

Série
RECURSOS ENERGÉTICOS

NOTA TÉCNICA DEA 15/14

Inventário Energético de Resíduos Rurais

Rio de Janeiro
Outubro de 2014



Ministério de
Minas e Energia



(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso - “*double sided*”)



GOVERNO FEDERAL

Ministério de Minas e Energia

Ministro

Edison Lobão

Secretário Executivo

Márcio Pereira Zimmermann

Secretário de Planejamento e Desenvolvimento Energético

Altino Ventura Filho

Série
RECURSOS ENERGÉTICOS

NOTA TÉCNICA DEA 15/14
Inventário Energético de Resíduos Rurais



Empresa de Pesquisa Energética

Empresa pública, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, instituída nos termos da Lei nº 10.847, de 15 de março de 2004, a EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras.

Presidente

Maurício Tiomno Tolmasquim

Diretor de Estudos Econômicos e Energéticos

Amilcar Gonçalves Guerreiro

Diretor de Estudos de Energia Elétrica

José Carlos de Miranda Farias

Diretor de Estudos de Petróleo, Gás e Biocombustível

Maurício Tiomno Tolmasquim (interino)

Diretor de Gestão Corporativa

Álvaro Henrique Matias Pereira

Coordenação Geral

Maurício Tiomno Tolmasquim
Amilcar Gonçalves Guerreiro

Coordenação Executiva

Ricardo Gorini de Oliveira

Coordenação Técnica

Luciano Basto Oliveira

Equipe Técnica

Guilherme Oliveira Arantes
Luciano Basto Oliveira
Luiz Gustavo Silva de Oliveira
Maria Fernanda Bacile Pinheiro

URL: <http://www.epe.gov.br>

Sede

SCN – Quadra 1 – Bloco C Nº 85 – Salas 1712/1714
Edifício Brasília Trade Center
70711-902 - Brasília – DF

Escritório Central

Av. Rio Branco, n.º 01 – 11º Andar
20090-003 - Rio de Janeiro – RJ

Rio de Janeiro
Outubro de 2014

(Esta página foi intencionalmente deixada em branco para o adequado alinhamento de páginas na impressão com a opção frente e verso - “*double sided*”)

Série
RECURSOS ENERGÉTICOSNOTA TÉCNICA DEA 15/14
*Inventário Energético de Resíduos Rurais***SUMÁRIO**

1	INTRODUÇÃO	3
2	RESÍDUOS RURAIS NO BRASIL	4
2.1	CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS	4
2.2	RESÍDUOS AGRÍCOLAS	5
2.2.1	SOJA	11
2.2.2	MILHO	12
2.2.3	ARROZ	14
2.2.4	TRIGO	16
2.2.5	MANDIOCA	17
2.2.6	FEIJÃO	19
2.2.7	CONSOLIDAÇÃO DA PRODUÇÃO DE RESÍDUOS AGRÍCOLAS E ENERGIA PRIMÁRIA	20
2.3	RESÍDUOS DA PECUÁRIA	23
2.4	DISPONIBILIDADE DE RESÍDUOS RURAIS NO BRASIL	26
3	CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS RURAIS	30
3.1	TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DOS RESÍDUOS	30
3.1.1	A CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA	30
3.1.2	TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA A PARTIR DOS RESÍDUOS	33
3.1.3	DIGESTÃO ANAERÓBICA E PRODUÇÃO DE BIOGÁS	34
3.1.4	TECNOLOGIAS DE PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS	36
3.1.5	ROTAS TECNOLÓGICAS SELECIONADAS	38
4	POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS	40
4.1	POTENCIAL TÉCNICO PARA GERAÇÃO ELÉTRICA	41
4.2	POTENCIAL TÉCNICO PARA PRODUÇÃO DE BIOMETANO	43
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
6	BIBLIOGRAFIA	45

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Série Histórica de Produção por Safras - Lavouras Temporárias e Permanentes	6
Tabela 2 Série Histórica Área Plantada - Lavouras Temporárias e Permanentes	7
Tabela 3 Produção em 2010 das culturas selecionas	10
Tabela 4 Síntese de Indicadores de Produção, Disponibilidade e Poder Calorífico dos Resíduos Agrícolas	20
Tabela 5 Produção de Resíduos em 2010	21
Tabela 6 Energia Primária Disponível nos Resíduos em 2010	22
Tabela 7 Rebanhos Confinados	24
Tabela 8 Produção de resíduos pecuários e fatores de metanização	24
Tabela 9 Produção de Resíduos Pecuários 2010	25
Tabela 10 Energia Primária Disponível nos Resíduos em 2010	26
Tabela 11 Energia Primária Disponível nos Resíduos em 2010	27
Tabela 12 Composição típica do biogás	34
Tabela 13 Contaminantes e Impactos	36
Tabela 14 Contaminantes e Tratamento	37
Tabela 15 Consumo energético para disponibilização dos resíduos agrícolas	40
Tabela 16 Escalas das Usinas utilizadas	41
Tabela 17 Potencial Técnico para Geração de Eletricidade	42
Tabela 18 Potencial técnico para rota 4 - Nº de unidades	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Evolução Regional da Produção Agrícola	8
Figura 2 Evolução da Produtividade das Principais Culturas - Cereais e Leguminosas Brasil - em kg/ha	9
Figura 3 Rendimento Médio da Produção de Soja - Brasil e Regiões em 2010	11
Figura 4 Grãos de Soja na Vagem Seca	12
Figura 5 Rendimento Médio da Produção de Milho - Brasil e Regiões em 2010	13
Figura 6 Milho	13
Figura 7 Rendimento Médio da Produção de Arroz - Brasil e Regiões em 2010	14
Figura 8 Palha do Arroz	15
Figura 9 Arroz	16
Figura 10 Rendimento Médio da Produção de Trigo - Brasil e Regiões em 2010	16
Figura 11 Trigo	17
Figura 12 Rendimento Médio da Produção de Mandioca - Brasil e Regiões em 2010.	18
Figura 13 Mandioca	18
Figura 14 Rendimento Médio da Produção de Feijão - Brasil e Regiões em 2010.	19
Figura 15 Feijão	19
Figura 16 Energia Primária Disponível de Biomassa Residual Agrícola	28
Figura 17 Potencial Disponível de Biogás de resíduos Pecuários	29
Figura 18 Rotas tecnológicas para conversão da biomassa em produtos e serviços energéticos	31
Figura 19: Fluxograma do Processo de Biodigestão Anaeróbica	35

1 INTRODUÇÃO

Uma avaliação do potencial dos resíduos agrícolas, pecuários e agroindustriais como recurso energético, considerando-se recursos, oferta e usos, com o foco na disponibilização de biomassa energética, foi elaborada neste documento a fim de subsidiar um plano de energia para o Brasil.

A atenção foi concentrada nas culturas e rebanhos que apresentam maior representatividade no país, considerando como aspecto de maior significância a oferta de biomassa agrícola, fator primordial para a disponibilidade de resíduos, e as criações confinadas, cujo esterco é um problema e está concentrado. Além disso, levou-se em consideração a existência de dados e referências sobre o aproveitamento energético dos resíduos, assim como a facilidade de acessá-los.

Neste sentido, o presente trabalho apresenta a disponibilidade de resíduos rurais, dadas as principais condicionantes, a caracterização das principais tecnologias para conversão energética, com a definição de energéticos mais apropriados, e por último, a quantificação do potencial técnico do aproveitamento energético destes resíduos dadas as condicionantes da biomassa e das tecnologias.

O trabalho está dividido em seis itens. Este primeiro item introdutório é seguido por um segundo item que classifica as principais produções rurais, sejam agrícolas ou pecuárias, e pela caracterização dos resíduos, com respectivos indicadores de produtividade de resíduos e conteúdo energético. O terceiro item apresenta a seleção e caracterização das tecnologias mais adequadas para o aproveitamento energético dos resíduos e a definição dos energéticos analisados. O quarto item tem como principal objetivo apresentar o potencial técnico de aproveitamento energético dos resíduos para a produção dos energéticos definidos, sendo seguido pelos quinto e sexto itens que trazem as considerações finais e as referências utilizadas no trabalho, respectivamente.

2 RESÍDUOS RURAIS NO BRASIL

A utilização dos resíduos produzidos no Brasil necessita ainda de avaliações acuradas e precisas sobre o seu potencial de recuperação economicamente viável, além de análises completas de seus ciclos de vida como produtos energéticos. Apesar da escassez de informações disponíveis sobre estes parâmetros, decorrente principalmente da ausência, até o presente momento, 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 classificação dos resíduos, a quantificação da geração física de resíduos e de seu conteúdo energético são os primeiros passos na avaliação de seu potencial de uso. Este item do trabalho apresenta esta quantificação em três subitens diferentes.

2.1 Caracterização dos Resíduos

As fontes de biomassa residual que possuem potencial para serem utilizadas como fonte de energia são bastante variadas e podem ser classificadas em resíduos primários, secundários ou terciários, sendo todos avaliados como subprodutos da produção de biomassa ou de outras atividades. Os resíduos primários, também chamados de resíduos agrícolas e florestais, são aqueles verificados durante a colheita agrícola e florestal, tais como as palhas e resíduos da madeira. Os resíduos secundários, também conhecidos como resíduos agroindustriais, são produzidos durante o processamento da biomassa para a produção de alimentos ou para a produção da própria biomassa como é o caso da casca de arroz. Por fim, os resíduos terciários são encontrados após as mercadorias acabadas, a partir da biomassa, terem sido utilizadas, o que inclui o lixo urbano (FAAIJ, 2004).

De acordo com NOGUEIRA e LORA (2002), a biomassa como recurso energético pode ser dividida em três grupos principais:

- a) Biomassa energética florestal: são as biomassas provenientes dos recursos florestais, seus produtos e subprodutos, que incluem 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 e serrarias.

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, porém rotas mais complexas também são empregadas para a produção de combustíveis líquidos e gasosos, como metanol, etanol, gases de síntese, licor negro, entre outros;

- b) Biomassa energética agrícola: são as biomassas 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 a fermentação, hidrólise e esterificação, empregadas para a produção de combustíveis líquidos como o etanol, o biodiesel e os 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.
 - 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 gasificação, 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 o esterco animal;
- c) Rejeitos urbanos: a biomassa contida em resíduos sólidos e líquidos urbanos têm origem diversa e se encontra no lixo e no esgoto. O lixo urbano é uma mistura de metais, plásticos, vidros, resíduos celulósicos e vegetais, e matéria orgânica. As rotas tecnológicas de seu aproveitamento energético são: a combustão direta, a gasificação pela via termoquímica 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.

2.2 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 quantidade de resíduos agrícolas pode ser consideravelmente elevada, representando, em geral, duas vezes mais a do 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.

As principais culturas agrícolas entre os cereais, leguminosas e oleaginosas são 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 na tabela 1 e na tabela 2. Obviamente a cana de açúcar é a cultura mais importante em produção com 75% da produção e somente 14% da área plantada.

Com relação a 2005, a produção agrícola brasileira atingiu um novo recorde em 2010. Foram 950 milhões de toneladas colhidas, 54% maior que na safra de 2005. O bom desempenho da soja (+34%), do milho (+57%) e da cana-de-açúcar garantiu o crescimento da produção. Com o cenário internacional favorável, os produtores optaram por um bom padrão tecnológico, investindo em insumos, que foi fator determinante. (IBGE, 2011).

Tabela 1
Série Histórica de Produção por Safras - Lavouras Temporárias e Permanentes
Brasil (1.000 t/ano)

<i>Cultura</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000</i>	<i>2005</i>	<i>2010</i>
Lavouras Temporárias (LT)					
<i>Cana-de-açúcar</i>	262.674	303.699	326.121	422.957	717.462
<i>Soja</i>	19.898	25.683	32.821	51.182	68.756
<i>Milho</i>	21.348	36.267	32.321	35.113	55.395
<i>Arroz</i>	7.421	11.226	11.135	13.193	11.236
<i>Algodão</i>	1.783	1.442	2.007	3.666	2.950
<i>Feijão</i>	2.234	2.946	3.056	3.022	3.159
<i>Mandioca</i>	24.322	25.423	23.041	25.872	24.524
<i>Trigo</i>	3.094	1.534	1.726	4.659	6.171
<i>Demais LT</i>	9.129	10.604	12.618	17.520	18.943
Lavouras Permanentes (LP)					
<i>Laranja</i>	14.016	15.870	17.064	17.853	18.102
<i>Banana</i>	5.616	5.690	5.777	6.703	6.963
<i>Café</i>	2.930	1.860	3.807	2.140	2.906
<i>Uva</i>	805	837	1.024	1.233	1.351
<i>Maçã</i>	408	515	865	851	1.279
<i>Cacau (em amêndoa)</i>	356	297	197	209	235
<i>Sisal ou agave (fibra)</i>	185	118	194	207	247
<i>Castanha de caju</i>	108	185	139	153	104
<i>Pimenta-do-reino</i>	78	34	39	79	52
<i>Demais LP</i>	4.835	6.189	7.728	9.947	11.010
Total Lavouras Temporárias	351.903	418.824	444.846	577.183	908.597
Total Lavouras Permanentes	29.337	31.595	36.834	39.374	42.249
Total Brasil (LT e LP)	381.240	450.419	481.680	616.557	950.846

Fonte: IBGE (2011).

Tabela 2
Série Histórica Área Plantada - Lavouras Temporárias e Permanentes
Brasil (1.000 ha)

<i>Cultura</i>	<i>1990</i>	<i>1995</i>	<i>2000</i>	<i>2005</i>	<i>2010</i>
Lavouras Temporárias (LT)					
<i>Cana-de-açúcar</i>	4.322	4.638	4.880	5.815	9.165
<i>Soja</i>	11.585	11.703	13.694	23.427	23.339
<i>Milho</i>	12.024	14.182	12.648	12.249	12.968
<i>Arroz</i>	4.159	4.421	3.705	3.999	2.778
<i>Algodão</i>	1.516	1.122	812	1.266	832
<i>Feijão</i>	5.304	5.366	4.441	3.966	3.656
<i>Mandioca</i>	1.976	2.010	1.737	1.930	1.812
<i>Trigo</i>	3.350	1.036	1.536	2.363	2.183
<i>Demais LT</i>	1.745	1.481	2.122	2.949	2.328
Lavouras Permanentes (LP)					
<i>Café</i>	2.938	1.980	2.292	2.333	2.161
<i>Laranja</i>	914	862	857	806	834
<i>Castanha de caju</i>	594	705	653	700	760
<i>Cacau (em amêndoa)</i>	669	741	707	675	663
<i>Banana</i>	494	519	534	496	494
<i>Côco-da-baía</i>	216	245	267	292	277
<i>Sisal ou agave (fibra)</i>	267	174	205	240	264
<i>Uva</i>	59	61	60	73	81
<i>Maçã</i>	22	27	30	35	39
<i>Pimenta-do-reino</i>	35	24	16	32	23
<i>Demais LP</i>	963	556	625	671	973
<i>Total Lavouras Temporárias</i>	45.981	45.960	45.574	57.964	59.059
<i>Total Lavouras Permanentes</i>	7.172	5.893	6.245	6.355	6.569
Total Brasil (LT e LP)	53.152	51.853	51.819	64.319	65.628

Fonte: IBGE (2011).

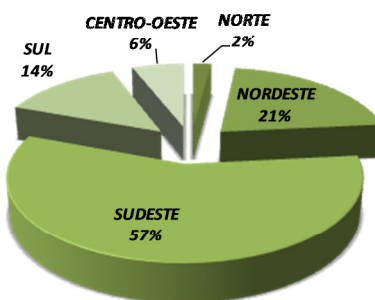
Os cereais, leguminosas e oleaginosas listados acima fazem parte das chamadas culturas temporárias, ou seja, normalmente com ciclo vegetativo inferior a um ano, são as culturas de curta ou média duração, que após a colheita necessitam de novo plantio para produzir. Dentro das culturas temporárias, encontra-se a cana-de-açúcar, lavoura que possui a maior quantidade produzida e maior rendimento médio dentre todas as culturas temporárias. Uma vez que o estágio de aproveitamento energético do resíduo da cana-de-açúcar encontra-se num nível bastante superior ao das outras culturas, foi realizado um trabalho à parte sobre esta cultura.

Com relação às culturas denominadas “culturas permanentes”, as de longo ciclo vegetativo que permitem colheitas sucessivas sem necessidade de novo plantio (IBGE, 2011), destaca-se a lavoura da laranja, cuja quantidade produzida foi da ordem de 18.101.708 toneladas em 2010. Esse montante corresponde a cerca de 43% da quantidade total produzida entre as culturas permanentes naquele ano.

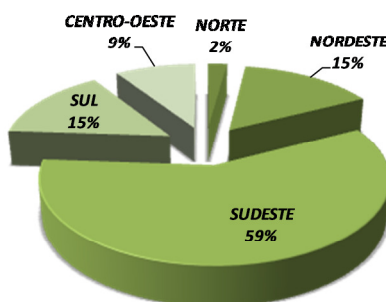
A área plantada apresentou um acréscimo entre as safras de 2010 e 2005, ocasionada pela maior área cultivada de cana-de-açúcar, que cresceu 57% no período. O acréscimo foi devido

ao aumento da demanda por etanol. Para as outras culturas pode ser vista uma manutenção das áreas plantadas com um aumento do rendimento médio, de 35% para a soja e de 49% para o milho. Também se verifica uma importante alteração na participação das regiões produtoras, havendo um deslocamento das regiões Sul e Sudeste para a região Centro-Oeste, conforme a Figura 1.

Produção Agrícola - 1990: 468.164.286 t



Produção Agrícola - 2000: 592.113.826 t



Produção Agrícola - 2010: 950.845.831 t

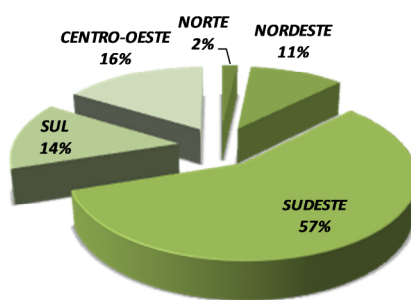


Figura 1

Evolução Regional da Produção Agrícola

Fonte: IBGE (2011).

Em termos de produtividade, a atividade agrícola brasileira apresentou expressivos ganhos entre as safras da década de 90 e a safra 2010 (IBGE, 2011), com crescimentos de 72% na produtividade da soja, 141% do milho, 105% do feijão, 127% do arroz, 202% do algodão, 206% do trigo, resultando em uma elevação média nacional de 85%, sem considerar a cultura da cana-de-açúcar. A evolução da produtividade brasileira das principais culturas de cereais, leguminosas e oleaginosas, em kg/ha, pode ser vista na Figura 2, a seguir.

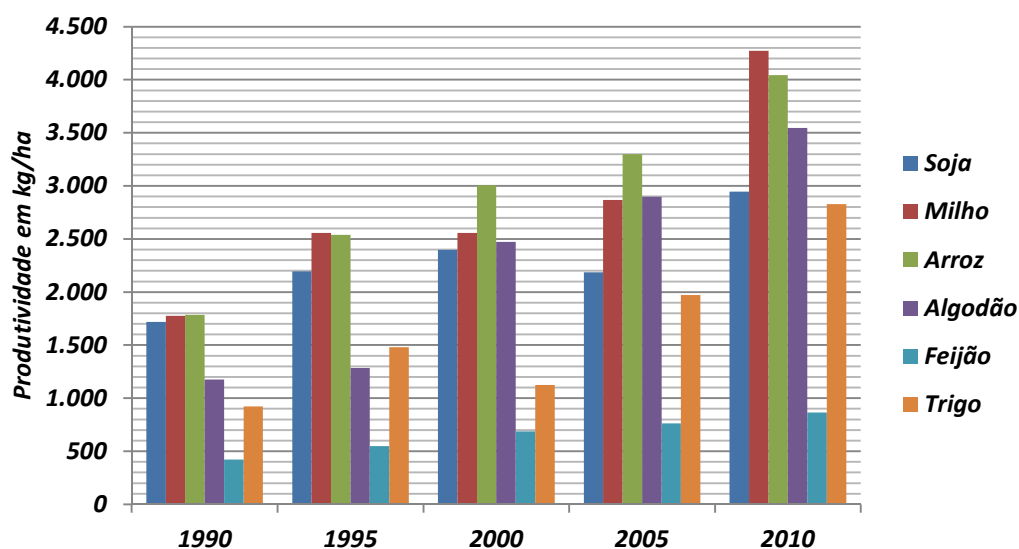


Figura 2
 Evolução da Produtividade das Principais Culturas - Cereais e Leguminosas
 Brasil - em kg/ha
 Fonte: IBGE (2011).

Entre as culturas temporárias e permanentes destacam-se a cana-de-açúcar, a soja, o milho, a mandioca e a laranja, respondendo por aproximadamente 93% da produção física, sendo que a cana-de-açúcar sozinha é responsável por mais de 75% do total produzido. Em termos de área utilizada para cultivo de lavouras temporárias e permanentes, estes cinco produtos ocupam mais de 73% da área total ocupada por este tipo de cultura, e a soja ocupa mais de 35% da área total.

Em virtude da relevante contribuição da cana-de-açúcar na produção física e concentração geográfica em somente 14% da área agrícola utilizada, esta será objeto de uma avaliação exclusiva - para, depois, ser somada a realizada no presente trabalho.

A Tabela 3, a seguir, mostra a produção das principais culturas exceto cana.

Tabela 3
Produção em 2010 das culturas selecionadas
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (1.000 t/ano)

REGIÃO/UF	Soja	Milho	Mandioca	Arroz	Trigo	Feijão	Algodão
<i>Rondônia</i>	385	366	505	165	-	9	-
<i>Acre</i>	0	81	850	26	-	7	-
<i>Amazonas</i>	1	35	307	9	-	4	-
<i>Roraima</i>	4	13	77	85	-	2	-
<i>Pará</i>	244	519	4596	264	-	36	-
<i>Amapá</i>	-	3	138	4	-	1	-
<i>Tocantins</i>	991	282	337	447	-	33	14
NORTE	1.625	1.300	6.811	1.000	-	93	14
<i>Maranhão</i>	1.322	536	1.541	590	-	38	43
<i>Piauí</i>	868	342	566	113	-	33	21
<i>Ceará</i>	3	175	621	64	-	83	2
<i>Rio Grande do Norte</i>	-	8	342	5	-	10	2
<i>Paraíba</i>	-	12	228	0	-	10	0
<i>Pernambuco</i>	-	70	743	18	-	69	1
<i>Alagoas</i>	-	23	318	17	-	23	0
<i>Sergipe</i>	-	751	485	49	-	31	0
<i>Bahia</i>	3.113	2.223	3.211	33	-	316	996
NORDESTE	5.307	4.140	8.055	890	-	613	1.065
<i>Minas Gerais</i>	2.902	6.090	795	115	85	624	55
<i>Espírito Santo</i>	-	66	240	3	-	13	0
<i>Rio de Janeiro</i>	-	18	207	8	-	4	0
<i>São Paulo</i>	1.413	4.027	1.169	84	121	235	30
SUDESTE	4.315	10.200	2.411	211	206	877	85
<i>Paraná</i>	14.092	13.567	4.013	167	3.443	792	0,2
<i>Santa Catarina</i>	1.379	3.654	541	1.042	244	168	0,3
<i>Rio Grande do Sul</i>	10.480	5.634	1.304	6.875	2.117	113	0,5
SUL	25.950	22.855	5.857	8.084	5.803	1.072	1
<i>Mato Grosso do Sul</i>	5.340	3.783	543	143	74	32	149
<i>Mato Grosso</i>	18.788	8.164	497	687	1	134	1.455
<i>Goiás</i>	7.253	4.707	339	221	80	289	180
<i>Distrito Federal</i>	177	246	12	0	8	49	-
CENTRO-OESTE	31.558	16.900	1.391	1.051	162	504	1.784
BRASIL	68.756	55.395	24.524	11.236	6.171	3.159	2.950

Fonte: IBGE (2011).

2.2.1 Soja

O grande crescimento da produção de soja no Brasil, nas últimas décadas, proporcionou a expansão da fronteira agrícola para o cerrado brasileiro. 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.

A produção brasileira de 2010 superou a safra de 2005 em 25%, totalizando 68,7 milhões de toneladas. A área plantada em 2010 foi praticamente a mesma que em 2005, totalizando 23,3 milhões de hectares. O Mato Grosso e o Paraná são os principais Estados produtores brasileiros. No Mato Grosso a área plantada em 2010 foi 6,2 milhões contra de 6,1 milhões hectares em 2005 totalizando uma produção de 18,8 milhões de toneladas, ou seja, 27% do total nacional. O rendimento médio alcançou 3,01 t/ha. O Paraná teve uma área plantada de 4,479 milhões de hectares onde foram colhidas 14,1 milhões de toneladas totalizando 20,5% do total nacional. O rendimento médio foi de 2,337 t/ha (IBGE, 2011).

Na média nacional, segundo o IBGE, o rendimento da soja em 2009 se fixou em 2.946 kg/ha, 34,8 maior que o registrado em 2005. Vê-se na figura seguinte 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.

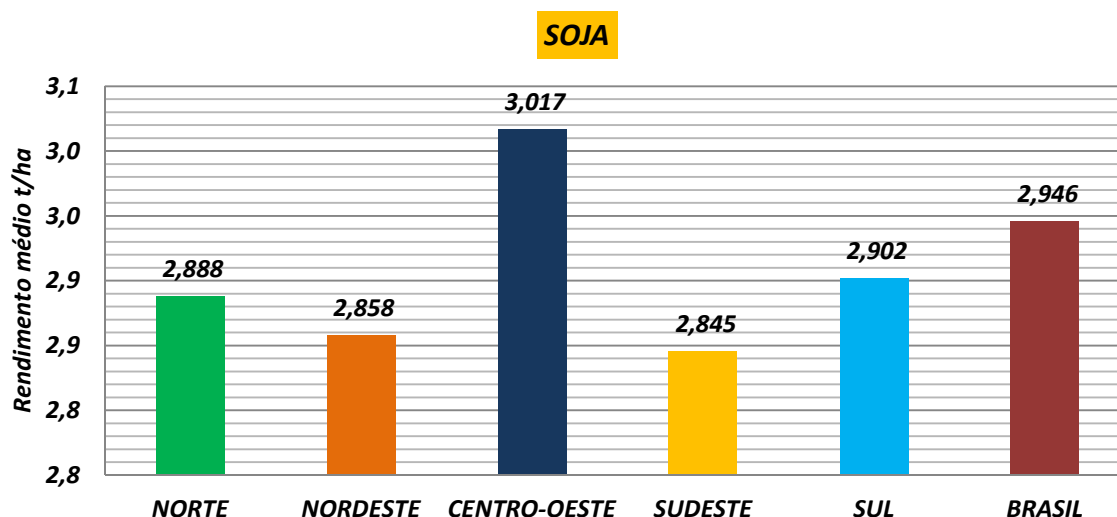


Figura 3
Rendimento Médio da Produção de Soja - Brasil e Regiões em 2010
Fonte: IBGE (2011).

2.2.1.1 Palha da Soja

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 em 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.



Figura 4
Grãos de Soja na Vagem Seca

A produtividade de grãos é função das condições de clima, tratos culturais e adaptabilidade às regiões e solos, sendo que no Brasil as médias regionais variam de 2,80 t/ha na Região Sudeste até 3,0 t/ha na Região Centro-Oeste, sendo a média nacional de 2,93 t/ha (IBGE, 2011).

Em relação aos resíduos agrícolas da soja que permanecem no campo, tratados como palha, KOOPMANS e KOPPEJAN (1997) indicam uma produção de $2,5 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{t}_{\text{Soja}}$, com umidade de 15%, equivalente a $2,12 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{t}_{\text{Soja}}$ em base seca ¹.

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 11,5%. Convertendo-se estes números de produção à base seca e utilizando-se como referência a produtividade média nacional de $2,93 \text{ t}_{\text{Soja}}/\text{ha}$, calculou-se uma produção de $1,21 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Soja}}$, valor adotado 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 $14,6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{Bbs}}$.

De acordo com os técnicos consultados, no caso da soja, é recomendado que cerca de 70% da palha permaneça no campo, o que foi acatado neste trabalho. Porém, vale ressaltar que uma quantidade superior destes resíduos poderia ser retirada do solo, se fossem substituídos por outros nutrientes (KUMAR, 2003). Neste caso, o aproveitamento energético dos resíduos das culturas estudadas seria ainda maior.

2.2.2 Milho

A produção nacional do milho em grão em 2010, considerando as duas safras colhidas em uma área de 12.683.415 hectares, totalizou 55,384 milhões de toneladas. A cultura do milho se faz presente em todas as Unidades da Federação, mas apenas oito Estados concentram cerca de 89,5% da produção nacional. Estes Estados, pela ordem de grandeza de suas produções, em 2010, são: Paraná, Mato Grosso, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Goiás, São Paulo, Mato Grosso do Sul e Santa Catarina.

¹ A partir deste ponto e ao longo desta Nota Técnica adotaremos a notação de t_{Bbs} 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.

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, vê-se na figura 5, 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.

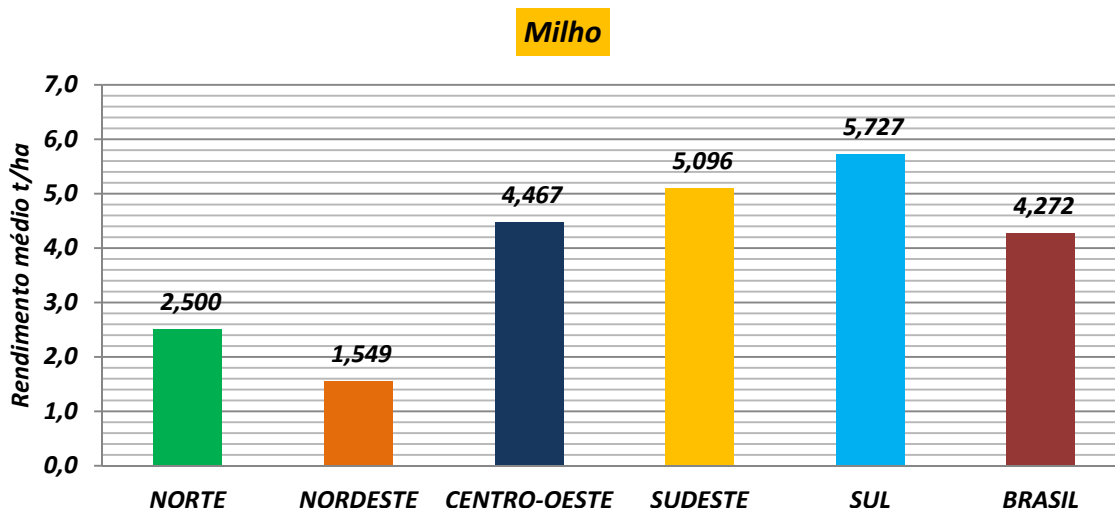


Figura 5
Rendimento Médio da Produção de Milho - Brasil e Regiões em 2010
 Fonte: IBGE (2011).

2.2.2.1 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 4,31 t/ha, entretanto, varia entre 1,61 t/ha na região Nordeste até 5,07 t/ha na região Sudeste.



Figura 6
Milho

A geração de resíduos agrícolas derivados da cultura do milho que permanecem no campo pode ser dividida 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 $1,96 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Milho}}$.

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 9,5%. Convertendo-se estes números de produção à base seca e utilizando-se como referência a produtividade média nacional de $4,31 \text{ t}_{\text{Milho}}/\text{ha}$, calculou-se uma produção de $1,68 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Milho}}$, valor adotado 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 MJ/kg_{Bbs}. No caso da palha, colmo e folha do milho a recomendação é a de que 60% destes resíduos fiquem no solo. Desta maneira, as estimativas feitas nesta nota técnica levaram em conta tais recomendações, ou seja, considera a retirada e aproveitamento de 40% destes resíduos.

2.2.3 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, 2006). A produção nacional de arroz totalizou, em 2010, 11.235.986 toneladas, e foram colhidos 2.722.459 hectares, que em média renderam 4.127 kg/ha segundo IBGE (2011).

Já os dados de rendimentos médios regionais para o ano de 2010 são expostos na figura 7 e indicam um valor médio para o Brasil de 4.044 kg/ha (IBGE 2011).

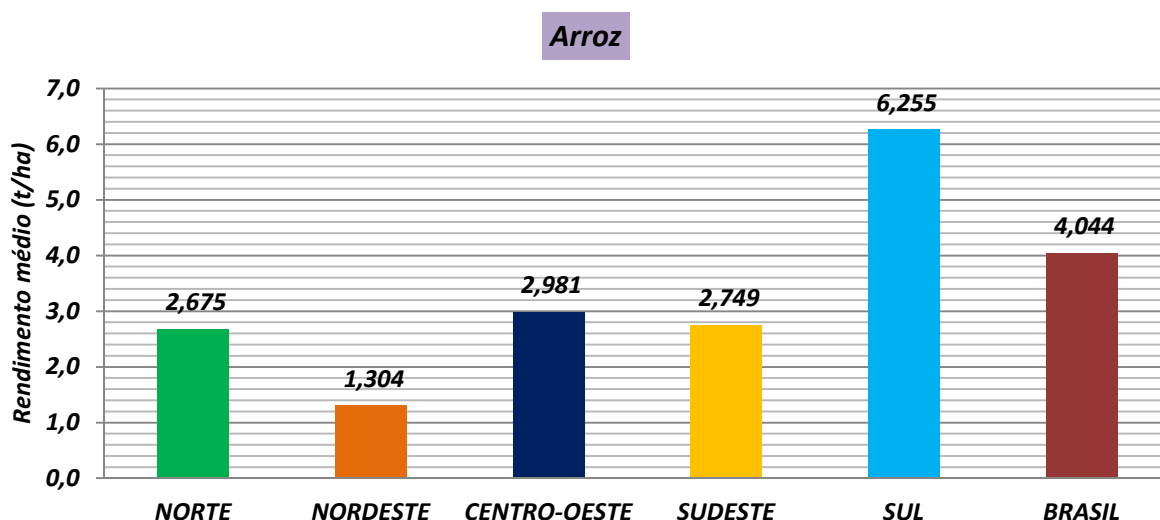


Figura 7
Rendimento Médio da Produção de Arroz - Brasil e Regiões em 2010

Fonte: IBGE (2011).

A cultura do arroz ainda é vista como alternativa para abertura de novas áreas na região Centro-Oeste. Em Mato Grosso, contudo, a Embrapa vem desenvolvendo variedades adaptadas às terras já “estabilizadas” ou “sistematizadas”, que poderão ser utilizadas em rotação com a soja, abrindo melhores perspectivas para o setor orizícola mato-grossense (IBGE, 2011).

2.2.3.1 Palha do Arroz

O arroz é constituído por duas espécies - *Oryza glaberrima* e *Oryza sativa*, é uma planta da família das gramíneas 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, no Brasil varia de 1,23 t/ha na Região Nordeste até 6,73 t/ha na Região Sul, sendo a média nacional de 4,22 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 $1,55 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Arroz}}$.



Figura 8

Palha do 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-se estes números de produção à base seca e utilizando-se como referência a produtividade média nacional de $4,22 \text{ t}_{\text{Arroz}}/\text{ha}$, calculou-se uma produção de $1,24 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{Arroz}}$, valor adotado para avaliações e estimativas nesta Nota Técnica. O poder calorífico inferior da palha de arroz indicado por KOOPMANS e KOPPEJAN (1997) é de $16,0 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{Bbs}}$.

No caso da palha arroz a recomendação é a de que 60% destes resíduos fiquem no solo. Desta maneira, as estimativas feitas nesta nota técnica levaram em conta tais recomendações, ou seja, considera a retirada e aproveitamento de 40% destes resíduos.

2.2.3.2 Casca do Arroz

O Brasil é um dos grandes produtores mundiais de arroz. Pelo lado da demanda, o perfil de consumo é bastante estável, com uma tendência suave de crescimento. Pelo lado da oferta, a produção está associada a aspectos meteorológicos e outras externalidades, gerando uma oscilação permanente e potenciais fluxos de importação e/ou exportação. A colheita do arroz ocorre entre março e maio, porém o arroz é seco e armazenado com cascas para beneficiamento durante o resto do ano, criando um cenário de disponibilidade constante do produto e da casca (TOLMASQUIM, 2003). A casca de arroz é o único resíduo agroindustrial que será tratado neste trabalho.

No beneficiamento do arroz ocorre a retirada de sua casca e este resíduo industrial se apresenta em quantidades $0,267 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{t}_{\text{Arroz}}$, segundo KOOPMANS e KOPPEJAN (1997), com 2,4 % de umidade e poder calorífico inferior de $16,6 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{Bbs}}$. 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 $16,0 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{Bbs}}$, valores que adotaremos para avaliações e estimativas nesta Nota Técnica.



Figura 9
Arroz

No caso da casca do arroz será utilizado um fator de disponibilidade, para a casca de arroz, de 50%, entendendo que a outra metade já é utilizada para fins térmicos na planta de beneficiamento de arroz.

Estudo de Caso: Aproveitamento da Casca do Arroz

No Município de Alegrete (RS), a Geradora de Energia Elétrica Alegrete Ltda. (GEEA), vinculada à empresa Pilecco Nobre Alimentos Ltda., fabricante de arroz, construiu uma termelétrica de 5 MW que irá queimar casca de arroz. O projeto prevê a utilização, na própria fábrica, da energia gerada pela termelétrica e a venda do excedente para a rede elétrica.

Para a atividade do projeto, serão utilizadas, aproximadamente, 67.320 toneladas por ano de casca de arroz, que serão transportadas de outras fábricas de arroz para o local do projeto, através de caminhões que carregarão containers desenvolvidos para este fim. Essa quantidade de casca irá gerar aproximadamente 35.640 MWh/ano, sendo que, desse montante, cerca de 29.304 MWh/ano será inserido na rede elétrica interligada.

O projeto custou R\$ 25 milhões e contou com apoio financeiro da Caixa-RS e do BNDES. Em parceria com a empresa japonesa Mitsubishi Security, a GEEA teve seu projeto, desenvolvido no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), aprovado e, dessa forma, está habilitada a comercializar créditos de carbono, num total de 400 mil toneladas de CO₂ pelo período de dez anos.

2.2.4 Trigo

O trigo possui ciclo anual e é uma planta cultivada durante o inverno e a primavera. Seu grão é utilizado na fabricação de pães, massas alimentícias, biscoitos e bolos. Quando não atinge a qualidade exigida para o consumo humano é também usado como ração animal. De acordo com o IBGE (2006), mais da metade do trigo é importado, principalmente da Argentina. O Paraná e o Rio Grande do Sul são responsáveis por 56% e 34% da produção nacional de trigo, respectivamente. O rendimento médio da cultura para o ano de 2010 foi de 2.827kg/ha (IBGE, 2011). A figura 10, a seguir, expõe os rendimentos regionais.

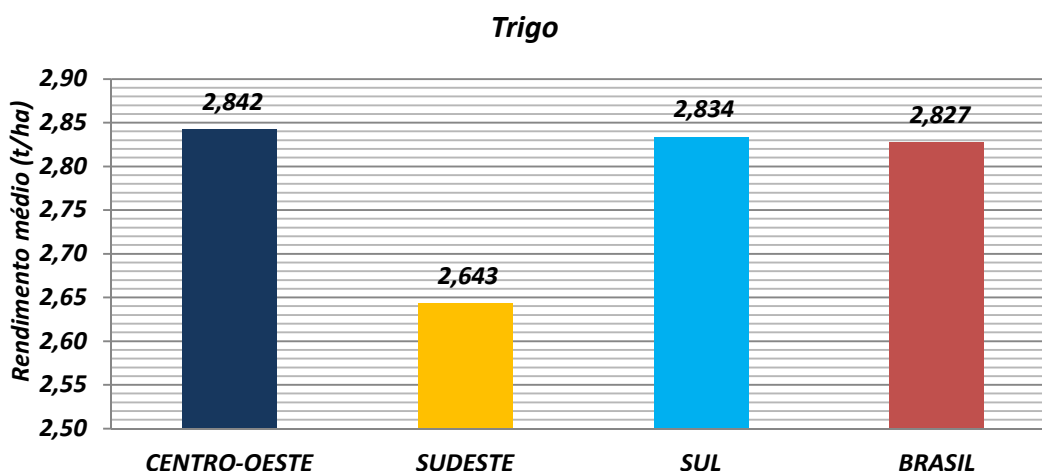


Figura 10
Rendimento Médio da Produção de Trigo - Brasil e Regiões em 2010

Fonte: IBGE (2011).

Os dados de IBGE (2011) para o ano de 2010 indicam o melhor rendimento médio da cultura, 2.827 kg/ha.

2.2.4.1 Palha do Trigo

A produção do trigo gera a palha como resíduo agrícola, a qual permanece no campo. O estudo feito por KOOPMANS e KOPPEJAN (1997) indica uma produção de $1,76 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{t}_{\text{trigo}}$, com umidade de 15%, equivalente a $1,50 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{trigo}}$. O aspecto visual de sua plantação pode ser visto na Figura 11.



Figura 11
Trigo

No estudo de NOGUEIRA e LORA (2002), está indicada uma produção de palha de trigo entre $4,5 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{ha}$ e $6,5 \text{ t}_{\text{Biomassa}}/\text{ha}$, com umidade de 7,5%. Convertendo-se estes números de produção à base seca e utilizando-se como referência a produtividade média nacional de $2,07 \text{ t}_{\text{trigo}}/\text{ha}$, calculou-se uma produção de $2,90 \text{ t}_{\text{Bbs}}/\text{t}_{\text{trigo}}$, valor adotado para avaliações e estimativas nesta Nota Técnica. O poder calorífico inferior da palha de arroz indicado por KOOPMANS e KOPPEJAN (1997) é de $12,4 \text{ MJ}/\text{kg}_{\text{Bbs}}$.

No caso da palha de trigo também foi considerada a recomendação de que 60% destes resíduos permaneçam no solo. Desta maneira, as estimativas feitas nesta nota técnica levaram em conta tais recomendações, ou seja, considera a retirada e aproveitamento de 40% destes resíduos.

2.2.5 Mandioca

A produção nacional da mandioca, em 2010, totalizou 24,5 milhões de toneladas de raízes, apresentando, assim, uma variação negativa de 8,2% em relação à 2008, que foi de 26,7 milhões de toneladas.

Apesar de ser cultivada em todo o território Nacional, a mandioca concentra-se em apenas três Estados, o Pará, a Bahia e o Paraná, onde encontra-se aproximadamente 48,2% da produção brasileira. Dentre os três, o Pará é o principal produtor, contribuindo com 18,7% da produção nacional. Apesar da quantidade relativamente grande de produção de mandioca no Brasil, a tecnologia da produção não sofreu modernizações de grande impacto, sendo que a maior parte da farinha paraense é oriunda da agricultura familiar artesanal. Os aumentos da produção nos últimos anos ocorreram principalmente em decorrência do crescimento da área plantada (IBGE, 2011). O rendimento médio no Brasil no ano de 2010 foi de 13.533 kg/ha, como mostra a figura 12, a seguir.

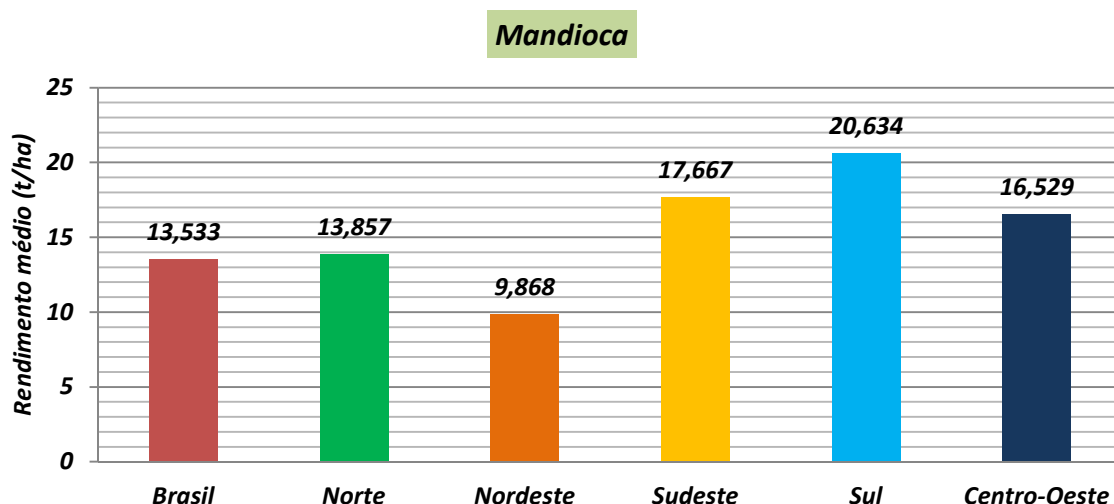


Figura 12
Rendimento Médio da Produção de Mandioca - Brasil e Regiões em 2010.
 Fonte: IBGE (2011).

2.2.5.1 Ramas da Mandioca

A parte aérea da mandioca é um dos subprodutos passíveis de aproveitamento energético. De acordo com SILVA (2007), adotando-se um manejo adequado das ramas da mandioca, também chamadas de parte aérea, pode-se obter alta produtividade de massa verde. O corte da parte aérea costuma ser feito manualmente, quebrando-se as hastes das plantas próximo ao solo. Porém, para grandes áreas, podem ser adaptados cortadores mecânicos, como costuma ser feito para outras culturas. Na Figura 13 é possível vislumbrar as raízes colhidas e a parte aérea.



Figura 13
Mandioca

No estudo de NOGUEIRA e LORA (2002), está indicada uma produção da parte aérea da mandioca entre 6,0 t_{Biomassa}/ha e 10,0 t_{Biomassa}/ha, com umidade de 9,6 %. Convertendo-se estes números de produção à base seca e utilizando-se como referência a produtividade média nacional de 13,86 t_{mandioca}/ha, calculou-se uma produção de 0,65 t_{Bbs}/t_{mandioca}, valor adotado para avaliações e estimativas nesta Nota Técnica. O poder calorífico inferior da parte aérea da mandioca, por não possuir referência bibliográfica, será estimado em 16,0 MJ/kg_{Bbs}.

Assim, como nos outros resíduos, no caso da rama de mandioca foi considerada a recomendação é a de que 60% destes resíduos permaneçam no solo. Desta maneira, as estimativas feitas nesta nota técnica levaram em conta tais recomendações, ou seja, considera a retirada e aproveitamento de 40% destes resíduos.

2.2.6 Feijão

O feijão é cultivado em todo o Território Nacional, contudo foram sete os Estados responsáveis por cerca de 75% do total produzido no País: Paraná, Minas Gerais, São Paulo, Bahia, Goiás e Mato Grosso e Ceará. A produção nacional de feijão da 1^a, 2^a e 3^a safras foi de 3,159 milhões de toneladas em 2010, 4,5% menor do que em 2005. O rendimento médio no ano de 2010 foi de 864 kg/ha, este ano tece a região Centro-Oeste como a região com maior produtividade média, atingindo 1.879 kg/ha, como exposto na figura 14, abaixo.

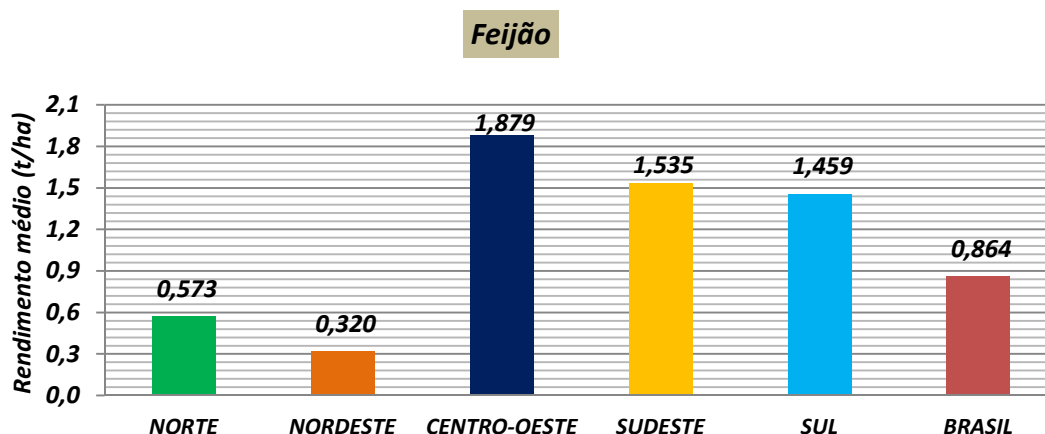


Figura 14
 Rendimento Médio da Produção de Feijão - Brasil e Regiões em 2010.
 Fonte: IBGE (2011).

O cultivo do feijão, de acordo com o Censo Agropecuário 1995-1996, é efetuado em pequenas áreas, sendo que 94% dos informantes o fizeram em áreas inferiores a 5 hectares. Apenas seis dos 4.746 Municípios que informaram a colheita do produto apresentaram participação superior a 1,0%.

2.2.6.1 Palha do Feijão



Figura 15
 Feijão

No estudo de NOGUEIRA e LORA (2002), está indicada uma produção de palha de feijão entre 1,0 $t_{\text{Biomassa}}/\text{ha}$ e 1,2 $t_{\text{Biomassa}}/\text{ha}$, com umidade de 11%. Convertendo-se estes números de produção à base seca e utilizando-se como referência a produtividade média nacional de 0,92 $t_{\text{feijão}}/\text{ha}$ em 2009, calculou-se uma produção de 1,16 $t_{\text{Bbs}}/t_{\text{feijão}}$, valor adotado para avaliações e estimativas nesta Nota Técnica. O poder calorífico inferior da palha de feijão será estimado em 14 MJ/kg_{Bbs}.

No caso da palha do feijão a recomendação é a de que 60% destes resíduos permaneçam no solo. Desta maneira, as estimativas feitas neste trabalho levaram em conta tais recomendações, ou seja, considera a retirada e aproveitamento de 40% destes resíduos.

2.2.7 Consolidação da Produção de Resíduos Agrícolas e Energia Primária

Após a apresentação e caracterização dos resíduos agrícolas selecionados a seguir estão expostos na tabela 4 os indicadores de produtividade dos resíduos utilizados no trabalho, a respectiva disponibilidade de uso e coleta, e o poder calorífico considerado.

Tabela 4
Síntese de Indicadores de Produção,
Disponibilidade e Poder Calorífico dos Resíduos Agrícolas

	<i>Palha de Soja</i>	<i>Palha de Milho</i>	<i>Rama de Mandioca</i>	<i>Palha de Arroz</i>	<i>Casca de Arroz</i>	<i>Palha de Trigo</i>	<i>Resíduos de Algodão</i>	<i>Palha de Feijão</i>
<i>Índice de Produtividade [tbs/t]</i>	2,30	1,68	0,65	1,55	0,18	2,90	1,00	1,16
<i>Fator de Disponibilidade para Coleta</i>	30%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
<i>PCI [GJ/t]</i>	14,6	17,7	16,0	16,0	16,0	12,4	14,6	14,0

Fonte: *Elaboração Própria.*

Os maiores índices de produtividade dos resíduos são das culturas do trigo, soja e milho respectivamente, como as culturas da soja e do milho apresentam volumes de produção bem superiores às outras culturas o maior potencial de resíduos, conseqüentemente, estará localizado nestas duas culturas. A partir destes valores nas tabelas 5 e 6 são apresentados as quantidades consolidadas de produção de resíduos por estado em milhões de toneladas para o ano de 2010 e a quantidade de energia primária disponível em mil tep.

Tabela 5
Produção de Resíduos em 2010
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (Mt/ano)

REGIÃO/UF	Palha de Soja	Palha de Milho	Rama de Mandioca	Palha de Arroz	Casca de Arroz	Palha de Trigo	Resíduos de Algodão	Bagaço de Laranja	Palha de Feijão
<i>Rondônia</i>	0,01	0,67	0,00	0,20	0,03	-	-	0,00	0,00
<i>Acre</i>	0,53	0,15	1,00	0,03	0,00	-	-	0,00	0,00
<i>Amazonas</i>	-	0,06	0,00	0,01	0,00	-	-	0,00	0,00
<i>Roraima</i>	-	0,02	0,00	0,10	0,02	-	-	0,00	0,00
<i>Pará</i>	-	0,95	3,00	0,32	0,05	-	-	0,00	0,00
<i>Amapá</i>	0,39	0,01	0,00	0,01	0,00	-	-	0,00	0,00
<i>Tocantins</i>	1,51	0,51	0,00	0,55	0,08	-	0,01	0,00	0,00
NORTE	2	2	4	1	0	-	0	0	0
<i>Maranhão</i>	2,00	0,98	1,00	0,73	0,11	-	0,02	0,00	0,00
<i>Piauí</i>	1,43	0,62	0,00	0,14	0,02	-	0,01	0,00	0,00
<i>Ceará</i>	-	0,32	0,00	0,08	0,01	-	0,00	0,00	0,00
<i>Rio Grande do Norte</i>	-	0,01	0,00	0,01	0,00	-	0,00	0,00	0,00
<i>Paraíba</i>	-	0,02	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
<i>Pernambuco</i>	-	0,13	0,00	0,02	0,00	-	0,00	0,00	0,00
<i>Alagoas</i>	-	0,04	0,00	0,02	0,00	-	0,00	0,00	0,00
<i>Sergipe</i>	-	1,37	0,00	0,06	0,01	-	0,00	0,00	0,00
<i>Bahia</i>	4,38	4,05	2,00	0,04	0,01	-	0,40	0,00	0,00
NORDESTE	8	8	5	1	0	-	0	0	1
<i>Minas Gerais</i>	3,64	11,08	1,00	0,14	0,02	0,23	0,02	0,00	1,00
<i>Espírito Santo</i>	-	0,12	0,00	0,00	0,00	-	0,00	0,00	0,00
<i>Rio de Janeiro</i>	-	0,03	0,00	0,01	0,00	-	0,00	0,00	0,00
<i>São Paulo</i>	2,14	7,33	1,00	0,10	0,02	0,33	0,01	1,00	0,00
SUDESTE	6	19	2	0	0	1	0	1	1
<i>Paraná</i>	19,28	24,69	3,00	0,21	0,03	9,40	0,00	0,00	1,00
<i>Santa Catarina</i>	1,86	6,65	0,00	1,28	0,19	0,67	0,00	0,00	0,00
<i>Rio Grande do Sul</i>	14,53	10,25	1,00	8,46	1,24	5,78	0,00	0,00	0,00
SUL	36	42	4	10	1	16	0	0	1
<i>Mato Grosso do Sul</i>	25,52	6,88	0,00	0,18	0,03	0,20	0,06	0,00	0,00
<i>Mato Grosso</i>	6,46	14,86	0,00	0,85	0,12	0,00	0,58	0,00	0,00
<i>Goiás</i>	10,23	8,57	0,00	0,27	0,04	0,22	0,07	0,00	0,00
<i>Distrito Federal</i>	0,22	0,45	0,00	0,00	0,00	0,02	-	0,00	0,00
CENTRO-OESTE	42	31	1	1	0	0	1	0	1
BRASIL	94	101	16	14	2	17	1	2	4

Fonte: Elaboração Própria.

Tabela 6
Energia Primária Disponível nos Resíduos em 2010
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (ktep/ano)

REGIÃO/UF	Palha de Soja	Palha de Milho	Rama de Mandioca	Palha de Arroz	Casca de Arroz	Palha de Trigo	Resíduos de Algodão	Palha de Feijão
<i>Rondônia</i>	0,96	112,74	47,77	76,43	11,46	-	-	0,00
<i>Acre</i>	55,65	25,08	47,77	11,46	0,00	-	-	0,00
<i>Amazonas</i>	-	10,75	95,54	3,82	0,00	-	-	0,00
<i>Roraima</i>	-	3,82	0,00	38,22	7,64	-	-	0,00
<i>Pará</i>	-	159,79	453,81	122,29	19,11	-	-	0,00
<i>Amapá</i>	41,08	0,96	0,00	3,82	0,00	-	-	0,00
<i>Tocantins</i>	158,35	86,94	23,88	210,18	30,57	-	2,01	0,00
NORTE	256	400	669	466	69	0	2	0
<i>Maranhão</i>	209,23	164,80	119,42	278,97	42,04	-	5,98	0,00
<i>Piauí</i>	149,76	105,33	47,77	53,50	7,64	-	2,91	0,00
<i>Ceará</i>	-	53,74	71,65	30,57	3,82	-	0,31	23,88
<i>Rio Grande do Norte</i>	-	2,39	47,77	3,82	0,00	-	0,23	0,00
<i>Paraíba</i>	-	3,58	23,88	0,00	0,00	-	0,06	0,00
<i>Pernambuco</i>	-	21,50	71,65	7,64	0,00	-	0,11	0,00
<i>Alagoas</i>	-	7,17	23,88	7,64	0,00	-	0,04	0,00
<i>Sergipe</i>	-	230,96	47,77	22,93	3,82	-	0,01	0,00
<i>Bahia</i>	458,58	684,29	334,38	15,29	3,82	-	138,96	47,77
NORDESTE	818	1.274	788	420	61	0	149	72
<i>Minas Gerais</i>	380,96	1.874,22	95,54	53,50	7,64	23,88	7,70	95,54
<i>Espírito Santo</i>	-	20,06	23,88	0,00	0,00	-	0,01	0,00
<i>Rio de Janeiro</i>	-	5,49	23,88	3,82	0,00	-	0,01	0,00
<i>São Paulo</i>	223,32	1.239,13	95,54	38,22	7,64	47,77	4,14	47,77
SUDESTE	604	3.139	239	96	15	72	12	143
<i>Paraná</i>	2.017,05	4.175,50	358,27	80,25	11,46	1.122,58	0,03	143,31
<i>Santa Catarina</i>	194,66	1.124,49	47,77	489,16	72,61	71,65	0,04	23,88
<i>Rio Grande do Sul</i>	1.519,78	1.734,02	119,42	3.233,02	473,87	692,65	0,07	23,88
SUL	3.731	7.034	525	3.802	558	1.887	0	191
<i>Mato Grosso do Sul</i>	2.669,34	1.164,37	47,77	68,79	11,46	23,88	20,83	0,00
<i>Mato Grosso</i>	675,93	2.512,66	47,77	324,83	45,86	0,00	202,91	23,88
<i>Goiás</i>	1.069,79	1.448,60	23,88	103,18	15,29	23,88	25,16	47,77
<i>Distrito Federal</i>	23,17	75,71	0,00	0,00	0,00	0,00	-	0,00
CENTRO-OESTE	4.438	5.201	119	497	73	48	249	72
BRASIL	9.848	17.048	2.341	5.281	776	2.006	412	478

Fonte: Elaboração Própria.

Como pode ser visto na tabela acima, e já mencionado anteriormente, o maior potencial encontra-se nas culturas da soja e milho, com 26% e 45% da energia primária disponível dos resíduos analisados.

2.3 Resíduos da Pecuária

Os resíduos da criação de animais podem ser utilizados como fonte energética, conforme provam diversos empreendimentos em curso nos mais variados países do mundo. Com o advento das mudanças climáticas, estas fontes passaram a ter maior apelo, pois além de serem renováveis - provenientes de biomassa cultivada, uma vez que os animais consomem os vegetais produzidos continuamente -, seu aproveitamento evita a decomposição dos dejetos, que provocaria a emissão de metano para a atmosfera e de chorume² para o solo, assim como substitui os combustíveis fósseis que seriam utilizados para gerar aquela mesma quantidade de energia. No Brasil ainda são poucas as experiências neste sentido, seja pelo modelo extensivo de criação do rebanho bovino, que não acarreta custos energéticos aos criadores, seja pela assimetria de informação sobre o potencial deste aproveitamento junto aos empresários do setor.

Mas esta situação vem mudando junto aos criadores de suínos e aves, rebanhos já confinados, uma vez que a energia demandada, os riscos de contaminação do solo e dos recursos hídricos e a oportunidade de obtenção de créditos de carbono têm contribuído para a busca de alternativas sustentáveis.

Os resíduos pecuários que serão estudados serão somente os resíduos de criações pecuárias confinadas, ou seja, onde é possível a instalação de um sistema de coleta de rejeitos e onde há a necessidade de tratamento dos rejeitos. Assim, serão analisados os rebanhos de aves, de suínos e bovinos leiteiros. A tabela 7, a seguir, expõe os rebanhos em 2010.

² Líquido ácido produzido durante a decomposição dos resíduos orgânicos.

Tabela 7
Rebanhos Confinados
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (1.000 cabeças/ano)

<i>REGIÃO/UF</i>	<i>Bovinos de Leite</i>	<i>Suínos</i>	<i>Aves</i>	<i>REGIÃO/UF</i>	<i>Bovinos de Leite</i>	<i>Suínos</i>	<i>Aves</i>
<i>Rondônia</i>	1.083	250	4.070	<i>Minas Gerais</i>	5.447	5.022	96.972
<i>Acre</i>	71	151	1.899	<i>Espírito Santo</i>	395	263	22.252
<i>Amazonas</i>	112	100	4.076	<i>Rio de Janeiro</i>	415	155	14.576
<i>Roraima</i>	19	76	1.021	<i>São Paulo</i>	1.488	1.694	221.449
<i>Pará</i>	764	735	12.509	SUDESTE	7.744	7.133	355.248
<i>Amapá</i>	9	30	61	<i>Paraná</i>	1.550	1.694	265.521
<i>Tocantins</i>	526	266	4.156	<i>Santa Catarina</i>	979	5.096	173.768
NORTE	2.583	1.607	27.791	<i>Rio Grande do Sul</i>	1.496	7.818	148.355
<i>Maranhão</i>	574	1.295	9.286	SUL	4.025	14.607	587.644
<i>Piauí</i>	158	950	9.743	<i>Mato Grosso do Sul</i>	528	1.062	25.760
<i>Ceará</i>	539	1.168	25.415	<i>Mato Grosso</i>	618	2.110	41.022
<i>Rio Grande do Norte</i>	258	193	4.610	<i>Goiás</i>	2.480	2.047	54.913
<i>Paraíba</i>	239	147	10.423	<i>Distrito Federal</i>	21	157	7.083
<i>Pernambuco</i>	576	421	33.717	CENTRO-OESTE	3.646	5.375	128.779
<i>Alagoas</i>	149	155	5.334	BRASIL	22.925	34.921	1.238.913
<i>Sergipe</i>	221	100	6.863				
<i>Bahia</i>	2.212	1.768	34.060				
NORDESTE	4.927	6.197	139.451				

Fonte: IBGE (2011).

Os índices de produção de esterco por unidade animal utilizados foram: 15 kg/unidade animal dia para o rebanho leiteiro (Santos e Morais, 2009), 2,35 kg/unidade animal dia para o rebanho suíno (Winrock, 2009) e 0,18kg/unidade animal dia para o rebanho avícola de cama (Aires et al, 2011). Para estimar o potencial energético dos resíduos pecuários optou-se por avaliar apenas a biodigestão, em virtude de não depender de outros materiais. Para tanto foram utilizados dados de esterco e rebanhos expostos acima e dados de produção de biogás por unidade animal e por kg de esterco, comparados de diferentes referências, conforme tabela 8, a seguir.

Tabela 8
Produção de resíduos pecuários e fatores de metanização

<i>Rebanho</i>	<i>kg de esterco/animal.dia</i>	<i>m³ de CH₄/t de resíduo</i>	<i>% de CH₄ no biogás</i>
<i>Bovino</i>	15	24,0	60%
<i>Suíno</i>	2,5	46,8	60%
<i>Ave de Postura</i>	0,18	91,9	60%

Fonte: Jordão e Pessoa (1995), Santos e Morais (2009) e Aires et al (2011).

2.3.1.1 Consolidação dos Resíduos da Pecuária

A partir dos indicadores apresentados, a quantidade disponível de resíduos dos rebanhos confinados considerados está apresentada na tabela 9.

Tabela 9
Produção de Resíduos Pecuários 2010
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (Mt/ano)

<i>REGIÃO/UF</i>	<i>Bovinos de Leite</i>	<i>Suínos</i>	<i>Aves</i>	<i>REGIÃO/UF</i>	<i>Bovinos de Leite</i>	<i>Suínos</i>	<i>Aves</i>
<i>Rondônia</i>	5.929	228	267	<i>Minas Gerais</i>	29.822	4.583	6.371
<i>Acre</i>	389	138	125	<i>Espírito Santo</i>	2.163	240	1.462
<i>Amazonas</i>	613	91	268	<i>Rio de Janeiro</i>	2.272	141	958
<i>Roraima</i>	104	69	67	<i>São Paulo</i>	8.147	1.546	14.549
<i>Pará</i>	4.183	671	822	SUDESTE	42.404	6.510	23.340
<i>Amapá</i>	49	27	4	<i>Paraná</i>	8.486	1.546	17.445
<i>Tocantins</i>	2.880	243	273	<i>Santa Catarina</i>	5.360	4.650	11.417
NORTE	14.147	1.467	1.826	<i>Rio Grande do Sul</i>	8.191	7.134	9.747
<i>Maranhão</i>	3.143	1.182	610	SUL	22.037	13.330	38.608
<i>Piauí</i>	865	867	640	<i>Mato Grosso do Sul</i>	2.891	969	1.692
<i>Ceará</i>	2.951	1.066	1.670	<i>Mato Grosso</i>	3.384	1.925	2.695
<i>Rio Grande do Norte</i>	1.413	176	303	<i>Goiás</i>	13.578	1.868	3.608
<i>Paraíba</i>	1.309	134	685	<i>Distrito Federal</i>	115	143	465
<i>Pernambuco</i>	3.154	384	2.215	CENTRO-OESTE	19.967	4.906	8.461
<i>Alagoas</i>	816	141	350	BRASIL	125.525	31.867	81.397
<i>Sergipe</i>	1.210	91	451				
<i>Bahia</i>	12.111	1.613	2.238				
NORDESTE	26.970	5.655	9.162				

Fonte: Elaboração Própria.

Em seguida é apresentada, na Tabela 10, a consolidação da energia primária disponível nos resíduos pecuários em biogás.

Tabela 10
Energia Primária Disponível nos Resíduos em 2010
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (ktep/ano)

REGIÃO/UF	Bovinos de Leite	Suínos	Aves	REGIÃO/UF	Bovinos de Leite	Suínos	Aves
<i>Rondônia</i>	125	9	22	<i>Minas Gerais</i>	630	189	515
<i>Acre</i>	8	6	10	<i>Espírito Santo</i>	46	10	118
<i>Amazonas</i>	13	4	22	<i>Rio de Janeiro</i>	48	6	77
<i>Roraima</i>	2	3	5	<i>São Paulo</i>	172	64	1.176
<i>Pará</i>	88	28	66	SUDESTE	896	268	1.887
<i>Amapá</i>	1	1	0	<i>Paraná</i>	179	64	1.410
<i>Tocantins</i>	61	10	22	<i>Santa Catarina</i>	113	192	923
NORTE	299	60	148	<i>Rio Grande do Sul</i>	173	294	788
<i>Maranhão</i>	66	49	49	SUL	465	549	3.121
<i>Piauí</i>	18	36	52	<i>Mato Grosso do Sul</i>	61	40	137
<i>Ceará</i>	62	44	135	<i>Mato Grosso</i>	71	79	218
<i>Rio Grande do Norte</i>	30	7	24	<i>Goiás</i>	287	77	292
<i>Paraíba</i>	28	6	55	<i>Distrito Federal</i>	2	6	38
<i>Pernambuco</i>	67	16	179	CENTRO-OESTE	422	202	684
<i>Alagoas</i>	17	6	28	BRASIL	2.651	1.312	6.580
<i>Sergipe</i>	26	4	36				
<i>Bahia</i>	256	66	181				
NORDESTE	570	233	741				

Fonte: Elaboração Própria.

Analisando os dados apresentados nas tabelas anteriores é possível verificar que apesar da produção específica de resíduos do rebanho avícola ser a menor entre os três rebanhos analisados, este rebanho apresenta o maior potencial de energia disponível.

Outro fato que é possível verificar é a concentração do potencial energético nas regiões sul e sudeste, com respectivamente 39% e 29% do potencial de energia primária disponível dos resíduos pecuários analisados.

2.4 Disponibilidade de Resíduos Rurais no Brasil

A partir dos valores apresentados é possível verificar a regionalização da disponibilidade potencial de energia primária dos resíduos rurais. Em todos os casos, agrícola e pecuário, a região sul é a que apresenta maior potencial, seja por conta dos rebanhos de suínos e aves, seja por conta da produção de soja, milho, trigo e arroz. Em seguida vem a região Centro-Oeste, basicamente por conta da produção de soja e milho, e a região sudeste, por conta do rebanho de bovinos leiteiros e avícola assim como da produção de milho. As regiões norte e nordeste apresentam os menores potenciais, contudo o estado da Bahia apresenta grande potencial.

Vale destacar que para o potencial pecuário já foi considerada a conversão para biogás, o que reduz a disponibilidade de energia primária. Na tabela 11, a seguir, são apresentadas as consolidações de energia primária disponível da biomassa residual.

Tabela 11
Energia Primária Disponível nos Resíduos em 2010
Brasil, Regiões e Unidades da Federação (ktep/ano e %)

REGIÃO/UF	Pecuária		Agrícola		Total	
<i>Rondônia</i>	156	1,5%	249	0,7%	406	0,8%
<i>Acre</i>	24	0,2%	140	0,4%	164	0,3%
<i>Amazonas</i>	38	0,4%	110	0,3%	148	0,3%
<i>Roraima</i>	10	0,1%	50	0,1%	60	0,1%
<i>Pará</i>	182	1,7%	755	2,0%	937	1,9%
<i>Amapá</i>	2	0,0%	46	0,1%	48	0,1%
<i>Tocantins</i>	93	0,9%	512	1,3%	605	1,2%
NORTE	507	4,8%	1.862	4,9%	2.369	4,9%
<i>Maranhão</i>	164	1,6%	820	2,1%	985	2,0%
<i>Piauí</i>	106	1,0%	367	1,0%	473	1,0%
<i>Ceará</i>	241	2,3%	184	0,5%	425	0,9%
<i>Rio Grande do Norte</i>	62	0,6%	54	0,1%	116	0,2%
<i>Paraíba</i>	89	0,8%	28	0,1%	116	0,2%
<i>Pernambuco</i>	261	2,5%	101	0,3%	362	0,7%
<i>Alagoas</i>	51	0,5%	39	0,1%	90	0,2%
<i>Sergipe</i>	66	0,6%	305	0,8%	371	0,8%
<i>Bahia</i>	503	4,8%	1.683	4,4%	2.186	4,5%
NORDESTE	1.543	14,6%	3.581	9,4%	5.124	10,5%
<i>Minas Gerais</i>	1.334	12,6%	2.539	6,6%	3.873	7,9%
<i>Espírito Santo</i>	174	1,6%	44	0,1%	218	0,4%
<i>Rio de Janeiro</i>	131	1,2%	33	0,1%	164	0,3%
<i>São Paulo</i>	1.412	13,4%	1.704	4,5%	3.115	6,4%
SUDESTE	3.050	28,9%	4.320	11,3%	7.370	15,1%
<i>Paraná</i>	1.653	15,7%	7.908	20,7%	9.562	19,6%
<i>Santa Catarina</i>	1.228	11,6%	2.024	5,3%	3.252	6,7%
<i>Rio Grande do Sul</i>	1.255	11,9%	7.797	20,4%	9.051	18,6%
SUL	4.135	39,2%	17.729	46,4%	21.865	44,9%
<i>Mato Grosso do Sul</i>	238	2,3%	4.006	10,5%	4.244	8,7%
<i>Mato Grosso</i>	369	3,5%	3.834	10,0%	4.202	8,6%
<i>Goiás</i>	655	6,2%	2.758	7,2%	3.413	7,0%
<i>Distrito Federal</i>	46	0,4%	99	0,3%	145	0,3%
CENTRO-OESTE	1.308	12,4%	10.697	28,0%	12.004	24,6%
BRASIL	10.543	100,0%	38.189	100,0%	48.732	100,0%

Fonte: Elaboração Própria.

A seguir são apresentados os mapas com a disponibilidade de energia primária proveniente da biomassa agrícola (GJ) e da biomassa pecuária (GJ de biogás) por município.

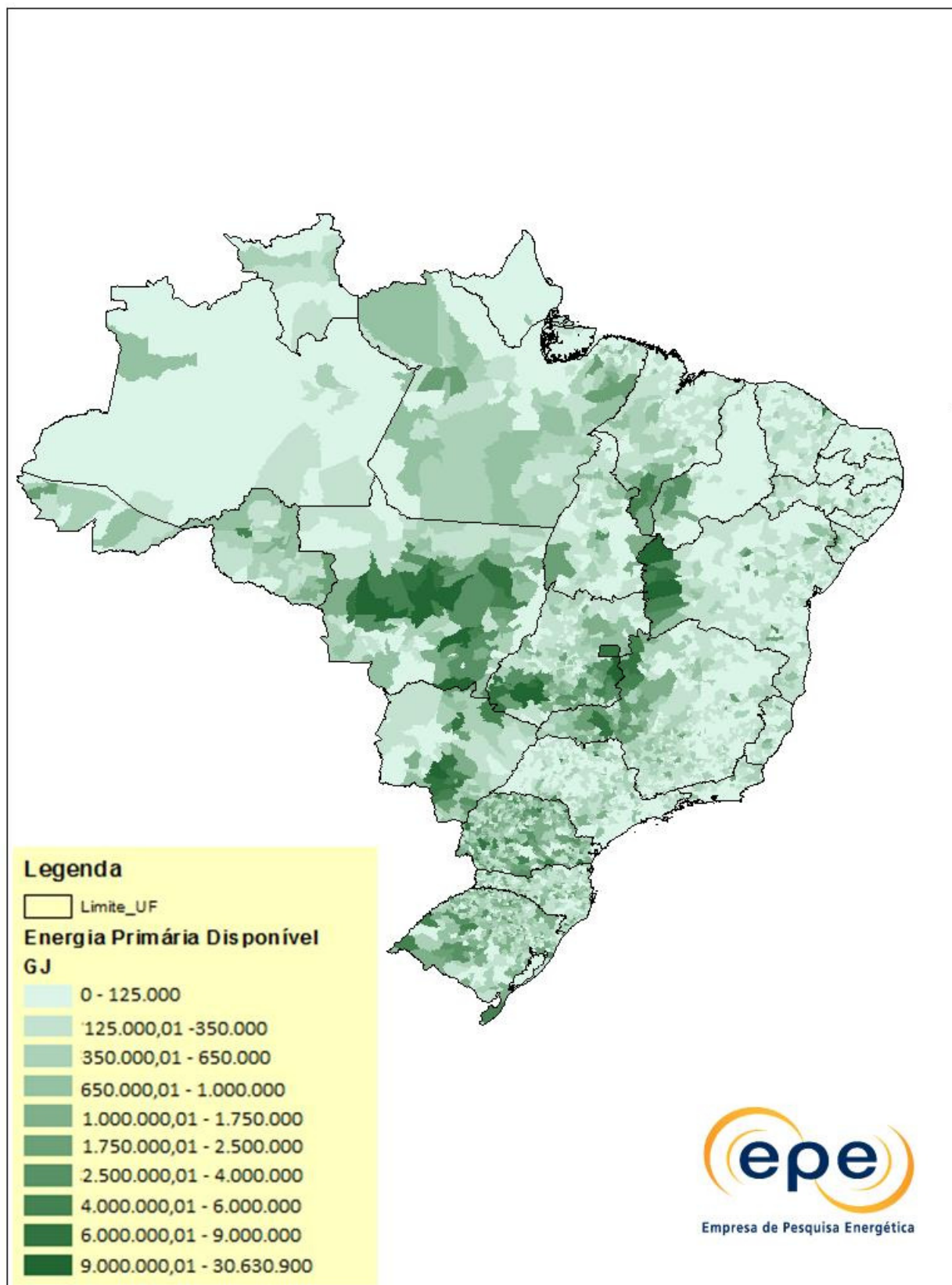


Figura 16
Energia Primária Disponível de Biomassa Residual Agrícola
 Fonte: *Elaboração própria.*

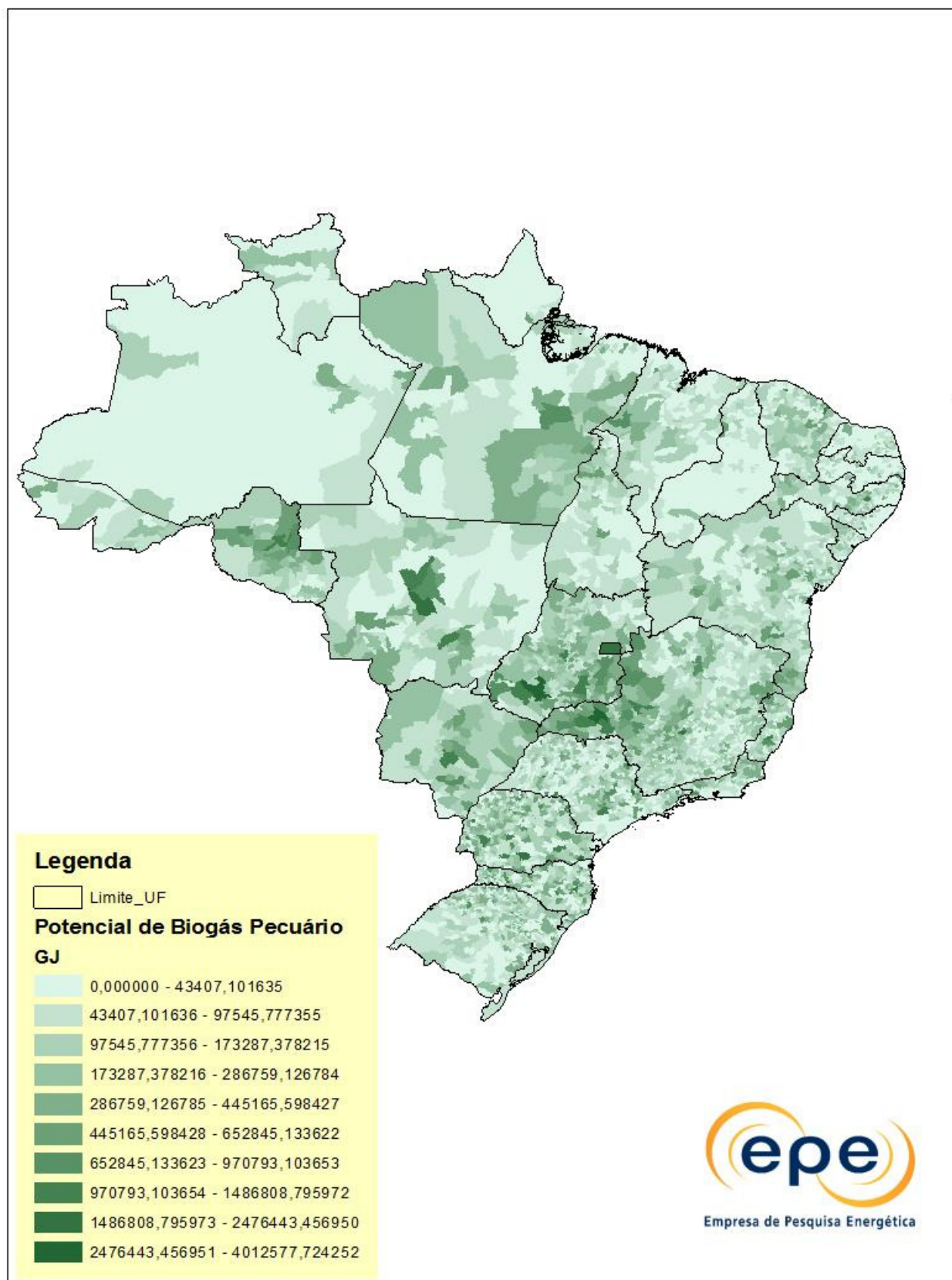


Figura 17
Potencial Disponível de Biogás de resíduos Pecuários
Fonte: Elaboração própria.

3 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS RURAIS

Esta parte do trabalho tem como objetivo apresentar e caracterizar brevemente os sistemas de conversão de biomassa. Dado que, para a biomassa, podem haver diversos fins energéticos, é necessário também definir quais usos energéticos serão tratados nesta avaliação de potencial. Escolheu-se abordar a geração de energia elétrica e a produção de biogás, em virtude das tecnologias de conversão e usos serem amplamente comprovados e utilizados tanto nacional como internacionalmente. Assim, a caracterização técnico-econômica se dará sobre as tecnologias de conversão da biomassa para estes dois energéticos.

As cadeias de aproveitamento da bioenergia são bastante diversas, como primeira etapa do aproveitamento dos resíduos, é possível listar a colheita, a coleta, o transporte e o armazenamento dos resíduos. A segunda caracteriza-se pelo beneficiamento, como a secagem e redução de contaminantes, tendo como última etapa a conversão da biomassa. Podem haver ainda diferentes etapas se forem considerados diferentes beneficiamentos e diferentes energéticos³.

Vale aqui ressaltar que muitos dos resíduos agrícolas podem ser utilizados para outros fins, seja para a produção de biocombustíveis líquidos, seja para a fabricação de outros produtos. Os resíduos agrícolas, por exemplo, pode ser utilizado para a produção de pellets, um tipo de combustível sólido de biomassa compactada. Porém, a escolha da destinação final destes resíduos dependerá de muitos fatores, tais como o desenvolvimento de tecnologias, as vantagens e desvantagens econômicas, condições locais e a existência ou não de políticas públicas.

3.1 Tecnologias de Conversão dos Resíduos

3.1.1 A Conversão Energética da Biomassa

Os resíduos florestais, agrícolas, animais e a matéria orgânica contida nos resíduos industriais e domésticos decorrem de matéria vegetal gerada através da fotossíntese, que contém energia química provinda da transformação energética da radiação solar e pode ser liberada diretamente por combustão, ou convertida em outras fontes energéticas mais adequadas (LORA e DO NASCIMENTO, 2004).

A biomassa energética apresenta rotas tecnológicas diversificadas que vão desde a combustão para obtenção de energia térmica até processos físico-químicos e bioquímicos complexos para a obtenção de combustíveis líquidos e gasosos, como pode-se verificar na figura 18, abaixo:

³ As cadeias da bioenergia podem ser diversas, dependendo do tipo de energético tratado. Por exemplo, ainda há transporte, armazenamento e conversão para energéticos como pellets e bio-óleo.

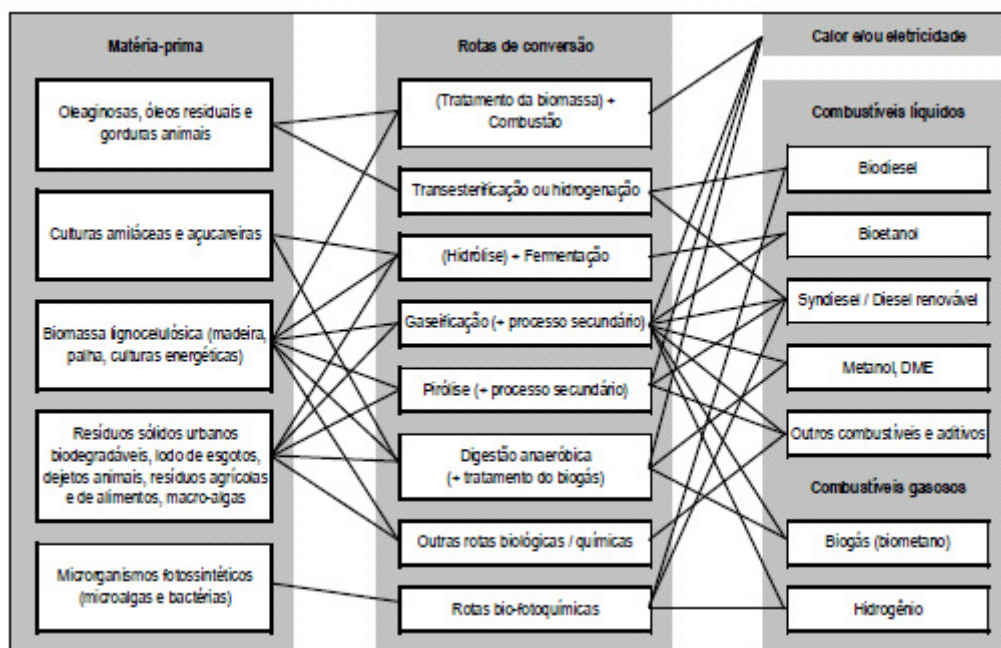


Figura 18

Rotas tecnológicas para conversão da biomassa em produtos e serviços energéticos

Fonte: Zanette, 2009.

Uma ampla possibilidade de tecnologias de conversão energética da biomassa está disponível e resulta em uma ampla variedade de produtos energéticos para a geração de calor, energia elétrica e combustíveis para o transporte. As três principais rotas tecnológicas de conversão energética da biomassa são:

- a) Conversão termoquímica: inclui a combustão direta, a gasificação e a pirólise;
- b) Conversão bioquímica: inclui a digestão anaeróbica, a fermentação/destilação e a hidrólise;
- c) Processos físico-químicos: inclui a compressão, extração e esterificação.

Na geração de calor e de energia elétrica, a tecnologia da combustão direta já é aplicada comercialmente, enquanto que a gasificação e a pirólise estão em um estágio de demonstração para grandes potências. Além da geração de energia elétrica, as tecnologias da pirólise e da gasificação também podem ser utilizadas para a transformação da biomassa em combustíveis líquidos de segunda geração.

Esta nota técnica ficará concentrada na biomassa energética rural como subprodutos das atividades agropecuárias. Sendo assim, as principais rotas para o aproveitamento energético destes resíduos são a combustão direta, a pirólise, a gasificação e a digestão anaeróbica. Estes processos são descritos abaixo:

- **Combustão Direta:** processo em que é fornecida uma quantidade suficiente de oxidante para conseguir a combustão completa da carga combustível. Os produtos principais são um gás de combustão a elevada temperatura que consiste principalmente nos produtos da combustão, dióxido de carbono (CO₂), água (H₂O) e nitrogênio (N₂) e energia térmica na forma de calor;

- Pirólise: processo em que muito pouco ou nenhum agente oxidante é fornecido para a conversão da matéria orgânica. Através do seu aquecimento a temperaturas entre 300 e 500°C, consideradas baixas, ocorre a degradação térmica da matéria orgânica, resultando em produtos combustíveis sólidos, como o carvão vegetal, líquidos (óleo pirolítico) e gasosos (gás pirolítico), a proporção e a qualidade dos produtos dependem da composição da matéria prima, das condições operacionais da reação e do tipo de reator pirolítico;
- Gasificação: processo em que é fornecida uma quantidade de agente oxidante não suficiente para se conseguir a conversão completa da matéria orgânica, obtendo-se uma combustão parcial e que ocorre na faixa de 800 a 900°C. O produto principal é um gás que contém como principais componentes o monóxido de carbono (CO), o hidrogênio (H₂) e o metano (CH₄), dependendo da composição da matéria orgânica, do tipo de gasificador e das condições operacionais. Este gás combustível produzido pode ser queimado nas caldeiras, em motores ou em turbinas de gás;
- Digestão Anaeróbica: processo em que bactérias, na ausência de oxigênio, consomem o material e produzem biogás (mistura de metano, dióxido de carbono, gás sulfídrico, vapor d'água, siloxanos) e material compostável. O biogás, dependendo do nível de tratamento, pode atingir o grau do biometano.

Há ainda a necessidade de citar as tecnologias de beneficiamento, que apesar de não propriamente serem processos de conversão fazem parte da cadeia de aproveitamento energético da biomassa. As principais tecnologias de beneficiamento são a secagem, a trituração e moagem, a briquetagem e a peletização. Ainda que nesta nota técnica não seja abordada nenhuma tecnologia de beneficiamento específica, nem mesmo faça parte do escopo de análise do mesmo, é preciso salientar a importância que estas tecnologias têm, principalmente, na questão do aumento da densidade energética, reduzindo custos logísticos (RENTIZELAS, TOLIS e TATSIPOULOS, 2009; GOLD e SEURING, 2010).

Dada a diversidade de possibilidades de tecnologias para conversão energética da biomassa a escolha de quais tecnologias serão analisadas passa pela definição de alguns critérios. Um critério determinante é a adequabilidade das tecnologias dadas as características da biomassa. As biomassas agrícolas podem ter suas conversões energéticas realizadas por todos os processos previamente citados, com maior ou menor grau de pré-tratamento. Já a biomassa pecuária a principal rota tecnológica para promover o aproveitamento energético é a digestão anaeróbica. Também é possível utilizar a combustão em caldeira para biomassa, mas isto requer a mistura dos dejetos a materiais de elevado poder calorífico e elevado gasto energético para retirada da umidade, excluindo casos específicos como a “cama avícola”, que contém grande participação de serragem.

Outro critério é a definição de quais energéticos são mais adequados a realidade ou necessidade local ou quais os energéticos que se deseja obter. Implicitamente este critério também pode adotar um caráter econômico. Neste trabalho foram escolhidos como energético a eletricidade, dada a demanda generalizada e a facilidade de conexão, e o biogás e biometano, dada a flexibilidade nos usos, como já mencionado anteriormente.

3.1.2 Tecnologias de Geração Termoelétrica a partir dos Resíduos

Somente será apresentada aqui a conversão através da combustão da biomassa, pois como De Oliveira (2011) apresentou a gasificação da biomassa ainda está longe da viabilidade, enquanto a combustão já é realidade.

A combustão da biomassa para geração de vapor é realizada em caldeiras que podem ser de diferentes especificações dependendo da qualidade da biomassa, escala e custos. Caldeiras para biomassa de menor porte em geral são do tipo flamotubular, e aquatubular para maiores portes. Outro ponto importante na especificação das caldeiras de biomassa são os tipos da fornalha, em geral as caldeiras para biomassas e resíduos são do tipo grelha fixa ou grelha rotativa. Ainda há as opções de caldeiras com leito fluidizado, seja borbulhante ou circulante, contudo apresentam custos superiores as demais (LORA e NASCIMENTO, 2004).

Apesar de sistemas semelhantes aos dos combustíveis fósseis a queima da biomassa, principalmente a residual apresenta alguns fatores que merecem atenção. Werther et al (2000) elencaram os cinco principais pontos de atenção em sistemas de combustão de biomassa: a umidade, a densidade e o conteúdo de material volátil, que afetam diretamente a qualidade da combustão, e a quantidade de cinzas e ponto de fusão das mesmas que acarretam em problemas de corrosão, aglomeração, emissões, e problemas de operação.

Após a geração do vapor, no ciclo a vapor com turbinas de contrapressão, a biomassa é queimada diretamente em caldeiras e a energia térmica resultante é utilizada na produção de vapor. Este vapor pode acionar turbinas de trabalho mecânico do processo e turbinas para a geração de energia elétrica. A geração de energia elétrica nestes ciclos tem como restrição fundamental o consumo de energia térmica do processo de produção ao qual está integrado e, como estes ciclos não possuem condensadores, é no processo produtivo que o vapor de escape retorna à sua condição de líquido condensado e pode 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 cogeração fica impossibilitada. Vale frisar que a tecnologia é dominada e seu estágio comercial totalmente desenvolvido.

Em relação ao ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração, o vapor, ao final da realização do trabalho da 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 cogeração, é fornecida por extração de vapor em um ponto intermediário da expansão na turbina. Neste ciclo há um condensador na exaustão da turbina, que proporciona maior flexibilidade da geração termelétrica e que deixa de ser condicionada ao consumo de vapor do processo, permitindo inclusive a operação em geração elétrica pura; e alguns níveis de aquecimento da água de alimentação da caldeira que proporcionam uma elevação da eficiência global da geração. Estas duas características elevam significativamente os investimentos.

O biogás proveniente da digestão anaeróbica pode ser tratado de maneira mais simples (secagem e retirada de gás sulfídrico e siloxanos) e consumido em grupos motores ciclo Otto

ou, quando retirado também o dióxido de carbono, em veículos - incluindo ciclo Diesel em sistemas flex⁴ (BOSCH, 2011).

3.1.3 Digestão Anaeróbica e Produção de Biogás

Digestão anaeróbica (DA) pode ser definida como a conversão de material orgânico em dióxido de carbono, metano e lodo através de bactérias, em um ambiente pobre em oxigênio. Este processo é uma das formas mais antigas de digestão e ocorre naturalmente na ausência de oxigênio, como em plantações de arroz, águas paradas, estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários. O gás obtido durante a digestão anaeróbica, chamado de biogás, inclui além do metano e do dióxido de carbono, alguns gases inertes e compostos sulfurosos.

A quantidade de biogás produzida depende, entre outros fatores, da tecnologia empregada na digestão e do substrato. A usina de Tilburg, na Holanda, por exemplo, pode alcançar 106 metros cúbicos por tonelada de resíduos (m^3/t), cuja composição é de 75% de restos de alimentos e de jardim e 25% de papel não reutilizável, com um teor de 56% de metano.⁵ A KOMPOGAS, fabricante de biodigestores, sugere, como média, o valor de $120 m^3/t$ de material orgânico (www.evergreenenergy.com.au). A composição típica do biogás é dada na Tabela 12.

Tabela 12
Composição típica do biogás

<i>Gás</i>	<i>Composição</i>
<i>Metano</i>	55 - 70% por volume
<i>Dióxido de Carbono</i>	30 - 45% por volume
<i>Sulfeto de hidrogênio</i>	200 - 4.000 ppm por volume
<i>Teor de energia do gás de digestão anaeróbica</i>	20 - 25 MJ/Nm ³ (4.780 a 6.000 kcal/ m ³)
<i>Teor de CH₄ por tonelada dos RSU</i>	167 - 373 MJ/t RSU

Fonte: Verna (2002).

O biogás pode ser consumido diretamente, situação em que apresenta poder calorífico entre 4.500 e 6.000 kcal/m³, ou tratado para separação e aproveitamento do metano, cujo poder calorífico é semelhante ao do gás natural. A digestão anaeróbica é consequência de uma série de interações metabólicas com a atuação de diversos grupos de microorganismos. A produção de metano ocorre em um espectro amplo de temperaturas, mas aumenta significativamente em duas faixas: mesofílica - entre 25-40°C - e termofílica - entre 50-65°C.

O processo de biodigestão pode ser dividido em quatro fases: hidrólise, que é a primeira fase do processo onde a matéria orgânica complexa (polímeros) é quebrada em partes menores e mais simples; acidogênese, onde os produtos da hidrólise são convertidos em substratos para metanogênese; a acetogênese, que também converte os produtos da acidogênese que não

⁴ Além deste sistema, instalado pelas montadoras em veículos novos, existem kits fornecidos para veículos usados.

⁵ Vide http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/03-04/biomass//validation.html.

sofrem metanogênese diretamente; e por último, a metanogênese que a produção de metano dos substratos por bactérias anaeróbias (SEADI et al 2008).

A metanogênese é a fase mais crítica e mais lenta da biodigestão, é extremamente influenciada pelas condições de operação, como temperatura, composição do substrato, taxa de alimentação, tempo de retenção, PH, concentração de amônia entre outros (SEADI et al 2008). O fluxograma do processo está exposto na figura a seguir.

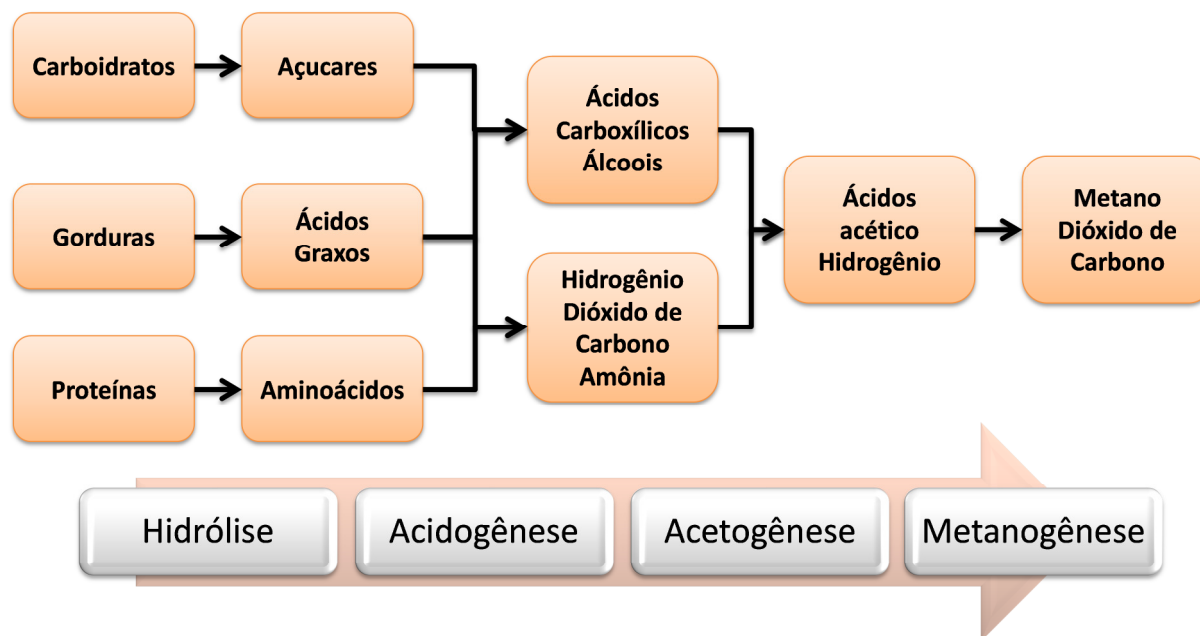


Figura 19: Fluxograma do Processo de Biodigestão Anaeróbica

Fonte: Al Seadi et al (2008)

Já o processo industrial de produção de biogás é dividido também em quatro fases: pré-tratamento, para adequação da biomassa; digestão do resíduo, produção bioquímica do biogás; recuperação de gás, processo de recuperação, tratamento e armazenamento do biogás e; tratamento de resíduos, disposição do lodo da digestão.

A maioria dos sistemas de DA necessita de uma fase de pré-tratamento da carga de entrada para que o sistema atinja seus objetivos. Por exemplo, caso a produção de adubos de alta qualidade seja desejada, a segregação dos contaminantes deve ser muito mais apurada.

Dentro do digestor a carga é diluída para atingir o teor de sólidos desejado e ali permanece durante o tempo de retenção designado. Para a diluição, uma ampla variedade de fontes de água pode ser utilizada, como água limpa, água de reuso (esgoto tratado), ou líquido recirculante do efluente de digestor. Frequentemente necessita-se de um trocador de calor a fim de manter a temperatura no vaso de digestão. As impurezas do biogás são retiradas para que o produto esteja de acordo com a necessidade da sua aplicação. No caso de tratamento residual, o efluente do digestor é desidratado e o líquido é reciclado para ser usado na diluição da carga de alimentação. Os bio-sólidos são aerobiamente tratados para a obtenção do produto composto, estabilizados para serem depositados em aterros ou usados como combustível para incineração.

A maioria das tecnologias disponíveis e com plantas em funcionamento sugere como escala mínima 100 t/d de fração orgânica, o que representa cerca de 150 t/d dos RSU com as características brasileiras (EPE, 2007).

3.1.4 Tecnologias de Purificação do Biogás

Para a utilização do biogás como biocombustível é necessário que este atenda certas condições em sua especificação, após as quais passa ser denominado de biometano ou gás natural renovável.

Estas condições são basicamente a purificação deste energético em metano, em condições semelhantes às do gás natural. Esta purificação tem como objetivo evitar danos à rede de gás natural, bem como a equipamentos, e ajuste do índice de Wobbe que depende do seu poder calorífico e densidade relativa. O biogás purificado utilizado como biometano em geral apresenta a composição típica de 95%-97% de CH₄ e 1%-3% de CO₂ (RYCKEBOSCH, DROUILLOM & VERVAEREN, 2011).

Os principais contaminantes que devem ser removidos são o enxofre, em geral na forma de H₂S e mercaptanas, o CO₂⁶ e a água, entretanto outros compostos também devem ser observados e removidos para uma correta adequação da especificação, como os halogenados, ar e oxigênio, siloxanos e amônia (RYCKEBOSCH, DROUILLOM & VERVAEREN, 2011 E MESCA ET AL., 2011). O biogás dos RSU, sendo este de aterro (GDL) ou de biodigestão, devido à diversa composição do RSU, apresenta grande diversidade de contaminantes que devem ser removidos, caso o uso seja a substituição do Gás Natural. A seguir, a Tabela 13 apresenta os principais contaminantes do biogás e possíveis danos aos equipamentos.

Tabela 13
Contaminantes e Impactos

<i>Compostos</i>	<i>Impacto</i>
<i>Água</i>	-Corrosão em equipamentos, rede e tanques -Acumulação e condensação
<i>CO₂</i>	-Diminuição do poder calorífico -Corrosão em equipamentos, rede e tanques
<i>Enxofre</i>	-Emissão de óxidos na combustão -Toxicidade
<i>Siloxanos</i>	- Formação de SiO ₂ e micro cristais
<i>Halógenos</i>	-Corrosão
<i>Amônia</i>	-Corrosão
<i>O₂</i>	-Aumento da explosividade

Fonte: Adaptado de Ryckebosch, Drouillem & Vervaeren, 2011.

Dentre os compostos citados, o principal a ser removido é o dióxido de carbono, dada sua alta participação na composição do biogás, de 30% a 45%, e a especificação do biometano para uso automotivo ou injeção na rede de gás natural ser de 1% a 6% de CO₂. As principais técnicas de separação são a absorção química e física do CO₂, a absorção com água ou polietileno-glicol

⁶ Vale destacar que o dióxido de carbono não é um contaminante e sim um gás inerte que dilui o metano e reduz o poder calorífico do biogás.

ou absorção com aminas. Há ainda outros métodos como a adsorção sob pressão e à vácuo, a utilização de membranas, a separação criogênica e o enriquecimento biológico. Excluindo os dois últimos, todos são utilizados em grande escala e a escolha pelo tipo mais adequado do método depende de uma série de variáveis que devem ser analisadas de acordo com cada projeto. Estas variáveis abrangem desde aspectos econômicos, como os custos de investimentos e operação e manutenção, estes últimos altamente dependentes do consumo de químicos e energia, até questões técnicas como a possibilidade de separação conjunta do dióxido de carbono e compostos de enxofre, eficiência de purificação e perdas de metano.

Os segundos compostos em importância na remoção são os de enxofre, principalmente na forma de H_2S , e a água, pois ambos podem causar corrosão tanto na malha de distribuição como em motores e equipamentos de uso final - sendo que para o caso do enxofre ainda há o problema de emissão de óxidos durante a combustão. A separação da água do biogás se dá basicamente por uma composição de métodos, primeiro uma etapa de condensação, de maneira a evitar a corrosão de equipamentos à jusante e, depois, métodos de absorção ou adsorção para atingir a especificação necessária de injeção na rede ou do uso veicular. A separação dos compostos de enxofre pode ser feita em duas fases diferentes, durante a digestão ou após a digestão. As técnicas de separação durante a digestão são de baixo investimento, mas de alto custo de operação e manutenção, enquanto as técnicas de separação após a digestão devem ser decididas após a seleção da técnica de remoção do dióxido de carbono, pois em muitos casos a remoção ocorre conjuntamente. Caso haja alta concentração de enxofre ou a técnica escolhida para a remoção do CO_2 não seja eficiente para os compostos de enxofre, outros métodos posteriores também devem ser adotados e, novamente, os métodos de absorção e adsorção são os mais utilizados. Na tabela 14 são apresentados os tipos de tratamento para cada contaminante e inerte.

Tabela 14 Contaminantes e Tratamento

Contaminante	Tipo de Tratamento
Enxofre	<i>Tratamento Biológico</i>
	<i>Dosagem de Cloreto de Ferro</i>
	<i>Water Scrubbing</i>
	<i>Carvão ativado</i>
	<i>Óxido ou Hidróxido de Ferro</i>
Umidade	<i>Hidróxido de Sódio</i>
	<i>Resfriamento</i>
	<i>Absorção</i>
Amônia	<i>Adsorção</i>
Particulado	<i>Water Scrubbing</i>
Siloxanos	<i>Filtros</i>
	<i>Resfriamento</i>
	<i>Carvão ativado</i>
Oxigênio	<i>Absorção</i>
	<i>PSA</i>
	<i>Membrana</i>
Dióxido de Carbono	<i>Water Scrubbing</i>
	<i>Absorção físico-química</i>
	<i>PSA</i>
	<i>Membrana</i>

Fonte: *Electrigaz (2008)*.

3.1.5 Rotas tecnológicas selecionadas

A definição de rotas tecnológicas adequadas ao aproveitamento energético de resíduos agrícolas para análise de viabilidade, utilizada por De Oliveira (2011), mostrou-se como uma abordagem interessante para esta análise. Assim, também serão definidas nesta nota técnica algumas rotas tecnológicas principais.

Esta definição será realizada levando em consideração as características da biomassa analisada, do grau de maturidade das tecnologias, da adequabilidade à realidade brasileira e aos objetivos deste trabalho. Isto posto, serão definidas três rotas para a geração de energia elétrica e uma rota para a geração de biogás e biometano.

As rotas para a geração de energia elétrica são: a queima de resíduos em caldeira e geração de energia elétrica através de turbinas de condensação e grupos geradores (1 - CR), biodigestão anaeróbica e grupos motogeradores (2 - BE), e utilização das usinas sucroalcooleiras na entressafra para a queima dos resíduos (3 - QC) - ressaltando que os custos operacionais e de manutenção dependem da composição dos resíduos. Já para a geração de biogás e biometano será analisada somente a biodigestão anaeróbica com posterior purificação do biogás (4 - BM) para atingir as especificações do Gás Natural.

A escolha das rotas 1 e 2 se deu através do entendimento destas duas rotas serem as mais adequadas e utilizadas para a conversão da biomassa rural. A rota 4 é uma variação no uso do biogás, procurando analisar um mercado diferente para o energético - possibilitado a partir do desenvolvimento de sistema flex para ciclo diesel, que admite a combustão de gás natural (ou sucedâneo renovável, no caso, o biometano) complementarmente ao óleo diesel, na faixa de até 90%, após entrar em regime (BOSCH, 2011). Por último, a rota 3 busca avaliar se a disponibilização das instalações das usinas de cana na entressafra representa uma oportunidade interessante para o aproveitamento da biomassa residual⁷.

A utilização da biomassa residual agropecuária em usinas de cana dependeria basicamente da análise logística dos resíduos, ou seja, disponibilização deste a um custo competitivo na usina de cana. Assim, foi realizada uma análise georreferenciada da oferta de eletricidade⁸ a partir da disponibilidade de resíduos agrícolas de milho e soja e da localização das usinas de cana com o intuito de identificar as regiões mais promissoras⁹.

Por último, também serão consideradas as afinidades de cada tipo de resíduo e respectivas destinações, assim, somente os resíduos agrícolas serão convertidos em eletricidade através das rotas 1 e 3. Já para as rotas 2 e 4 serão analisadas misturas de resíduos agrícolas e resíduos pecuários (codigestão). A participação de cada tipo de resíduo na biodigestão será de

⁷ Podem haver também benefícios em termos de rentabilidade para as usinas de cana, dado que aumentaria o fator de capacidade da instalação. Contudo, esta análise precisa ser mais detalhada e foge do escopo desta nota técnica.

⁸ Calculada com as quantidades de resíduos disponíveis expostas e uma eficiência de conversão de 20%.

⁹ Os resíduos de milho e soja foram escolhidos por representarem 75% do total analisado. Os dados utilizados são de 2008.

30% de biomassa agrícola e 70% de biomassa pecuária; como vistos nos casos expostos em ADEME (2009)¹⁰.

¹⁰ Esta composição é importante, pois como os resíduos agrícolas apresentam baixo teor de nitrogênio sua relação C/N tem valor muito superior à indicada para a biodigestão. Além disto, há uma melhora de desempenho na produção de biogás, como atestado também em ADEME (2009).

4 POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS AGROPECUÁRIOS

Apresentados todos os dados e características necessárias neste capítulo será abordado o potencial técnico das rotas tecnológicas selecionadas no capítulo anterior expondo o montante de energia (ou energético) disponibilizada(o), número de unidades e o investimento necessário para tal.

Antes da apresentação do potencial técnico de cada rota selecionada foi realizada uma análise de consumo de energia para a disponibilização dos resíduos agrícolas nas unidades de conversão. Esta análise considerou somente os resíduos agrícolas, pois para estes há uma necessidade de intenso gasto energético para colheita no campo, enquanto para os agroindustriais, como a casca de arroz, e os pecuários, já estão concentrados o que reduz consideravelmente o gasto energético. O consumo energético considerado foi somente a demanda por óleo diesel para a colheita mecanizada dos resíduos e o transporte até uma distância de 50km, utilizando fatores de consumo específico da colheita agrícola e transporte interno na agricultura. Esses dois fatores de consumo específico médios foram construídos a partir de médias de fatores das diferentes culturas selecionadas, apresentados em Romanelli (2006). Os fatores utilizados foram os de 247 MJ/t, para a colheita, e 249 MJ/t, para o transporte. Esta análise foi realizada para o ano de 2010 e é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15
Consumo energético para disponibilização dos resíduos agrícolas

	<i>Resíduos Disponíveis 2010 [10⁶ tBbs]</i>	<i>Energia Disponível nos Resíduos [ktep/ano]</i>	<i>Energia Necessária para Disponibilização dos Resíduos [ktep/ano]</i>	<i>% da Energia Disponível</i>
<i>Palha de Arroz</i>	14	5.281	164	3,1%
<i>Palha de Feijão</i>	4	478	47	9,8%
<i>Resíduos de Algodão</i>	1	412	10	2,4%
<i>Ramas de Mandioca</i>	16	2.341	52	2,2%
<i>Palha de Milho</i>	101	17.048	1.195	7,0%
<i>Palha de Soja</i>	94	9.848	1.116	11,3%
<i>Palha de Trigo</i>	17	2.006	200	10,0%

Fonte: Elaboração própria.

Esta análise demonstra que para o pior caso o dos resíduos de soja, a demanda é somente aproximadamente 11% da energia disponível dos resíduos, o que indica grande viabilidade em termos de balanço de energia. Todavia, algumas ressalvas devem ser mencionadas, pois a análise em questão considerou somente a demanda por óleo diesel, que apesar de majoritária não é exclusiva, além de considerar um fator médio para todas as culturas, quando na verdade há diferentes condições de demanda de energia por conta das especificidades de cada tipo de colheita.

Outro ponto que necessita destaque antes dos potenciais é a questão dos fatores de capacidade utilizados. Estes são consequência, basicamente, da sazonalidade, além de um fator de disponibilidade da usina, definido em 90% para todas as tecnologias adotadas.

4.1 Potencial Técnico para Geração Elétrica

Antes da apresentação dos cálculos do potencial de geração de eletricidade faz-se necessário a apresentação das escalas das usinas de geração utilizadas para cada rota definida previamente, o que é feito na Tabela 16.

Tabela 16
Escalas das Usinas utilizadas

<i>Dados Técnico- Econômicos</i>	<i>Escala</i>	<i>Eficiência</i>
<i>Rota 1- CR</i>	12 MWe	20%
<i>Rota 2 – BE</i>	1 MWe	35%
<i>Rota 3 – QC</i>	Escalas Existentes	20%

Fonte: Elaboração própria.

- **Rota 1 - Ciclo Rankine**

O potencial técnico para a geração de eletricidade em ciclo rankine foi calculado considerando a conversão dos resíduos agrícolas em unidades de 12MW com eficiência de 20%.

- **Rota 2 - Biodigestão Elétrica**

Para o caso da biodigestão, foram necessárias algumas considerações. A primeira consideração foi do cálculo do potencial somente para a biodigestão da biomassa residual pecuária. A segunda consideração foi que os projetos de codigestão de biomassa pecuária e agrícola seriam prioritários¹¹, com a codigestão, os fatores de produção de metano apresentados anteriormente aumentariam em 10% (ADEME, 2009) e a destinação prioritária dos resíduos agrícolas para a codigestão com resíduos pecuários de suínos e aves¹².

Com essas considerações foram consideradas unidades de 1MW, que correspondem a aproximadamente unidades de 450m³ de biogás por hora dada a eficiência do grupo motorizador e o poder calorífico do biogás, e os respectivos fatores de metanização apresentados previamente. Também foi considerado o biogás com 60% de metano.

- **Rota 3 - Queima em usina de cana de açúcar**

Para o cálculo do potencial de geração de eletricidade em usinas de cana utilizando resíduos agrícolas fez-se necessário utilizar análise de sazonalidade, com a verificação da produção de resíduos mês a mês nos municípios que possuem usinas de cana com unidades de geração de eletricidade. A partir disto foi verificada a disponibilidade de resíduos em quatro dos cinco

¹¹ A participação de cada tipo de resíduo na biodigestão será de 30% de biomassa agrícola e 70% de biomassa pecuária; como visto nos casos expostos em ADEME (2009).

¹² De maneira simplificada foi considerado que haverá uma prioridade de destinação dos resíduos agrícolas para projetos de codigestão com resíduos de pecuária bovina ou suína e avícola. Isto deveu-se ao grande montante da produção de esterco bovino e a quantidade limitada de biomassa residual agrícola. Contudo, o que acontecerá na realidade é que esta prioridade se dará pela questão econômica, pautado principalmente, pelo custo de sua logística e consequente competitividade.

meses da entressafra. Esta análise será apresentada em detalhe na NT de Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético dos Resíduos Rurais, aqui somente serão apresentados os resultados preliminares. A seguir, na tabela 17, são apresentados os potenciais técnicos por estado para cada rota selecionada

Tabela 17
Potencial Técnico para Geração de Eletricidade

	Rota 1 – CR		Rota 2 – BE somente pecuária		Rota 2 – BE pecuária + agrícola		Rota 3 – QC	Mercado atual	CR / mercado
	Nº de unidades	MW	Nº de unidades	MW	Nº de unidades	MW	MWh	GWh	%
<i>Rondônia</i>	10	120	89	89	106	106	0		
<i>Acre</i>	4	48	9	9	12	12	0		
<i>Amazonas</i>	1	12	13	13	15	15	0		
<i>Roraima</i>	1	12	3	3	3	3	0		
<i>Pará</i>	26	312	81	81	102	102	0		
<i>Amapá</i>	0	0	1	1	1	1	0		
<i>Tocantins</i>	17	204	48	48	61	61	0		
NORTE	62	744	247	247	300	300	0	29.049	13%
<i>Maranhão</i>	29	348	70	70	91	91	0		
<i>Piauí</i>	15	180	34	34	44	44	0		
<i>Ceará</i>	5	60	81	81	95	95	0		
<i>Rio Grande do Norte</i>	1	12	27	27	31	31	0		
<i>Paraíba</i>	1	12	30	30	35	35	0		
<i>Pernambuco</i>	3	36	82	82	96	96	0		
<i>Alagoas</i>	1	12	18	18	22	22	0		
<i>Sergipe</i>	9	108	25	25	31	31	0		
<i>Bahia</i>	70	840	229	229	287	287	0		
NORDESTE	138	1.656	599	599	732	732	0	75.610	12%
<i>Minas Gerais</i>	94	1.128	585	585	709	709	170.183		
<i>Espírito Santo</i>	1	12	55	55	63	63	0		
<i>Rio de Janeiro</i>	1	12	48	48	56	56	0		
<i>São Paulo</i>	27	324	348	348	411	411	11.414		
SUDESTE	125	1.500	1.037	1.037	1.239	1.239	181.598	235.237	3%
<i>Paraná</i>	339	4.068	439	439	566	566	25.844		
<i>Santa Catarina</i>	64	768	343	343	418	418	0		
<i>Rio Grande do Sul</i>	259	3.108	332	332	429	429	0		
SUL	663	7.956	1.114	1.114	1.413	1.413	25.844	77.503	54%
<i>Mato Grosso do Sul</i>	92	1.104	79	79	102	102	555.432		
<i>Mato Grosso</i>	274	3.288	114	114	148	148	44.929		
<i>Goiás</i>	121	1.452	273	273	353	353	635.341		
<i>Distrito Federal</i>	4	48	10	10	13	13	0		
CENTRO-OESTE	492	5.904	478	478	616	616	1.235.702	30.718	101%
BRASIL	1.482	17.784	3.478	3.478	4.300	4.300	1.443.144	448.117	21%

Fonte: Elaboração própria.

4.2 Potencial Técnico para Produção de Biometano

Assim como para a rota 2, foram utilizadas as premissas e consideradas as mesmas escalas nas usinas, ou seja, usinas de 450m³/h de biogás com eficiência de 70% na purificação para atingir a especificação do biometano. Também foram consideradas as opções de biodigestão somente dos resíduos pecuário e de codigestão prioritária para aves e suínos com aumento de 10% na produção de metano. Assim, são expostos os potenciais para a produção de biometano na Tabela 18, a seguir.

Tabela 18
Potencial técnico para rota 4 - N° de unidades

	Rota 2- BE		Rota 2- BE c/ codigestão		Mercado atual de Gás Natural mil m ³ /dia de CH ₄	BE / mercado	BE codigestão / mercado %
	Nº de unidades	mil m ³ /dia de CH ₄	Nº de unidades	mil m ³ /dia de CH ₄			
<i>Rondônia</i>	89	364	106	436			
<i>Acre</i>	9	36	12	49			
<i>Amazonas</i>	13	52	15	60			
<i>Roraima</i>	3	11	3	11			
<i>Pará</i>	81	332	102	419			
<i>Amapá</i>	1	3	1	3			
<i>Tocantins</i>	48	197	61	249			
NORTE	247	1.014	300	1.230	44	2304%	2796%
<i>Maranhão</i>	70	288	91	373			
<i>Piauí</i>	34	140	44	181			
<i>Ceará</i>	81	332	95	389			
<i>Rio Grande do Norte</i>	27	110	31	126			
<i>Paraíba</i>	30	123	35	142			
<i>Pernambuco</i>	82	337	96	395			
<i>Alagoas</i>	18	74	22	90			
<i>Sergipe</i>	25	101	31	126			
<i>Bahia</i>	229	940	287	1.178			
NORDESTE	599	2.458	732	3.005	6.751	36%	45%
<i>Minas Gerais</i>	585	2.400	709	2.910			
<i>Espírito Santo</i>	55	225	63	258			
<i>Rio de Janeiro</i>	48	197	56	230			
<i>São Paulo</i>	348	1.427	411	1.688			
SUDESTE	1.037	4.255	1.239	5.085	26.741	16%	19%
<i>Paraná</i>	439	1.803	566	2.323			
<i>Santa Catarina</i>	343	1.408	418	1.715			
<i>Rio Grande do Sul</i>	332	1.362	429	1.762			
SUL	1.114	4.573	1.413	5.800	4.293	107%	135%
<i>Mato Grosso do Sul</i>	79	323	102	419			
<i>Mato Grosso</i>	114	468	148	608			
<i>Goiás</i>	273	1.121	353	1.449			
<i>Distrito Federal</i>	10	41	13	52			
CENTRO-OESTE	478	1.962	616	2.529	249	788%	1016%
BRASIL	3.478	14.274	4.300	17.647	38.078	37%	46%

Fonte: Elaboração própria.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O Brasil possui um grande potencial energético derivado dos resíduos agrícolas, agroindustriais e pecuários, como verificado ao longo desta Nota Técnica. A disponibilidade de energia primária mapeada é da ordem de 48 milhões de tep, somando resíduos agrícolas e resíduos pecuários. Nos resíduos agrícolas o destaque deve ser dado as culturas de soja e milho, que juntas apresentam disponibilidade de energia primária na ordem de 27 milhões de tep. Para os resíduos de rebanhos confinados o destaque fica para os rebanhos de aves que tem 6,5 milhões de tep de energia primária disponível.

Dentro das rotas selecionadas para a geração de eletricidade a queima em ciclo rankine apresenta potencial técnico de 17.784MW em 1482 usinas, com a maior concentração no Sul e no Centro-Oeste, devido as culturas da soja e do milho. Já para a biodigestão e posterior queima do biogás foram feitas duas considerações: a primeira foi de somente biodigerir anaerobicamente os resíduos da pecuária, que resultou em 3.478 usinas com o mesmo montante de capacidade, 3.748MW; já a segunda consideração, fazer a codigestão de resíduos de pecuária com 30% de resíduos agrícolas, que resultou em 4.300 MW no mesmo número de usinas. Por último, a análise para queima de resíduos agrícolas em usinas de cana, resultou em aproximadamente 1,4 TWh por ano.

As restrições técnicas restringem o potencial de 48 milhões de tep de energia primária disponível para 8 milhões de tep, no caso do resíduos agrícolas para queima em ciclo rankine, e de 2 a 3 milhões de tep para biodigestão dos resíduos de pecuária para geração elétrica. Assim, a restrição técnica para geração elétrica baixa a disponibilidade de energia de 48 milhões de tep para 10 milhões de tep, valor coerente com as eficiências de conversão.

Já para o potencial técnico do biometano a partir da biodigestão foram consideradas as mesmas alternativas da geração de eletricidade, também resultando em 3784 usinas a partir da digestão anaeróbica de resíduos de pecuária e 4300 usinas para a codigestão de resíduos. Essas quantidades de usinas resultam em uma produção anual de 5,2 e 6,4 bilhões de m³ respectivamente, ou em uma produção diária de 14,2 e 17,6 milhões de m³ dia. Após a restrição técnica a disponibilidade de energia primária fica limitada de 4,5 milhões de tep a 5,5 milhões de tep sem e com a codigestão.

Todos esses potenciais foram calculados considerando o uso exclusivo da biomassa, o que certamente não ocorrerá. Contudo, esses enormes potenciais explicitam a necessidade da verificação da viabilidade econômica deste aproveitamento, análise esta que será realizada na segunda parte da análise e publicada na NT de Economicidade e Competitividade do Aproveitamento Energético de Resíduos Rurais.

Por fim, cabe destacar que diversas outras opções tecnológicas podem e devem ser analisadas e este trabalho é somente uma parte das análises do potencial de aproveitamento energético da biomassa que estão sendo elaboradas pela EPE para subsidiar o planejamento energético nacional.

6 BIBLIOGRAFIA

- ADEME, 2009 [Agence de l'Environnement et de La Maitrise de l'Energie]. *Methanisation agricole et utilisation de cultures energetiques en codigestion. Avantages/inconvénients et optimisation*. Rapport final. 130 p.
- ADEME, 2010 [Agence de l'Environnement et de La Maitrise de l'Energie]. *Expertise de la Rentabilité des Projets de Méthanisation Rurale*. Rapport final. 130 p.
- AIRES, A. M.; LUCAS JUNIOR, J. de; FUKAYAMA, E. H.; MACHADO, C. R., 2011. *Biodigestão anaeróbia da cama de frangos de corte com ou sem separação de frações sólida e líquida em biodigestores batelada*. II Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos Agropecuários e Agroindustriais.
- BOSCH, 2011. *Apresentação do sistema DNG Bosch*. Recebido por e-mail: guilherme.ferreira@br.bosch.com.
- BRAUNBECK, O., CORTEZ, L., 2005. *O cultivo da cana-de-açúcar e o uso dos resíduos*. In: ROSILLO-CALLE, F., BAJAY, S. V., ROTHMAN, H. (orgs.) *Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira*. Campinas, SP: Editora da UNICAMP.
- DE OLIVEIRA, LUIZ GUSTAVO SILVA, 2011. *Aproveitamento Energético de Resíduos Agrícolas - O Caso da agroeletricidade distribuída*. Dissertação de Mestrado, Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, 2005. *Limitações e vantagens do uso de farinhas de origem animal na alimentação de suínos e de aves*. 2º Simpósio Brasileiro Alltech da Indústria de Alimentação Animal. Curitiba, Paraná, 28 a 30 de agosto de 2005. Disponível em http://www.cnpsa.embrapa.br/sgc/sgc_arquivos/palestras_r2v84s4u.pdf.
- EPE, 2011. *Balço Energético Nacional 2011*. Rio de Janeiro.
- EPE, 2012. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. Rio de Janeiro.
- FAAIJ, A. P. C., 2004, *Bio-energy in Europe: changing technology choices*. Energy Policy 34 (2006) 322-342.
- GOLD, Stefan; SEURING, Stefan, 2010. *Supply chain and logistics issues of bio-energy production*. Journal of Cleaner Production, In press.
- 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.

- IBGE, 2011a, *Produção Agrícola Municipal - Culturas Temporárias e Permanentes 2009*. Coordenação de Agropecuária - Diretoria de Pesquisas - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão - MP, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>.
- _____, 2011b, *Produção Pecuária Municipal* -Coordenação de Agropecuária - Diretoria de Pesquisas - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão - MP, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>.
- IEA, 2008. *From 1st - to 2nd - Generation Biofuel Technologies. An overview of current industry and R&D activities*. Extended Executive Summary. OECD/IEA.
- JORDÃO, E.P. e PESSOA, *Tratamento de esgotos domésticos*. 3ª EDIÇÃO. ABES. 1995.
- 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.
- KUMAR et. al. *Biomass power cost and optimum plant size in western Canada*. Biomass e Bioenergy 24, p. 445-464, 2003.
- LORA, E.E.S, DO NASCIMENTO, M.A.R., 2004, *Geração Termelétrica -Planejamento, Projeto, Operação*. Volumes 1 e 2. Editora Interciência.
- 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.
- MESCIA, D.; HERNÁNDEZ, S. P.; CONOCI, A.; RUSSO, A. *MSW landfill desulfurization*. International Journal of Hydrogen Energy, n. 36, 7884-7890. 2011.
- NOGUEIRA, L. A. H., LORA, E. E., 2002, *Wood Energy: Principles and Applications*. Núcleo de Excelência em Geração Termoelétrica Distribuída - NEST, do Instituto de Engenharia Mecânica - IEM, Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI.
- NOGUEIRA, L. A. H. et al., 2000, *Dendroenergia: fundamentos e aplicações*. Brasília.
- RENTIZELAS, ATHANASIOS A.; TOLIS, ATHANASIOS J.; TATSIPOULOS, ILIAS P., 2009. *Logistic issues of biomass: The storage problem and the multi-biomass supply chain*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, n. 13, p. 887-894.
- ROMANELLI, THIAGO LIBÓRIO, 2006. *Metodologia para estimativa do consumo de óleo diesel no segmento: agricultura, pecuária, e atividade florestal - "Diesel Agropecuário"*. Polo Nacional de Biocombustíveis, ESALQ, USP, Contratação EPE.
- RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H., 2011. *Techniques for transformation of biogas to biomethane*. Biomass and Bioenergy, n. 35, p. 1633-1645.
- SANTOS, I. A.; MORAIS, M. A., 2009. *Aproveitamento de biogás para a geração de energia elétrica a partir de dejetos de bovinos leiteiros: Um estudo de caso na EAFMUZ*. I Simpósio Internacional sobre Gerenciamento de Resíduos de Animais.

- SEADI, TEODORITA AL; RUTZ, DOMINIK; PRASSL, HEINZ; KÖTTNER, MICHAEL; FINSTERWALDER, TOBIAS; VOLK, SILKE; JANSSEN, RAINER; 2008. *Biogas Handbook*. University of Southern Denmark Esbjerg. Disponível em: <<http://www.lemvigbiogas.com/BiogasHandbook.pdf>>
- SILVA, J., FILHO, J. R. F., 2007, *Produção de Biomassa de Mandioca*. Mandioca em Foco. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa mandioca e Fruticultura Tropical. Ministério da Agricultura, pecuária e Abastecimento. Disponível em http://www.cnpmf.embrapa.br/publicacoes/produto_em_foco/Mandioca_34.pdf, acessado em 21/11/2008.
- TOLMASQUIM, M.T. (org.), 2003, *Fontes renováveis de energia no Brasil*. Rio de Janeiro. CENERGIA.
- WERTHER, J., SAENGER, M., HARTGE, E-U., OGADA, T., SIAGI, Z., 2000. *Combustion of agricultural residues*. Progress in Energy and Combustion Science, v. 26, p. 1-27.
- WINROCK INTERNATIONAL BRASIL. Manual de biodigestão. 21 p. Disponível em http://www.neppa.uneb.br/textos/publicacoes/manuais/manual_biodigestor_winrock.pdf. Acessado em abril de 2010. 2009.
- ZANETTE, ANDRÉ LUIZ, 2009. *Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil*. Dissertação de Mestrado. Programa de Planejamento Energético, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.