	6%
Disposição e manejo de dejetos	22	1.749.102	17.176.585	11%	9%	9%
Aterros sanitários	23	9.205.249	68.960.206	12%	37%	37%
Redução de N ₂ O	2	6.043.111	42.301.777	1%	24%	23%
Indústria química	1	17.137	119.960	1%	0%	0%
Recuperação de metano	17	553.111	5.153.151	9%	2%	3%
Eficiência energética	9	70.700	629.449	5%	0%	0%
Total	193	24.988.778	187.272.382	100%	100%	100%

Fonte: Status atual das atividades de projeto no âmbito do MDL no Brasil e no Mundo – MCT, 2006

9. Considerações finais

Alguns aspectos devem ser levados em conta na consideração da biomassa como fonte de energia:

- Seu uso como fonte de energia ajuda a manter a característica renovável da Matriz Energética Brasileira;
- Sua utilização reduz a dependência de combustíveis fósseis;
- A biomassa como fonte energética se apresenta como contribuinte para um processo de transição rumo a uma matriz energética mundial com maior participação de energia renovável, ampliando o horizonte de uso das atuais fontes de carbono fóssil;
 - Promove o uso de fonte de energia com tecnologias nacionais, com potencial mercado para exportação;
 - Mesmo sendo considerada como fonte renovável de energia, esforços devem ser efetuados para que esta seja sempre utilizada de maneira sustentável;
 - As taxas de emissões de CO₂ pela queima de biomassa para produção de energia são praticamente anuladas quando a biomassa volta a crescer;
 - O desenvolvimento da agroenergia, no Brasil, tem potencial para promover importante aumento de investimentos, empregos, renda e desenvolvimento tecnológico e é uma oportunidade para atender parte da crescente demanda mundial por combustíveis de reduzido impacto ambiental;
 - O uso da biomassa serve de facilitador para promover uma política pública transversal com viés social. O uso da biomassa pode propiciar às comunidades isoladas, aos agricultores individualmente, cooperativados ou associados, e aos assentamentos de reforma agrária, meios para gerar sua própria energia, em especial nas regiões remotas do território nacional;
 - Apesar de existirem algumas controvérsias sobre um potencial conflito entre a agroenergia e produção de alimentos, os estudos atuais não consideram que a expansão da agroenergia afetará a produção de alimentos para o consumo interno, principalmente da cesta básica. Pelo contrário, co-produtos do biodiesel, por exemplo, a torta de soja e de girassol, tendem a complementar a oferta de produtos para a alimentação

humana e animal, enquanto os resíduos celulósicos das culturas alimentares apresentam um elevado potencial a ser aproveitado;

- É necessário o investimento em pesquisa e desenvolvimento de tecnologias agropecuárias e industriais adequadas às cadeias produtivas da agroenergia, que proporcionem maior competitividade, agregação de valor aos produtos e redução de impactos ambientais. Concomitantemente, deverá contribuir para a inserção econômica e social, inclusive com o desenvolvimento de tecnologias apropriadas ao aproveitamento da biomassa energética em pequena escala;

- As culturas energéticas devem ser produzidas respeitando a sustentabilidade dos sistemas produtivos e desestimulando a expansão injustificada da fronteira agrícola ou o avanço rumo a sistemas sensíveis ou protegidos, como a floresta amazônica, a região do Pantanal, entre outras. Poderá, ainda, contribuir para a recuperação de áreas degradadas, podendo ser associadas ao seqüestro de carbono;

- Adicionalmente, o Brasil reúne vantagens comparativas que lhe permitem ambicionar posição de destaque no mercado internacional de biocombustíveis e implementar ações de promoção dos produtos energéticos derivados da agroenergia. A ampliação das exportações, além da geração de divisas, consolidarão o setor e impulsionarão o desenvolvimento do País.

10. Referências bibliográficas

- Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR 10.004 – Resíduos Sólidos (Classificação), 2004.
- Atlas de Energia Elétrica do Brasil, 2ª edição, 2005. Disponível em www.aneel.gov.br/15.htm. Acesso em 18/08/2006.
- AUKLAND, L. et al. Criando as Bases para o Desenvolvimento Limpo: Preparação do Setor de Gestão de Uso da Terra. Um Guia Rápido para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). IIED, 2002.
- BARRERA, P. Biodigestores: energia, fertilidade e saneamento para a zona rural. São Paulo: Ícone, 1993.
- BERNOW, B. S., D. MARROW. Environmental Externalities Measurement: Quantification, Valuation and Monetization, 1990. In: Hohmeyer, O., Ottinger, R. L. External Environmental Costs of Electric Power, 1991.
- Biomass Power Generation – Sugar Cane Bagasse and Trash. PNUD/CTC, 1ª edição, Piracicaba, Brazil, 2005.
- CETESB. Relatório de Qualidade do Ar no Estado de São Paulo 2003, São Paulo, 2004.
- COELHO, S.T. Biofuels - Advantages and Trade Barriers - Background Paper to the Expert Meeting for Sectoral Trade Review of Developing Country Participation in New and Dynamic Sectors Session on Biofuels - Genebra, Fevereiro, 2005.
- COMASE – Comitê Coordenador das Atividades de Meio Ambiente do Setor Elétrico. Referencial para orçamentação dos programas socioambientais, Vol II – Usinas termelétricas, 1994.
- CORTEZ, L. A. B.; BAJAY, S. V.; BRAUNBECK, O. Uso de resíduos agrícolas para fins energéticos: o caso da palha de cana-de-açúcar. Revista Brasileira de Energia, Rio de Janeiro, 1999.
- Diretrizes da Política de Agroenergia 2006-2011, 2005. Disponível em: www.biodiesel.gov.br/docs/diretrizesdepol%EDticadeagroenergia14novvers.03.pdf. Acesso em outubro de 2006.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). “Ricinocultura consorciada com no Semi-Árido nordestino, visando a produção de biodiesel, emprego e renda”, 2002.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), 2006. Disponível em <www.cnpsa.embrapa.br>. Acesso em outubro de 2006.
- Estudo sobre as possibilidades e impactos da produção de grandes quantidades de etanol visando à substituição parcial da gasolina no mundo. UNICAMP, 2005.
- FREITAS, M. A. V.; DI LASCIO, M. A.; ROSA, L. P. Biomassa energética renovável para o desenvolvimento sustentável da Amazônia. Revista Brasileira de Energia, Rio de Janeiro, 1996.
- FULTON et al Biofuels for Transport - An International Perspective. IEA, Viena, 2004.
- FURTADO, R. C., The Incorporation of Environmental Costs into Power System Planning in Brazil, Tese de Doutorado, Imperial College, Universidade de Londres, Londres, UK, 1996.
- GOLDEMBERG, J. LUCON. O. Option Paper on Renewable Energy, Energy Efficiency and Climate Change Canadian Renewable Energy Alliance (CanREA), COP 11/MOP 1. Montreal, 2005.
- GOLDEMBERG, J. The Case for Energy Renewables. In: International Conference for Renewable Energies. Thematic Background Paper, Alemanha, 2004.
- GOLDEMBERG et al., Ethanol learning curve- the Brazilian experience, Biomass and Bioenergy, 2003.
- GOLDEMBERG, J. “Brazilian Energy Initiative” World Summit On Sustainable Development, Joanesburgo, África do Sul. Setembro, 2002.
- GUARDABASSI, P. M. Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento, Tese de Mestrado, USP, 2006.
- HALL, D. O.; HOUSE, J. I.; SCRASE, I. Overview of biomass energy. In: ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. Industrial uses of biomass energy: the example of Brazil. London: Taylor & Francis, 2000.
- HIDROVEG “Estimativa sobre o potencial de insumos residuais no país”. Comunicação pessoal, 2002.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). II Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Disponível

em: www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaoodevida/pnsb/lixo_coletado/defaultlixo.shtm, 2000. Acesso em 04/06/2002.

IEA Energy Statistics and Energy Balances, 2002. Disponível em: www.iea.org/textbase/stats. Acesso em agosto de 2006.

IEA Energy Statistics and Energy Balances, Energy Balances of non-OECD countries 2002-2003, 2005.

IEA (International Energy Agency) "World Energy Outlook", Paris, 1998.

IPCC Intergovernmental Panel on Climate Change Greenhouse gas inventory reference, 1996.

JOVEM CIENTISTA. "Geração de energia elétrica em Pilha Combustível utilizando glicerol". Premiado: Maurício Brandão – UFRJ. Disponível em www.premiojovemcientista.org.br, 2004.

JUCA, J. F. Disposição Final dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003.

KAREKESI et al. Status of Biomass Energy in Developing Countries and Prospects for International Collaboration. In GFSE-5 Enhancing International Cooperation on Biomass. Background Paper. Áustria, 2005.

KAREKESI, S., COELHO, S. T., LATA, K. Traditional Biomass Energy: Improving its Use and Moving to Modern Energy Use. In: International Conference for Renewable Energies, 2004, Bonn. Thematic Background Paper, Alemanha, 2004.

KATIB, et al. in UNDP, UNDESA, WEC World Energy Assessment - Energy and the Challenge of Sustainability. Overview: 2004 Update. Nova Iorque, 2004.

KHENNAS S. et al. Rural Energy Services: A handbook for sustainable energy development. Intermediate technology publications, Londres, 1999.

KHENNAS S., WALUBENGO D. AND WEYMAN A. Rural stoves West Kenya evaluation. Intermediate Technology Development Group (ITDG) internal document, Nairobi, 1995.

LA ROVERE e BRAGA. "Óleos vegetais para fins energéticos: análise comparativa de algumas avaliações econômicas". FINEP, 1981.

LEFEVRE T. et al, Status of wood energy data in Asia. In IEA's First biomass workshop. Paris, 1997.

LUENGO, C. A.; BEZZON, G. Energéticos derivados da biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. (Coord.). Tecnologias de conversão energética da biomassa. Manaus: EDUA, EFEI, 1997.

MACEDO et al. Balanço das emissões de gases do efeito estufa na produção e no uso do etanol no Brasil. Governo do Estado de São Paulo/Secretaria do Meio Ambiente, 2004.

MICHAELIS. Moderno Dicionário de Língua Portuguesa. São Paulo, 1998

MORET, A., RODRIGUES, D., ORTIZ, L. Critérios e Indicadores de Sustentabilidade para a Bioenergia, Fórum Brasileiro de ONG's e Movimentos Sociais – FBOMS, 2006.

MUYLAERT, M. S. Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta. Ed. COPPE/UFRJ, 2000.

NOGUEIRA, L. A. H. Bioenergias e Sustentabilidade: anexos e métodos São Paulo, 2005.

NOGUEIRA, L.A.H. e MACEDO, I.C. Biocombustíveis Cadernos NAE / Núcleo de Assuntos Estratégicos da Presidência da República – nº 2. ISSN 1806-8588. Brasília, 2005.

OLIVEIRA, L. B., Potencial de Aproveitamento Energético de Lixo e de Biodiesel de Insumos Residuais No Brasil, Tese de Doutorado, UFRJ, 2004.

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

OLIVEIRA, L. B., Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos e Abatimento de Emissões de Gases do Efeito Estufa, Tese de Mestrado, UFRJ, 2000.

ORTEGA, E.; WATANABE, M. Os danos ocultos gerados pela agricultura convencional, Relatório Parcial de Iniciação Científica – FEA – UNICAMP, 2005. Disponível em: www.unicamp.br/fea/ortega/extensao/08-Externalidades

Marcos.pps. Acesso em outubro de 2006.

Plano Nacional de Agroenergia, 2005. Disponível em: www.bioenergy-world.com/americas/2006/IMG/pdf/Brazil_Plano_Nacional_de_Agroenergia.pdf. Acesso em outubro de 2006.

PNUMA - PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE *Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*, Texto integral, Genebra, 1992

RAMAGE, J.; SCURLOCK, J. Biomass. In: BOYLE, G. (Ed.). *Renewable energy: power for a sustainable future*. Oxford: Oxford University Press, 1996.

REIS, Antônio Junqueira. Potencial energético e fertilizante do lixo. Folha de São Paulo, Caderno Regional – Nordeste, 1991.

ROSA, L.P. et al. "Geração de Energia a partir de Resíduos Sólidos Urbanos e Óleos Vegetais". In: TOLMASQUIM, M.T (Coord.) *Fontes Alternativas de Energia no Brasil – CENERGIA*, 2003.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. Industrial uses of biomass energy: the example of Brazil. London: Taylor & Francis, 2000.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira. Editora Unicamp, 2005.

SANTOS, M. A. A Legislação Ambiental Norte Americana Aplicada a Geração Termelétrica, Trabalho de cooperação técnica PPE/COPPE/UFRJ e o DPA – ELETROBRAS, 1992.

Scientific American Brasil, ano 5, número 53, 2006.

SEIXAS, J. et al. Construção e funcionamento de biodigestores. Brasília: EMBRAPA - DID. EMBRAPA-CPAC. Circular técnica 4, 1980.

SGANZERLA, E. Biodigestores: uma solução. Porto Alegre. Agropecuária, 1983.

SOUZA C. F. Biodigestão anaeróbia de dejetos de suínos: obtenção de dados e aplicação no desenvolvimento de um modelo dinâmico de simulação da produção de biogás. Tese (Doutorado em Zootecnia - Produção Animal) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2001.

SPADARO, J.V., RABL, A., External costs of Energy: Application of the Extern Methodology in France, Final Report for Contrac JOS3 – CT95- 0010, 1998.

Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no mundo. Disponível em www.mct.gov.br/upd-blob/10434.pdf. Acesso em 06.11.06.

UNDP, UNDESA, WEC World Energy Assessment - Energy and the Challenge of Sustainability. Overview: 2004 Update. Nova Iorque, 2004.

UNDP, UNDESA, WEC World Energy Assessment. ISBN 9211261260. Nova Iorque, 2000.

USEPA. Summary results from NBB/USEPA tier I. "Health and environmental effects testing for biodiesel under the requirements for USEPA registration of fuels and fuel additives" (40 CFR Part 79, Sec 21 1 (b)(2) and 21 1 (e)). Final report, 1998

VOIGT, N. et al. Gestão Ambiental de Resíduos, COPPE-UFRJ, 1999.

WALTER, A. C. S.; NOGUEIRA, L. A. H. Produção de eletricidade a partir da biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S. (Coord.). *Tecnologias de conversão energética da biomassa*. Manaus: EDUA, EFEI, 1997.

sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/default.aspx?idPagina=123, acesso em 18.10.06.

www.aneel.gov.br (Banco de informações de geração). Acesso em 20.10.06.

www.biodiesel.gov.br. Acesso em 16.10.06.

www.epe.gov.br (Leilões). Acesso em 20.10.06.

www.mme.gov.br (PROINFA). Acesso em 20.10.06.

www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=8213, acesso em 18.10.06

www.portalunica.com.br/portalunica/?Secao=referencia&SubSecao=banco%20de%20imagens&SubSubSecao=

cana-de-açúcar&Titulo=Colheita , acesso em 23.10.06.

www.portalunica.com.br/portalunica/?Secao=referencia&SubSecao=banco%20de%20imagens, acesso em 23.10.06.

www.wwf.org.br/natureza_brasileira/prog_projetos/agricultura/agr_soja/agr_soja_problemas/agr_soja_problemas_erosao/index.cfm, acesso em 20.10.06.

www.wwf.org.br/natureza_brasileira/prog_projetos/agricultura/index.cfm, acesso em 20.10.06.

ANEXO – Exemplo de proposta de utilização de biomassa para recebimento de créditos de carbono

O texto a seguir foi extraído do documento O Novo Ciclo da Cana : Estudo sobre a Competitividade do Sistema Agroindustrial da Cana-de-açúcar e Prospecção de Novos Empreendimentos. (IEL/NC; SEBRAE, 2005) disponível no site <http://www.cogensp.com.br>) e incluído nesta Nota Técnica como ilustração dos movimentos crescentes de adaptação do setor agro-industrial à produção de energia e a comercialização de créditos de carbono.

“O crédito de carbono começa a se transformar numa possibilidade concreta de novos financiamentos para o Sistema Agro-Industrial (SAG) da Cana-de-açúcar, advindos da co-geração de energia. Isto porque o Protocolo de Kyoto permite que empresas dos países desenvolvidos troquem carbono, produzido em seus países, por investimentos em projetos que promovam a captura de gás carbono, em países emergentes.

Nesse sentido, o SAG da Cana-de-açúcar está se credenciando para receber créditos de carbono, pelos seus projetos de produção de energia a partir da biomassa. As usinas paulistas Vale do Rosário, Moema e Cia. Energética Santa Elisa, que já co-geram energia, a partir do bagaço da cana, realizam investimentos em um programa com a Ecoenergy para comercialização de créditos de carbono no mercado internacional. Essas três usinas fecharam contrato com a agência de energia da Suécia para a comercialização desses créditos por US\$ 5,00 a tonelada. Somente a Usina Vale do Rosário tem potencial de comercialização para movimentar US\$ 2,5 milhões em créditos de carbono advindos de 329 mil toneladas de CO₂ não lançados na atmosfera. O objetivo da empresa é chegar a ter entre 10% e 15% de seu faturamento com produção de energia. A Tate&Lile, maior *trading* de açúcar no mundo, com atuação na Europa e na América Central, possui capacidade de co-geração de 1.850 kW de potência de energia elétrica em sua usina brasileira Mercocítrico, em Santa Rosa do Viterbo, em São Paulo (ANEEL, 2005).

A liquidação financeira dos projetos (em andamento) permitirá às empresas do SAG da Cana-de-açúcar uma nova e suplementar fonte de receita, advinda de uma prática já em uso há décadas, principalmente pelas usinas paulistas, que é a co-geração de energia.

O SAG da Cana-de-açúcar apresenta enorme possibilidade de credenciar-se integralmente para a venda de certificados de crédito de carbono.

- Competitividade do SAG da Cana-de-açúcar

Isso ocorre porque todas as usinas/destilarias já produzem energia elétrica a partir da queima de bagaço de cana, para atender às suas necessidades de vapor e energia e possuem potencial de produzirem excedentes de energia destinados à venda para as empresas distribuidoras de eletricidade, desde que se capacitem para isto (SOUZA, 2005).

Fazendo-se uma simulação e tomando-se a safra 2003/04 como referência, obtêm-se os seguintes dados:

– A safra 2003/2004 produziu 359.315.559 toneladas de cana e gerou 119.771.853 toneladas de bagaço (de acordo com os parâmetros médios mostrados na Tabela 1);

– Esta quantidade de bagaço tem potencial de gerar 426.537,94 MWh de energia, caso todo o bagaço seja totalmente destinado à queima;

– Isto credenciaria o SAG da Cana-de-açúcar a obter créditos equivalentes a cerca de 1.015.015 toneladas de carbono;

– Essa quantidade de carbono, negociada a US\$ 5,00 a tonelada (preços negociados nas usinas pesquisadas), geraria uma receita líquida em créditos de carbono de US\$ 5.075.075,00 por ano. É necessário ressaltar que este valor representa receita líquida porque o gasto da geração de energia deverá ser coberto pela venda do excedente às empresas distribuidoras de energia elétrica;

– A receita anual da venda da energia pelo SAG da Cana-de-açúcar seria de R\$ 3.522.701.558,82, supondo que toda a energia produzida seja integralmente comercializada com as empresas distribuidoras de energia; e,

– Como os projetos de venda de carbono possuem prazo de validade fixado em 21 anos, o SAG da Cana-de-açúcar teria, neste período, uma receita líquida acumulada de US\$ 158.747.150,00.

Base de cálculo de receita gerada com venda de Crédito de Carbono		
1 tonelada de bagaço	=	3 toneladas de cana
280,80 toneladas de cana	=	1 MW de energia
118 toneladas de bagaço	=	1 tonelada de CO ₂
1 tonelada de CO ₂	=	US\$ 5,00
1 MWh	=	R\$ 100,00

