



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA

© **M** Plataforma Moretti

# Disciplina: Energia na Agricultura

## UNIDADE 8 – Energia de biomassa

**Prof. Jorge Luiz Moretti de Souza**

E-mail: [jmoretti@ufpr.br](mailto:jmoretti@ufpr.br)

<http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/index.htm>

## **Objetivo da Unidade didática**

Identificar e estabelecer as principais fontes e formas de produção de energia (convencional e alternativa), bem como os mecanismos essenciais envolvidos para sua produção e aproveitamento;

# 1 CONSIDERAÇÕES

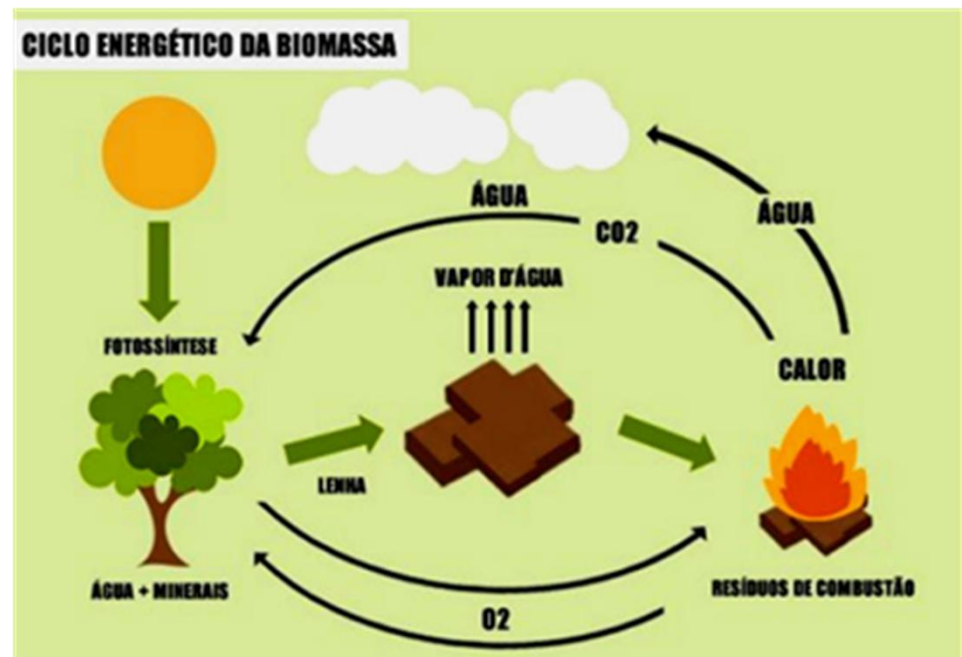
## 1.1 Energia da biomassa

- **Definição ecológica:** Biomassa é toda matéria orgânica vegetal ou animal existente no ecossistema;
- **Definição energética:** Biomassa são todos os derivados de organismos vivos utilizados como combustíveis, ou para a produção desses mesmos combustíveis.
- **Exemplos de biomassa:** resíduos sólidos naturais e resultantes da atividade humana (considerados recursos naturais).
  - Combustíveis fósseis não são contabilizados
- **Classes de biomassa:**
  - Sólida;
  - Líquida;
  - Gasosa.

## 1.2 Fontes de biomassa

- Principais produtos agrícolas usados como fonte energética alternativa geradora da biomassa
  - Cana de açúcar;
  - Bagaço da cana de açúcar, casca do arroz, castanha e coco;
  - Mandioca, amidos, óleos vegetais (dendê, babaçu, mamona, entre outros), celulose;
  - Dejetos urbanos, industriais e agropecuários;
  - Madeira .

Figura 8.1 – Ciclo de produção de biomassa.



## 1.3 Produtos derivados da biomassa

- Biogás; Etanol; Etanol celulósico; Biodiesel; Carvão vegetal.

## 1.4 Vantagens e desvantagens da biomassa

- **Vantagens:** Energia renovável; Baixo custo; Baixa emissão de gases poluentes; Grande variedade de materiais; Menor desgaste e corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos, entre outros);
- **Desvantagens:** Eficiência reduzida; Podem emitir enxofre e contribuir para chuva ácida; Impactos ambientais em florestas e destruição de habitats; Elevado custo financeiro de equipamentos; Aumento de casos de doenças respiratórias; Dificuldades no transporte e armazenamento de biomassa sólida.

## 1.5 Transformação da biomassa para utilização indireta na produção de energia

- Pirólise
- Gaseificação
- Combustão
- Co-combustão

## 2 CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DA BIOMASSA

- Biomassa existente na terra: dois trilhões de toneladas;
- 400 toneladas per capita;
- Equivalente à 3000 EJ ano<sup>-1</sup>;
- Oito vezes o consumo mundial de energia primária (400 EJ ano<sup>-1</sup>).

### Cálculo do potencial de geração de energia dos diversos tipos de biomassa:

#### 2.1 Resíduos agrícolas

$$P_i = \frac{y_i \cdot A_i \cdot PCI \cdot \eta}{t \cdot C_{kcal/kWh}}$$

Sendo:  $P_i$  – potencial de geração de energia do resíduo agrícola no  $i$ -ésimo período ( $kW$ );  $y_i$  – quantidade de biomassa do resíduo agrícola no  $i$ -ésimo período ( $kg\ ha^{-1}\ período^{-1}$ ; Tabela 8.1);  $A_i$  – área utilizada na produção agrícola no  $i$ -ésimo período ( $ha$ );  $PCI$  – poder calorífico inferior do resíduo agrícola ( $kcal\ kg^{-1}$ ; Tabelas 8.1 e 8.2);  $\eta$  – eficiência termodinâmica da conversão da biomassa em calor nas caldeiras e turbinas (adimensional; 15% para caldeira pequena de 20 bar e condensador atmosférico, ou 30% para sistemas médios mais eficientes);  $t$  – tempo em que a biomassa do resíduo agrícola será convertida em calor nas caldeiras e turbinas no  $i$ -ésimo período ( $h\ período^{-1}$ );  $C_{kcal/kWh}$  – coeficiente para transformar kcal para kWh ( $860\ kcal\ (kWh)^{-1}$ ).

Tabela 8.1. Percentual de resíduo proveniente do produto agrícola e poder calorífico inferior do resíduo (*PCI*).

Produto agrícola	Percentual de resíduo proveniente do produto agrícola (%)	Poder calorífico inferior do resíduo ( <i>PCI</i> ; kcal kg <sup>-1</sup> )	Consideração
Arroz	30	3384,09	O resíduo corresponde a 30% de todo o arroz.
Coco	60	4556,82	Cada fruto tem peso médio de 0,5 kg. O resíduo corresponde a 60% dos frutos de coco.
Amendoim	30	4281,82	O resíduo corresponde a 30% de todo o arroz.
Silvicultura	15	—	Resíduos deixados no campo após o corte.
	50	2000,00	Resíduos do preparo da madeira (Massa específica da madeira: 680 kg m <sup>-3</sup> ).
	20	—	Resíduos gerados na indústria moveleira.

**Tabela 8.2.** Poder calorífico inferior (*PCI*) dos principais resíduos e óleos utilizados como combustíveis.

Combustível	<i>PCI</i>	Combustível	<i>PCI</i>
Álcool de cana	5500 kcal L <sup>-1</sup>	Gás natural	8600 kcal m <sup>-3</sup>
Aparas vinilo	6300 kcal kg <sup>-1</sup>	Lascas de madeira	3300 kcal kg <sup>-1</sup>
Bagaço de cana (20% de água)	3200 kcal kg <sup>-1</sup>	Lenha (40% água)	2400 kcal kg <sup>-1</sup>
Bagaço de cana (50% de água)	1800 kcal kg <sup>-1</sup>	Lenha seca (12% água)	3680 kcal kg <sup>-1</sup>
Bambu (10% água)	3700 kcal kg <sup>-1</sup>	Madeira de caixotes	3800 kcal kg <sup>-1</sup>
Borra de café	1570 kcal kg <sup>-1</sup>	Madeira muito seca	4800 kcal kg <sup>-1</sup>
Carvão de babaçu	7000 kcal kg <sup>-1</sup>	Madeira pinho (seca ao ar)	3500 kcal kg <sup>-1</sup>
Carvão mineral (Cambuí-PR)	6200 kcal kg <sup>-1</sup>	Madeira verde	2500 kcal kg <sup>-1</sup>
Carvão mineral (Charqueadas-RS)	3100 kcal kg <sup>-1</sup>	Óleo combustível 1A	9800 kcal kg <sup>-1</sup>
Carvão mineral (Mina do Leão-RS)	4200 kcal kg <sup>-1</sup>	Óleo combustível 1B	9800 kcal kg <sup>-1</sup>
Carvão mineral (Tubarão-SC)	4500 kcal kg <sup>-1</sup>	Óleo combustível 2A	9000 kcal kg <sup>-1</sup>
Carvão vegetal	7500 kcal kg <sup>-1</sup>	Óleo combustível 2B	9000 kcal kg <sup>-1</sup>
Casca de árvore	2200 kcal kg <sup>-1</sup>	Óleo combustível 3A	9000 kcal kg <sup>-1</sup>
Casca de algodão	3000 kcal kg <sup>-1</sup>	Óleo combustível 3B	9000 kcal kg <sup>-1</sup>
Casca de amêndoa dendê	4800 kcal kg <sup>-1</sup>	Óleo de algodão	8050 kcal L <sup>-1</sup>
Casca de arroz (20% água)	3300 kcal kg <sup>-1</sup>	Óleo de amendoim	8000 kcal L <sup>-1</sup>
Casca de babaçu	4000 kcal kg <sup>-1</sup>	Óleo de babaçu	7770 kcal L <sup>-1</sup>
Casca de cacau (8% água)	3900 kcal kg <sup>-1</sup>	Óleo de soja	8125 kcal L <sup>-1</sup>
Casca de café	3800 kcal kg <sup>-1</sup>	Óleo diesel	8620 kcal L <sup>-1</sup>
Casca de caju	4700 kcal kg <sup>-1</sup>	Palha de amendoim (12% de água)	3100 kcal kg <sup>-1</sup>
Casca de coco	4000 kcal kg <sup>-1</sup>	Palha de trigo (20% de água)	3200 kcal kg <sup>-1</sup>
Casca de eucalipto	3750 kcal kg <sup>-1</sup>	Papel	4200 kcal kg <sup>-1</sup>
Casca de tanino úmido (68% água)	800 kcal kg <sup>-1</sup>	Piche alcatrão	8600 kcal kg <sup>-1</sup>
Casca de soja	3300 kcal kg <sup>-1</sup>	Pó de linho	4000 kcal kg <sup>-1</sup>
Cavaco (eucalipto)	4300 kcal kg <sup>-1</sup>	Pó de madeira fino (seco)	4000 kcal kg <sup>-1</sup>
Cavacos de pinho	2500 kcal kg <sup>-1</sup>	Pó de madeira grosso (seco)	4200 kcal kg <sup>-1</sup>
Coque de gás	5400 kcal kg <sup>-1</sup>	Pó de tabaco	2300 kcal kg <sup>-1</sup>
Coque de lenha	7600 kcal kg <sup>-1</sup>	Querosene	8300 kcal L <sup>-1</sup>
Coque metalúrgico	7200 kcal kg <sup>-1</sup>	Recortes de couro (14% de água)	4400 kcal kg <sup>-1</sup>
Fibras de palmeira (48% água)	2000 kcal kg <sup>-1</sup>	Resíduos de juta	3800 kcal kg <sup>-1</sup>
Fibras de palmito	3800 kcal kg <sup>-1</sup>	Restos de borracha	4000 kcal kg <sup>-1</sup>
Filme polietileno	5600 kcal kg <sup>-1</sup>	Sementes de girassol (9,5% de água)	4300 kcal kg <sup>-1</sup>
Gás de água	4000 kcal m <sup>-3</sup>	Serragem de pinho (40% de água)	2000 kcal kg <sup>-1</sup>
Gás de água carburetado	6000 kcal m <sup>-3</sup>	Serragem seca (20% de água)	3500 kcal kg <sup>-1</sup>
Gás de alto forno	700 kcal m <sup>-3</sup>	Serragem + Cepilho (seco)	4600 kcal kg <sup>-1</sup>
Gás de biodigestor (biogás)	5000 kcal m <sup>-3</sup>	Sisal (11% de água)	3400 kcal kg <sup>-1</sup>
Gás de coqueira	4300 kcal m <sup>-3</sup>	Sobra de serraria (pinho)	4160 kcal kg <sup>-1</sup>
Gás de gasogênio	1260 kcal m <sup>-3</sup>	Tecido náilon	7300 kcal kg <sup>-1</sup>
Gás de nafta	4750 kcal m <sup>-3</sup>	Trapos de pano	4200 kcal kg <sup>-1</sup>
Gás de GLP (50%)	10800 kcal kg <sup>-1</sup>	Turfa (seca ao ar; 25 a 6% de água)	3000 a 5000 kcal kg <sup>-1</sup>



**Exemplo 8.1** – Em uma propriedade agrícola cultiva-se arroz irrigado em 200 ha. Sabendo que a produtividade na área é de  $5915 \text{ kg ha}^{-1}$  (arroz + casca), determinar o potencial de geração de energia da casca de arroz produzida na propriedade. A conversão da biomassa em calor será realizada com caldeira pequena ( $\eta = 15\%$ ). O tempo em que a biomassa do resíduo agrícola será convertida em calor nas caldeiras e turbinas será de 5 horas em 365 dias do ano. Sendo assim:

i) Encontrar a quantidade de casca de arroz produzida, bem como o poder calorífico inferior da casca do arroz:

Na Tabela 8.1, tem-se que o percentual de resíduo do arroz (casca) é de 30%. Logo:

$$y_i = 5915 \cdot 0,3 = 1774,5 \text{ kg de casca de arroz}$$

$$PCI = 3384,09 \text{ kcal kg}^{-1}$$

ii) Determinar o potencial de geração de energia da casca de arroz da propriedade:

$$P_i = \frac{y_i \cdot A_i \cdot PCI \cdot \eta}{t \cdot C_{kcal/kWh}} = \frac{1774,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1} \cdot 200 \text{ ha} \cdot 3384,09 \text{ kcal kg}^{-1} \cdot 0,15}{(365 \text{ dia ano}^{-1} \cdot 5 \text{ h dia}^{-1}) \cdot 860 \text{ kcal (kWh)}^{-1}}$$

$$P_i = 114,78 \text{ kW}$$

## 2.2 Óleos vegetais e cana de açúcar

$$P_i = \frac{y_i \cdot A_i \cdot f_{ce}}{t}$$

Sendo:  $P_i$  – potencial de geração de energia do produto agrícola no  $i$ -ésimo período ( $kW$ );  $y_i$  – produtividade do produto agrícola no  $i$ -ésimo período ( $t \text{ ha}^{-1} \text{ período}^{-1}$ ; Tabela 8.3);  $A_i$  – área utilizada na produção agrícola no  $i$ -ésimo período ( $ha$ );  $f_{ce}$  – fator de conversão energética do produto agrícola ( $kWh \text{ t}^{-1}$ ; Tabela 8.3);  $t$  – tempo de operação do sistema em que o produto agrícola será convertido em energia elétrica ( $h \text{ período}^{-1}$ ).

**Tabela 8.3.** Informações técnicas para utilização do óleo de dendê e cana de açúcar como combustível.

Produto agrícola	Produtividade do produto agrícola ( $t \text{ ha}^{-1}$ )	Fator de conversão energética ( $f_{ce}$ ; $kWh \text{ t}^{-1}$ )	Consideração
Óleo de dendê	5	780	O óleo de dendê para fins energéticos é indicado apenas para locais isolados, onde há disponibilidade de óleo e não há acesso à rede elétrica.
		30	Safra abril a novembro, resultando em 5563 horas de operação por ano.
Cana de açúcar	83	60	Safra abril a novembro, resultando em 5563 horas de operação por ano.
		120	O sistema opera o ano todo com os resíduos gerados, e opera em 95% das horas anuais, o que resulta em $8322 \text{ h ano}^{-1}$ . Além do bagaço, considera-se também a palha e pontas resultantes da colheita da cana crua.

**Exemplo 8.2** – Em uma empresa cultiva-se cana de açúcar em 200 ha. Sabendo que a produtividade na área é de  $75 \text{ t ha}^{-1}$ , sendo 50% de resíduo, determinar o potencial de geração de energia da biomassa da cana de açúcar produzida na propriedade. Utilizar fator de conversão energética  $f_{ce} = 60 \text{ kWh t}^{-1}$  (Tabela 8.3). O tempo de operação do sistema em que o combustível do produto agrícola será convertido em energia elétrica será de 5 horas em 365 dias do ano. Sendo assim:

i) Encontrar a quantidade de biomassa de cana de açúcar produzida:

$$y_i = 75 \text{ t ha}^{-1} \cdot 0,5 = 37,5 \text{ t ha}^{-1} \text{ de biomassa de cana de açúcar}$$

ii) Determinar o potencial de geração de energia da cana de açúcar da propriedade:

$$P_i = \frac{y_i \cdot A_i \cdot f_{ce}}{t} = \frac{37,5 \text{ t ha}^{-1} \cdot 200 \text{ ha} \cdot 60 \text{ kWh t}^{-1}}{(365 \text{ dia ano}^{-1} \cdot 5 \text{ h dia}^{-1})} = 246,57 \text{ kW}$$

## 2.3 Efluentes líquidos

### a) Efluentes líquidos de animais

$$P_i = \frac{m_{CH_4.i} \cdot PCI_{CH_4}}{t \cdot C_{kcal/kWh}}$$

$$m_{CH_4.i} = (N_{animais} \cdot m_{esterco} \cdot n) \cdot \eta \cdot C_{CH_4}$$

Sendo:  $P_i$  – potencial de geração de energia do metano no  $i$ -ésimo período ( $kW$ );  $m_{CH_4.i}$  – massa de metano no  $i$ -ésimo período ( $kg_{CH_4} \text{ período}^{-1}$ );  $PCI_{CH_4}$  – poder calorífico inferior do metano ( $11940 \text{ kcal } kg^{-1}$ );  $C_{kcal/kWh}$  – coeficiente para transformar kcal para kWh ( $860 \text{ kcal } (kWh)^{-1}$ );  $t$  – tempo de operação do sistema em que o metano será convertido em energia elétrica ( $h \text{ período}^{-1}$ );  $N_{animais}$  – número de animais ( $animal$ );  $m_{esterco}$  – massa de esterco produzida em um dia por animal ( $kg_{esterco} \text{ dia}^{-1} \text{ animal}^{-1}$ );  $n$  – número de dias do período considerado ( $dias \text{ período}^{-1}$ );  $\eta$  – rendimento ou eficiência para a produção de biogás no biodigestor ( $adimensional$  ou  $m_{biogás}^3 \text{ kg}_{esterco}^{-1}$ );  $C_{CH_4}$  – concentração de metano no biogás ( $adimensional$  ou  $kg_{CH_4} \text{ kg}_{biogás}^{-1}$ ).

#### ➤ Dados técnicos:

- Massa específica do metano  $\rho_{CH_4} = 0,670 \text{ kg}_{CH_4} \text{ m}_{CH_4}^{-3}$ ;
- Poder calorífico interno do metano  $PCI_{CH_4} = 11940 \text{ kcal } kg^{-1}$  ou  $13,88 \text{ kWh } kg^{-1}$

Tabela 8.4. Valores de conversão energética para diferentes tipos de efluentes.

Origem do material	$m_{esterco}$ (kg dia <sup>-1</sup> animal <sup>-1</sup> )	Rendimento ( $\eta$ ) (kg <sub>biogás</sub> kg <sub>esterco</sub> <sup>-1</sup> )	$C_{CH_4}$ (kg <sub>CH<sub>4</sub></sub> kg <sub>biogás</sub> <sup>-1</sup> )
Suínos	2,25	0,062	0,66
Bovinos	10,0	0,037	0,60
Equinos	12,0	0,048	0,60
Aves	0,18	0,055	0,60
Abatedouro	1,0	0,100	0,55

**Exemplo 8.3** – Tem-se 50 equinos, que são tratados e cuidados ao longo de 365 dias na mesma propriedade. Os efluentes líquidos dos animais serão utilizados para produzir gás metano. O tempo de operação do sistema em que o metano será convertido em energia elétrica será de 5 horas em 365 dias do ano. Sendo assim:

i) Encontrar a massa de metano no período analisado:

– Da **Tabela 8.4**, tem-se que um equino produz  $m_{esterco} = 12 \text{ kg dia}^{-1} \text{ animal}^{-1}$ ;  $\eta = 0,048 \text{ kg}_{biogás} \text{ kg}_{esterco}^{-1}$ ;  $C_{CH_4} = 0,60 \text{ kg}_{CH_4} \text{ kg}_{biogás}^{-1}$ .

$$M_i = (N_{animais} \cdot m_{esterco} \cdot n) \cdot \eta \cdot C_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4}$$

$$M_i = (50 \text{ animais} \cdot 12 \text{ kg}_{esterco} \text{ dia}^{-1} \text{ animal}^{-1} \cdot 365 \text{ dias ano}^{-1}) \cdot 0,048 \text{ kg}_{biogás} \text{ kg}_{esterco}^{-1} \cdot 0,60 \text{ kg}_{CH_4} \text{ kg}_{biogás}^{-1}$$

$$M_i = 6307,2 \text{ kg}_{CH_4} \text{ ano}^{-1}$$

ii) Calcular o potencial de geração de energia do metano

$$P_i = \frac{m_{CH_4.i} \cdot PCI_{CH_4}}{t \cdot C_{kcal/kWh}} = \frac{6307,2 \text{ kg}_{CH_4} \text{ ano}^{-1} \cdot 11940 \text{ kcal kg}^{-1}}{(365 \text{ dia ano}^{-1} \cdot 5 \text{ h dia}^{-1}) \cdot 860 \text{ kcal (kWh)}^{-1}} = 48,0 \text{ kW}$$

## 2.3 Efluentes líquidos

### b) Efluentes líquidos domésticos e comerciais

$$P_i = \frac{m_{CH_4.i} \cdot PCI_{CH_4}}{t \cdot C_{kcal/kWh}}$$

$$m_{CH_4.i} = (V_{efluente} \cdot DBO_5 \cdot n \cdot \eta \cdot M_{fem}) - R$$

Sendo:  $P_i$  – potencial de geração de energia do metano no  $i$ -ésimo período ( $kW$ );  $m_{CH_4.i}$  – massa de metano no  $i$ -ésimo período ( $kg_{CH_4} período^{-1}$ );  $PCI_{biogás}$  – poder calorífico inferior do metano ( $11940 kcal kg^{-1}$ );  $C_{kcal/kWh}$  – coeficiente para transformar kcal para kWh ( $860 kcal (kWh)^{-1}$ );  $t$  – tempo de operação do sistema em que o metano será convertido em energia elétrica ( $h período^{-1}$ );  $V_{efluente}$  – volume de efluente tratado por dia ( $m^3 dia^{-1}$ );  $DBO_5$  – taxa de geração de demanda bioquímica de oxigênio ( $t_{DBO_5} m^{-3}$ );  $n$  – número de dias do período considerado ( $dias período^{-1}$ );  $\eta$  – rendimento ou eficiência para a produção de biogás no biodigestor (*adimensional* ou  $kg_{biogás} kg_{efluente}^{-1}$ );  $M_{fem}$  – máximo fator de emissão de metano ( $t_{CH_4} t_{DBO_5}^{-1}$  ou *adimensional*);  $R$  – Quantidade de metano recuperado ( $t_{CH_4} período^{-1}$ ).

#### ➤ **Dados técnicos:**

- Demanda Bioquímica de Oxigênio ( $DBO_5$ ):
  - 0,05 kg  $DBO_5$  por habitante por dia;
  - 160 litros de água por dia por habitante nas regiões urbanas, equivale a 0,312 kg  $DBO_5 m^{-3}$  de esgoto gerado ou 0,000312 t  $DBO_5 m^{-3}$ ;

➤ **Dados técnicos:**

- Eficiência média do Biodigestor anaeróbico: 50%;
- Máximo Fator de Emissão de Metano ( $M_{fem}$ ): 0,25 t CH<sub>4</sub> por tonelada de DBO<sub>5</sub>;
- Quantidade de Metano Recuperado ( $R$ ): considerada insignificante.

**Exemplo 8.4** – Um vilarejo possui 100 habitantes, que geram volume de 16 m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup> de efluente tratado. Os efluentes líquidos domésticos e comerciais serão utilizados para produzir gás metano. O tempo de operação do sistema em que o metano será convertido em energia elétrica será de 5 horas em 365 dias do ano. Sendo assim:

i) Encontrar a massa de metano no período analisado:

$$m_{CH_4.i} = (V_{efluente} \cdot DBO_5 \cdot n \cdot \eta \cdot M_{fem}) - R$$

$$m_{CH_4.i} = (16 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} \cdot 0,312 \text{ kg}_{DBO_5} \text{ m}^{-3} \cdot 365 \text{ dia ano}^{-1} \cdot 0,5 \text{ kg}_{biogás} \text{ kg}_{efluente}^{-1} \cdot 0,25 \text{ kg}_{CH_4} \text{ kg}_{DBO_5}^{-1}) - 0$$

$$m_{CH_4.i} = 227,76 \text{ kg}_{CH_4} \text{ ano}^{-1}$$

ii) Calcular o potencial de geração de energia do metano:

$$P_i = \frac{m_{CH_4.i} \cdot PCI_{CH_4}}{t \cdot C_{kcal/kWh}} = \frac{227,76 \text{ kg}_{CH_4} \text{ ano}^{-1} \cdot 11940 \text{ kcal kg}^{-1}}{(365 \text{ dia ano}^{-1} \cdot 5 \text{ h dia}^{-1}) \cdot 860 \text{ kcal (kWh)}^{-1}} = 1,73 \text{ kW}$$



## 2.4 Resíduos sólidos

$$P_i = \frac{m_{CH_4.i} \cdot PCI_{CH_4}}{t \cdot C_{kcal/kWh}}$$

$$m_{CH_4.i} = \left( m_{resíduos} \cdot n \cdot f_{cm} \cdot COD \cdot COD_f \cdot F \cdot T_{C/CH_4} \right) - R \cdot (1 - F_{ox})$$

Sendo:  $P_i$  – potencial de geração de energia do metano no  $i$ -ésimo período ( $kW$ );  $m_{CH_4.i}$  – massa de metano no  $i$ -ésimo período ( $t_{CH_4} \text{ período}^{-1}$ );  $PCI_{biogás}$  – poder calorífico inferior do metano ( $11940 \text{ kcal kg}^{-1}$ );  $C_{kcal/kWh}$  – coeficiente para transformar kcal para kWh ( $860 \text{ kcal (kWh)}^{-1}$ );  $t$  – tempo de operação do sistema em que o metano será convertido em energia elétrica ( $h \text{ período}^{-1}$ );  $m_{resíduo}$  – massa de resíduos sólidos depositados no aterro por dia ( $t_{resíduos} \text{ dia}^{-1}$ );  $n$  – número de dias do período considerado ( $dias \text{ período}^{-1}$ );  $f_{cm}$  – fator de correção de metano (*adimensional*);  $COD$  – carbono orgânico degradável no resíduo sólido domiciliar (*RSD*; *adimensional*);  $COD_f$  – fração de  $COD$  que realmente degrada (*adimensional*);  $F$  – fração de  $CH_4$  no gás de aterro (*adimensional*);  $T_{C/CH_4}$  – taxa de conversão de carbono em metano ( $16/12$ ; *adimensional*);  $R$  – quantidade de metano recuperado ( $t_{CH_4} \text{ período}^{-1}$ );  $F_{ox}$  – fator de oxidação (*adimensional*).

### ➤ Dados técnicos:

- Fator de Correção de Metano ( $f_{cm}$ ):
  - 60% para os locais sem classificação (O IPCC recomenda  $f_{cm}$  conforme profundidade de disposição de resíduos sólidos). Obs.: O Brasil não tem dados sobre profundidade.
- Carbono Orgânico Degradável ( $COD$ ):
  - 12% (IPCC). Obs.: Não leva em consideração a composição de resíduos no Brasil.

## ➤ Dados técnicos:

- Fração de  $COD$  que realmente degrada ( $COD_f$ ):
  - 77% (IPCC, 1996),
- Fração de Metano no Biogás ( $F$ ):
  - 50% (IPCC) biogás de aterro. Obs.: Erro da ordem de 10% (estudo em São Paulo).
- Quantidade de metano recuperado ( $R$ ): considerada insignificante;
- Fator de oxidação ( $F_{ox}$ ): considerado igual a zero.

**Exemplo 8.5** – Em um aterro sanitário é depositado  $3 \text{ } t_{resíduos} \text{ dia}^{-1}$  de resíduos sólidos. O material será utilizado produzir gás metano. O tempo de operação do sistema em que o metano será convertido em energia elétrica será de 5 horas em 365 dias do ano. Sendo assim:

i) Encontrar a massa de metano no período analisado:

$$m_{CH_4.i} = (m_{resíduos} \cdot n \cdot f_{cm} \cdot COD \cdot COD_f \cdot F \cdot T_{C/CH_4}) - R \cdot (1 - F_{ox})$$

$$m_{CH_4.i} = \left( 3 \text{ } t_{resíduos} \text{ dia}^{-1} \cdot 365 \text{ dias período}^{-1} \cdot 0,6 \cdot 0,12 \cdot 0,77 \cdot 0,5 \cdot \frac{16}{12} \right) - 0$$

$$m_{CH_4.i} = 40,47 \text{ } t_{CH_4} \text{ ano}^{-1}$$

ii) Calcular o potencial de geração de energia do metano:

$$P_i = \frac{m_{CH_4.i} \cdot PCI_{CH_4}}{t \cdot C_{kcal/kWh}} = \frac{40,47 \text{ } t_{CH_4} \text{ ano}^{-1} \cdot 11940000 \text{ kcal } t^{-1}}{(365 \text{ dia ano}^{-1} \cdot 5 \text{ h dia}^{-1}) \cdot 860 \text{ kcal (kWh)}^{-1}} = 307,9 \text{ kW}$$

### 3 TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO TÉRMICO

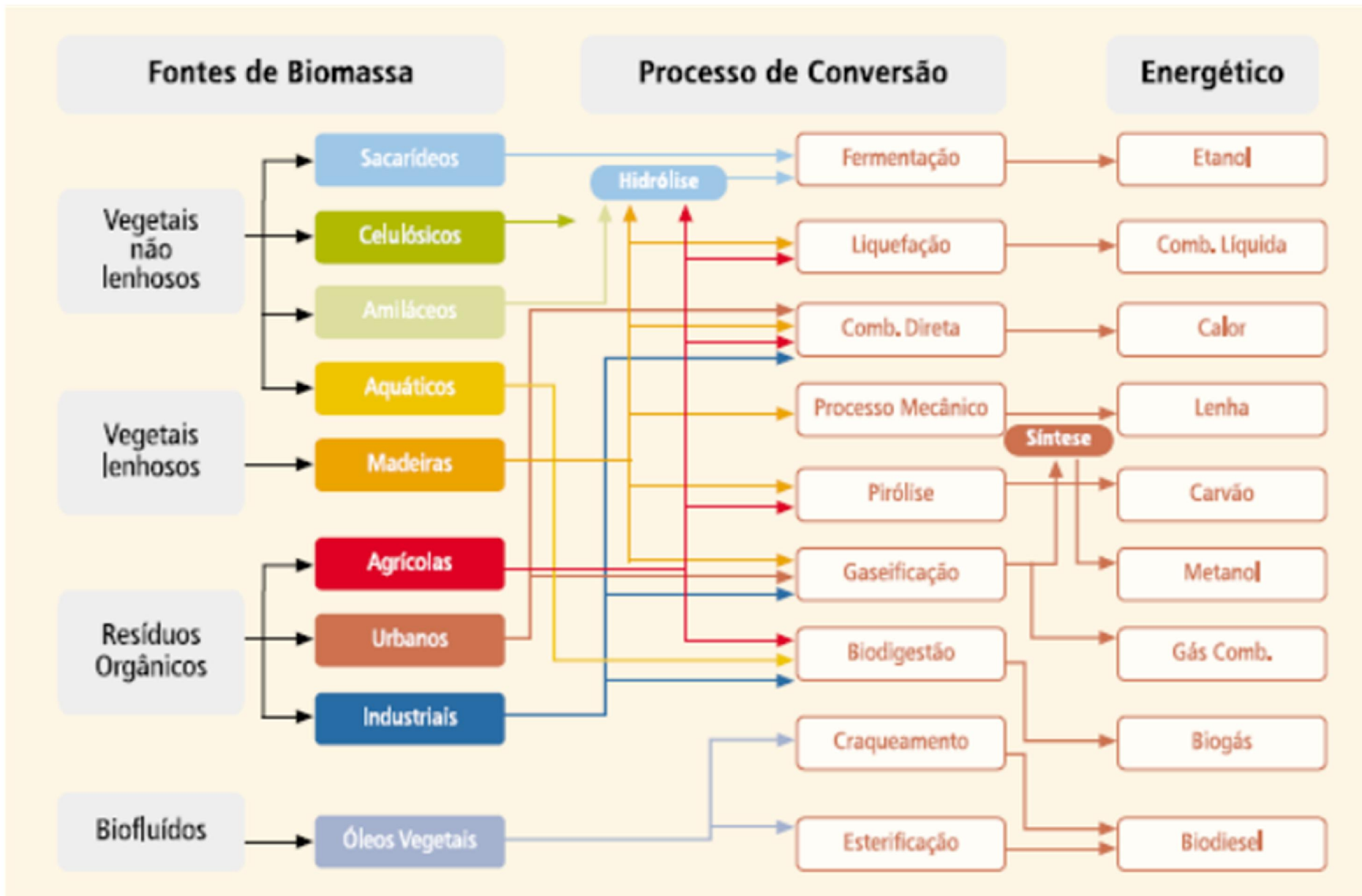


Figura 8.2 – Processos de conversão energética da biomassa.

## 4 POTENCIAL ENERGÉTICO COM BIOMASSA

### 4.1 No mundo

- 14% de todo o consumo mundial de energia primária;
- Países em desenvolvimento: 34%, chegando a 60% na África.

Tabela 8.5. Consumo de biomassa em regiões do mundo.

País ou região	Biomassa (Mtep)	Outros (Mtep)	Total (Mtep)	Biomassa / Total (%)
China	206	649	855	24
Leste Asiático	106	316	422	25
Sul da Ásia	235	188	423	56
América Latina	73	342	415	18
África	205	136	341	60
Países em Desenvolvimento	825	1632	2457	34
Países da OCDE	81	3044	3125	3
Mundo	930	5713	6643	14

# 4 POTENCIAL ENERGÉTICO COM BIOMASSA

## 4.2 No Brasil

- A rota da produção de etanol da cana de açúcar é a mais interessante tecnologicamente e economicamente no Brasil.

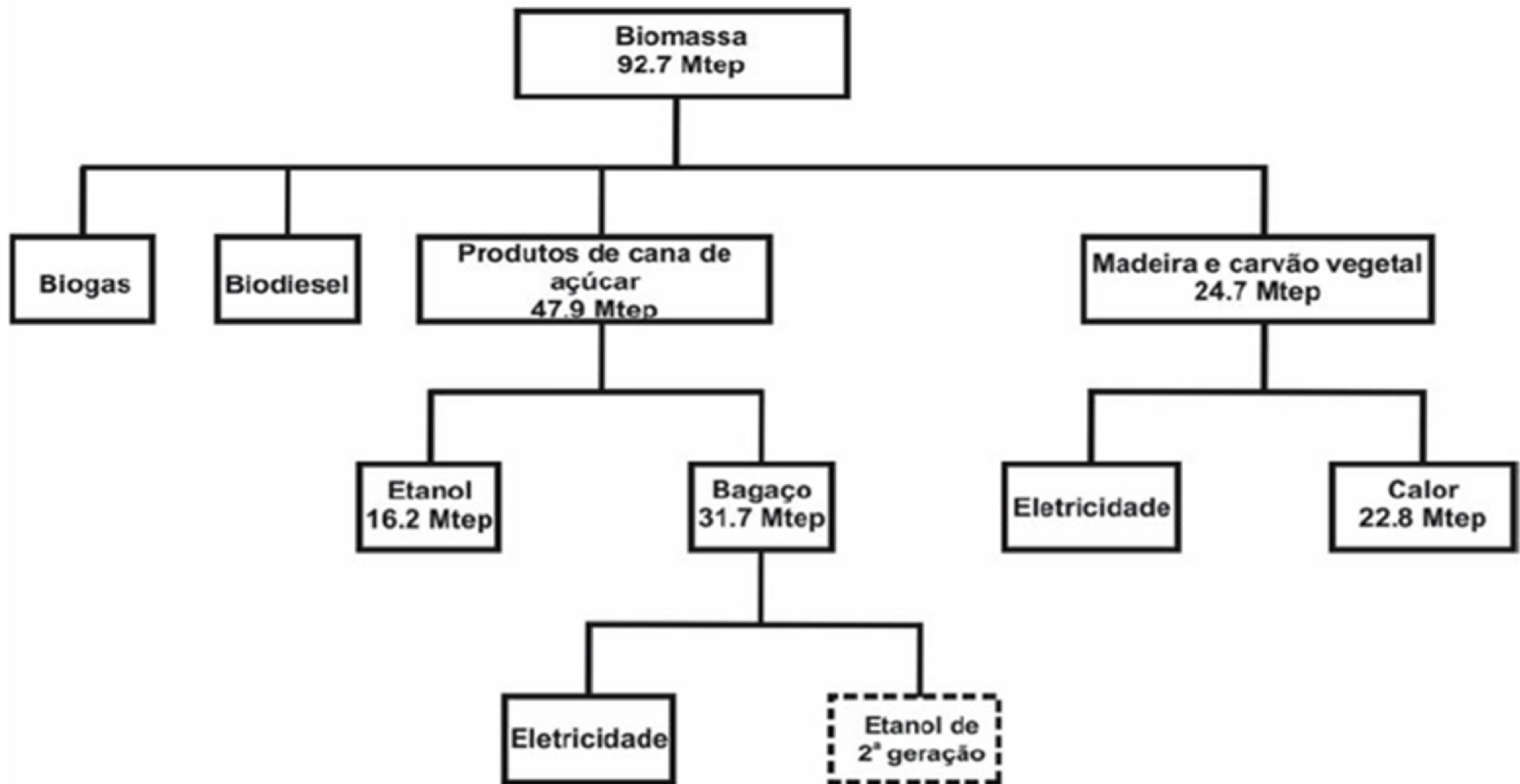


Figura 8.3 – Rotas do uso de biomassa para a produção de energia no Brasil.

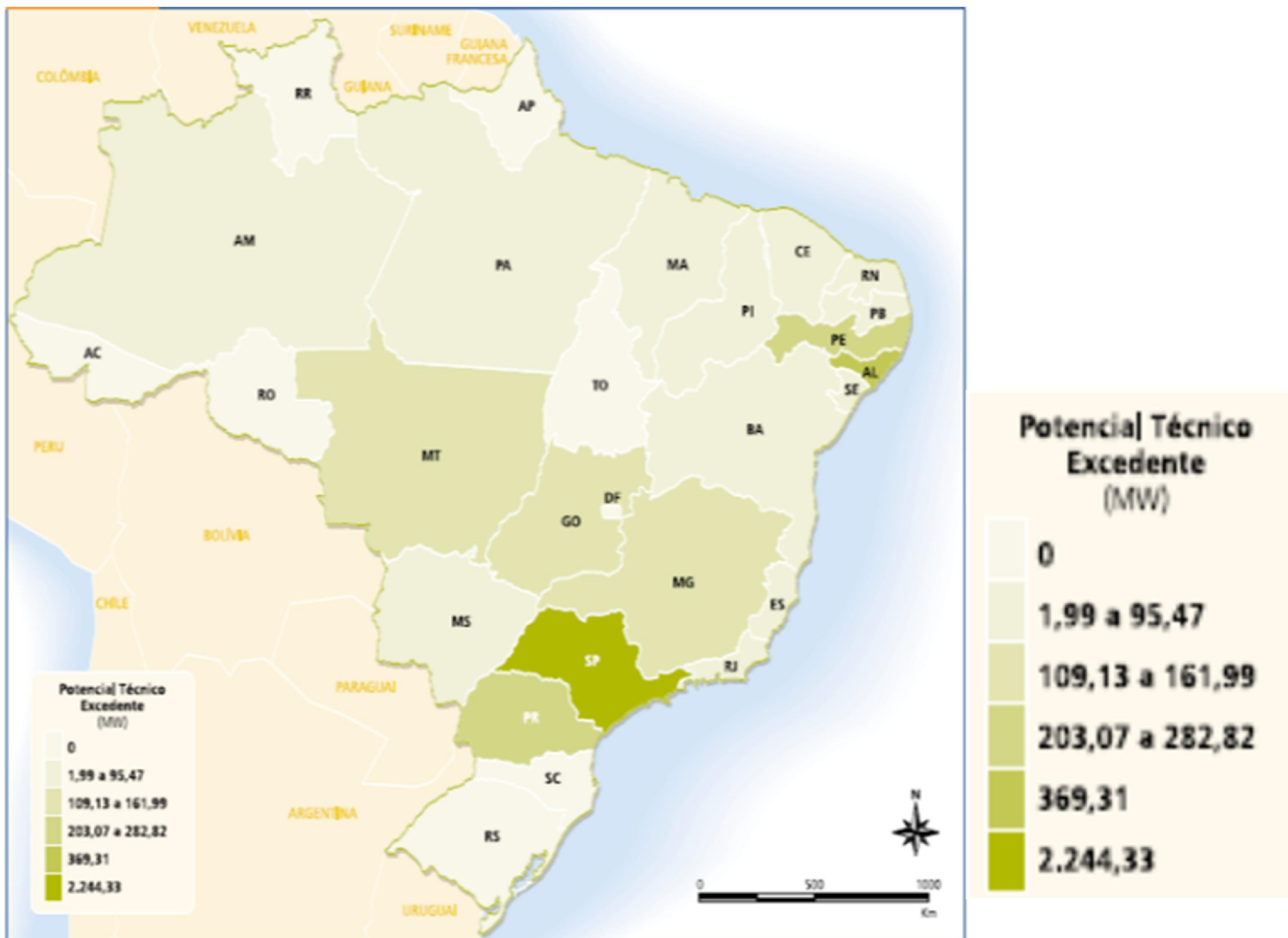


Figura 8.4 – Potencial de geração de excedente de energia elétrica no setor sucroalcooleiro.

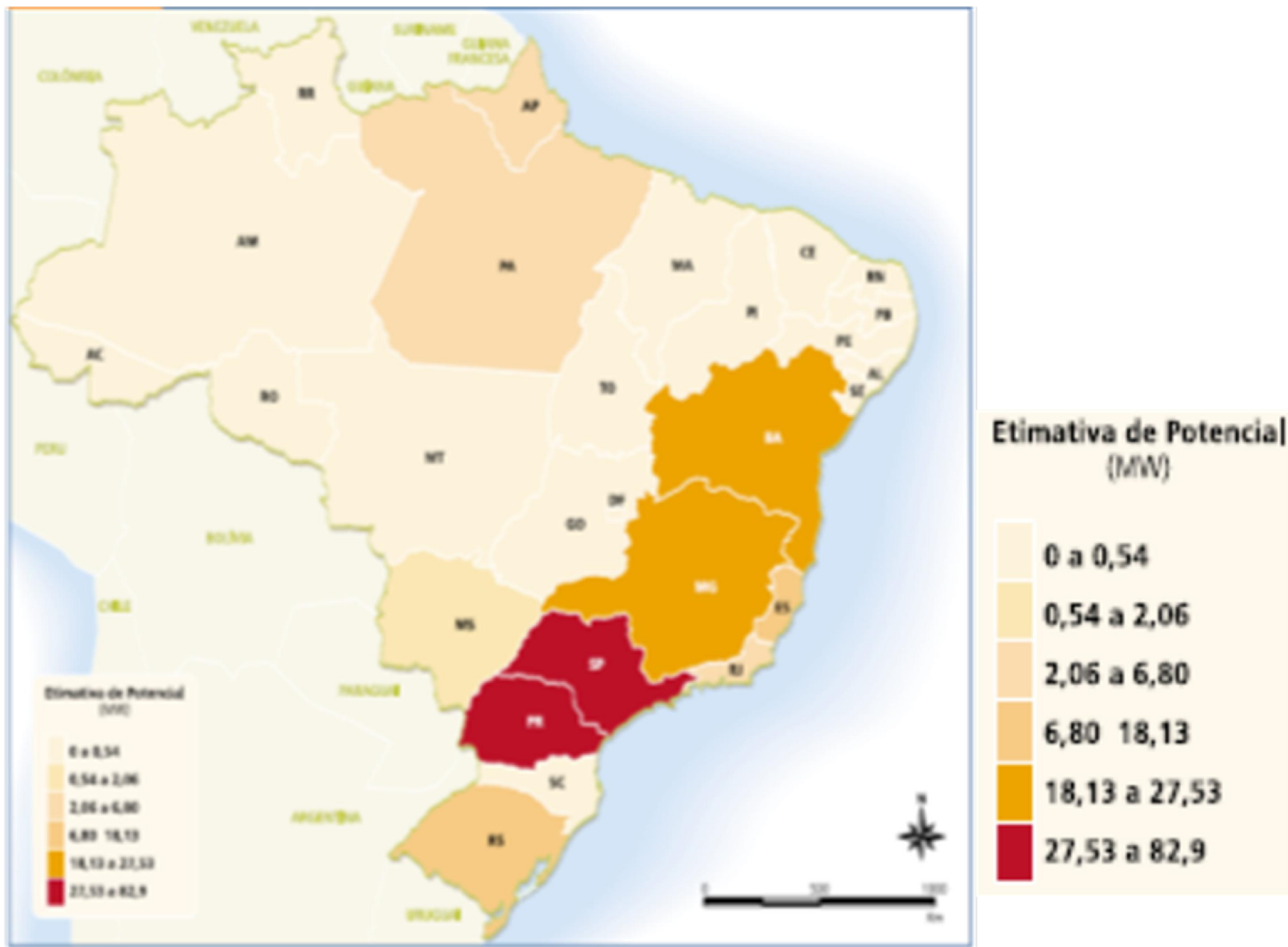


Figura 8.5 – Potencial de geração de energia elétrica com resíduos florestais (silvicultura).

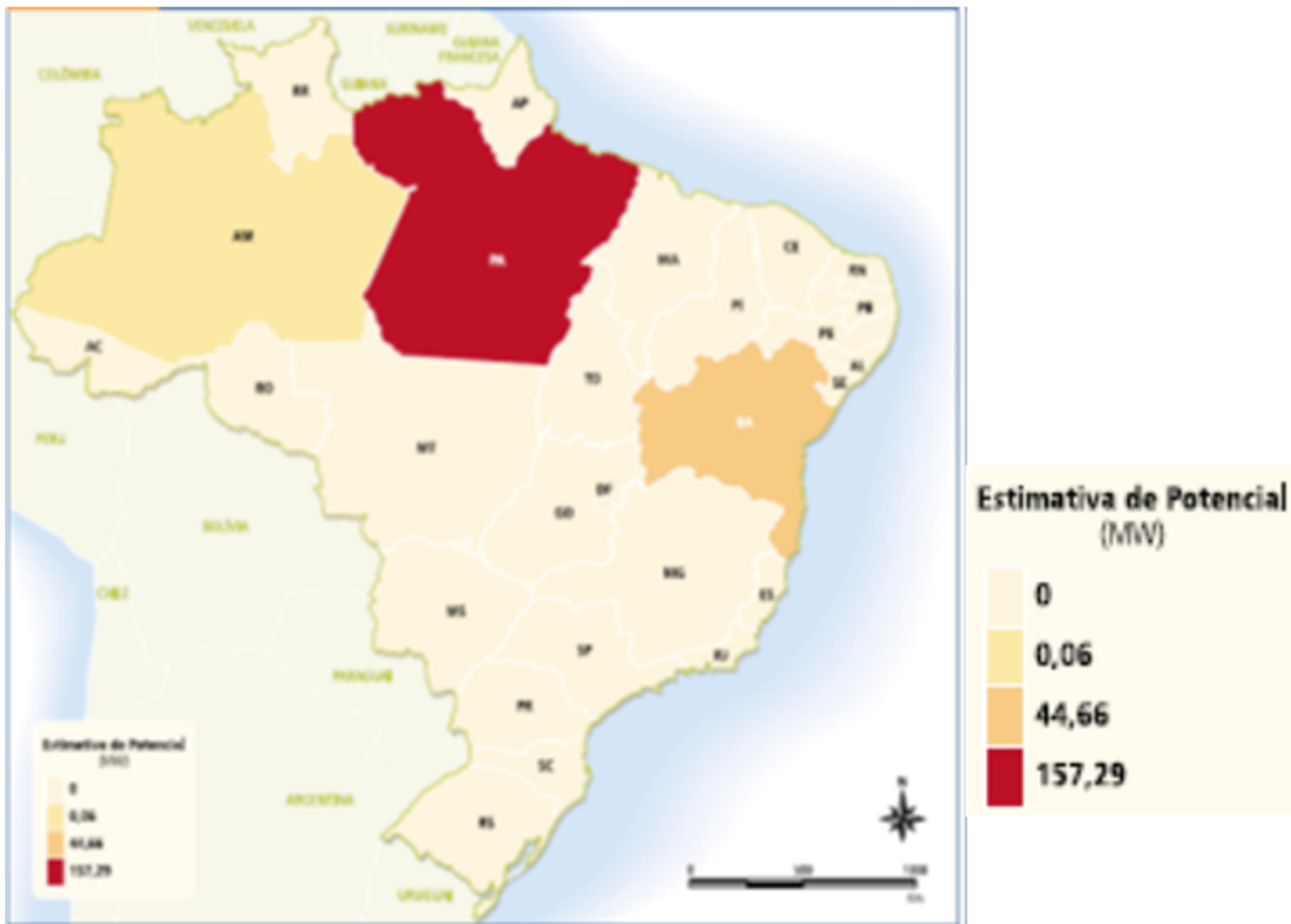


Figura 8.6 – Potencial de geração de energia elétrica com óleo de palma (dendê).



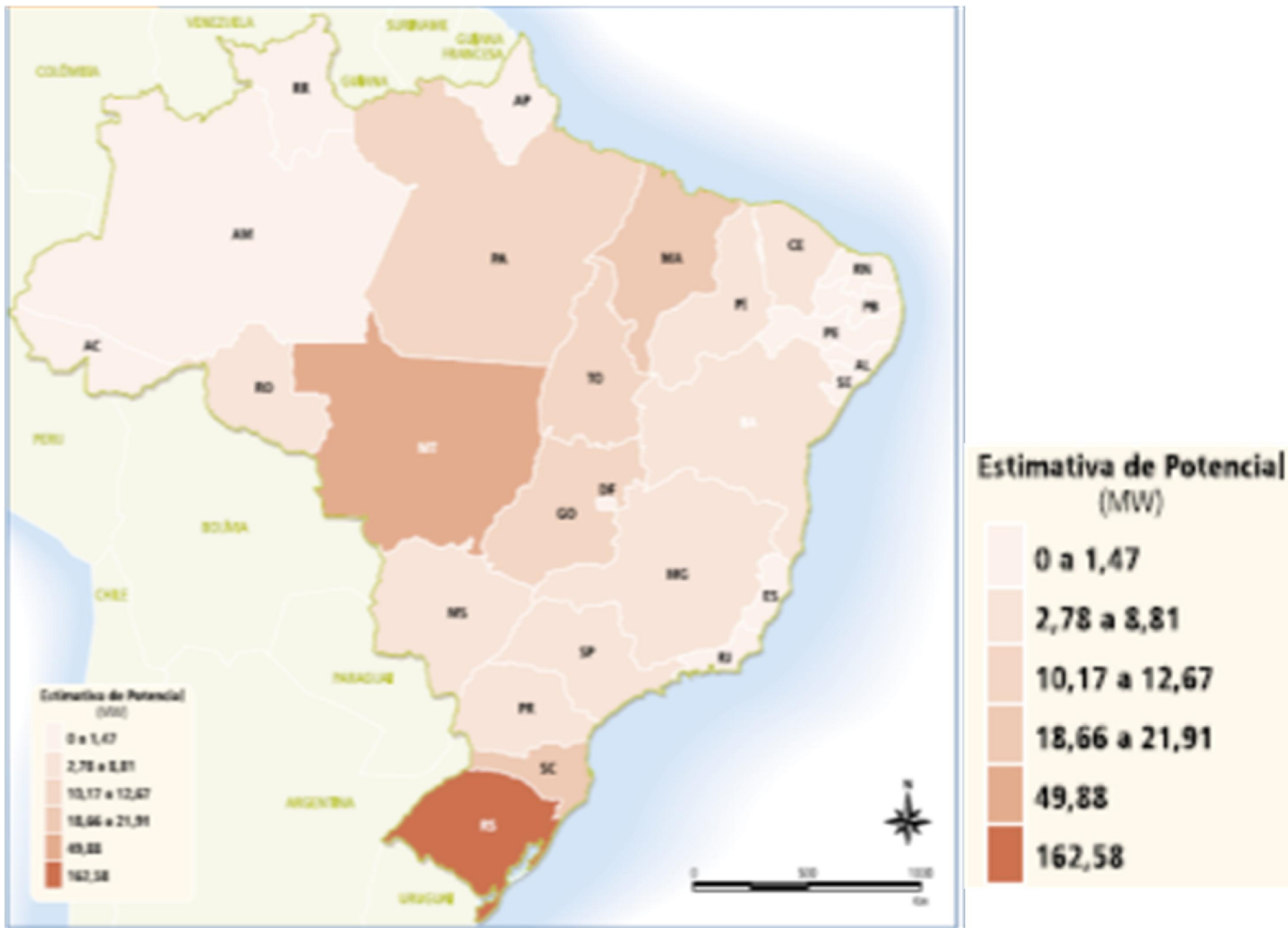


Figura 8.7 – Potencial de geração de energia elétrica com casca de arroz.



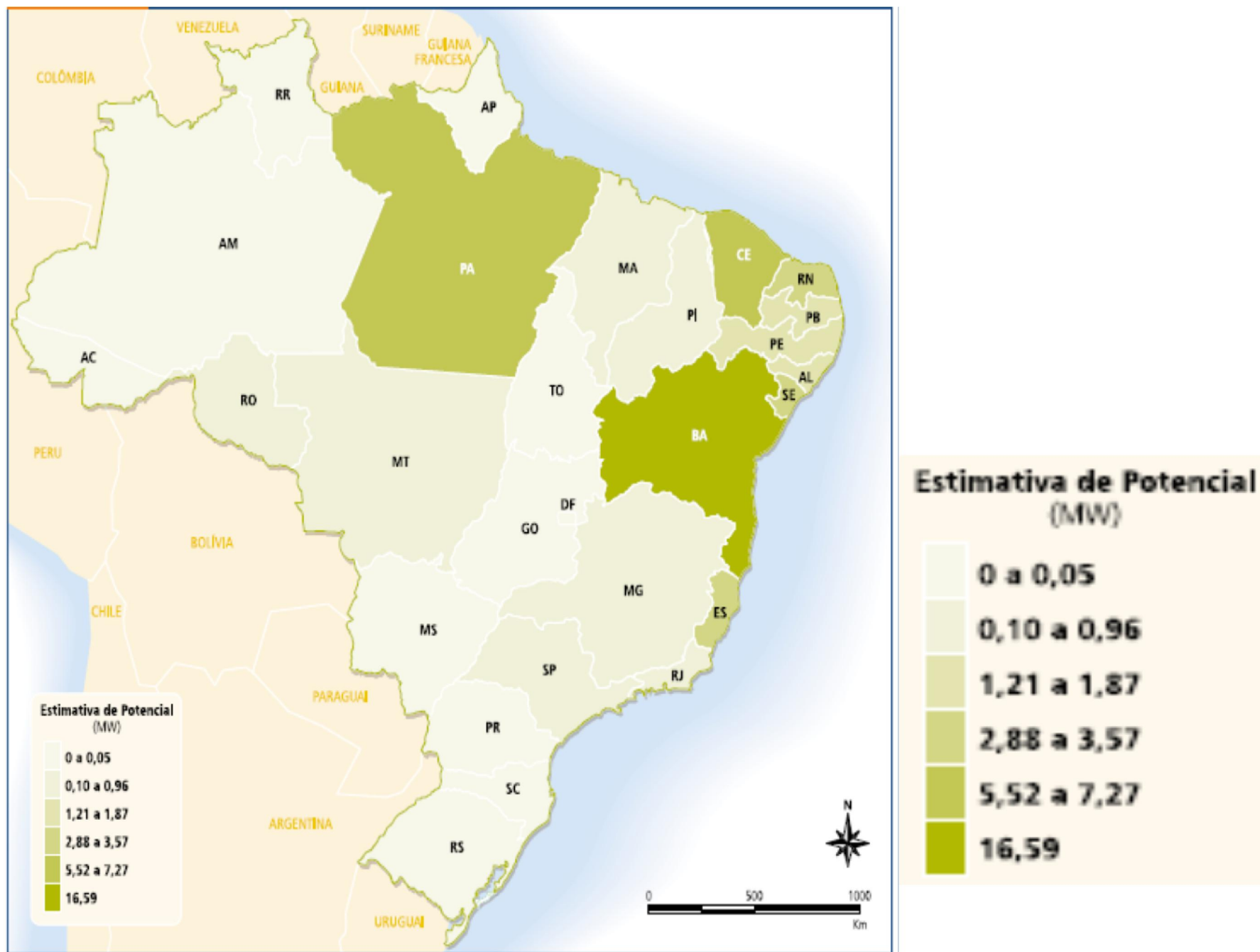


Figura 8.9 – Potencial de geração de energia elétrica com casca de coco da bahia.

## 5 CAPACIDADE INSTALADA

- Ao contrário das outras fontes, não existe ranking mundial dos maiores produtores de biomassa ([Tabela 8.6](#)) e capacidade instalada.

[Tabela 8.6.](#) Maiores produtores de bioenergia no mundo (ano base 2005).

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

## 5 CAPACIDADE INSTALADA

### a) Centrais termelétricas a biomassa em operação no Brasil

➤ Em 2008: 302 termelétricas à biomassa no país (5,7 mil MW).



Figura 8.10 – Usinas de biomassa em operação e potencia instalada por unidades da federação (ano base 2008).

# 6 PRODUÇÃO DE BIOGÁS COM BIODIGESTORES

## 6.1 O BIOGÁS

### 6.1.1 Histórico do biogás

- Unidades de biodigestores em operação:
  - China: 8 milhões;
  - Índia: em torno de 150 mil.
- Brasil: estudos iniciaram em 1976.

### 6.1.2 Características do Biogás

- **Biogás:** Gás inflamável produzido por microorganismos, quando matérias orgânicas são fermentadas dentro de determinados limites de temperatura, teor de umidade e acidez, em ambiente impermeável ao ar;
- **Metano:** Principal componente (não tem cheiro, cor ou sabor);
- **Demais gases:** odor de alho ou ovo podre;
- **Gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S):** corrosivo (necessário tratamento antes do uso).

- Vantagens e desvantagens da digestão anaeróbica
  - **Vantagens:** Processo natural; requer pouco espaço; reduz volume; reduz emissão de gases de efeito estufa ( $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ ); economia com energia;
  - **Desvantagens:** Gás sulfídrico; variação da qualidade do biogás; custos (manutenção e mão-de-obra); necessita bombeamento (acima de 500 m).
- Poder calorífero do biogás: 5200 a 12000 (purificado)  $\text{kcal m}^{-3}$ ;
- Equivalência para 1  $\text{m}^3$  de Biogás:
  - 0,61 litro de gasolina;
  - 0,58 litro de querosene;
  - 0,55 litro de diesel;
  - 0,45 litro de gás de cozinha;
  - 1,53 quilo de lenha;
  - 0,79 litro de álcool hidratado;
  - 1,43 kW
- Utilização e consumo de biogás em algumas atividades ([Tabela 8.7](#))

Tabela 8.7. Consumo do biogás em diferentes utilidades.

Utilização	Consumo
Cozinhar	0,33 m <sup>3</sup> dia <sup>-1</sup> por pessoa
Iluminação com lampião	0,12 m <sup>3</sup> hora <sup>-1</sup> por lampião
Chuveiro a gás	0,8 m <sup>3</sup> por banho
Incubador	0,71 m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> de espaço interno por hora
Motor combustão interna	0,45 m <sup>3</sup> Hp <sup>-1</sup> por hora
Aquecedor água a 100 °C	0,08 m <sup>3</sup> L <sup>-1</sup>
Gerar eletricidade (1 kWh)	0,62 m <sup>3</sup>

### 6.1.3 Composição química do biogás

Tabela 8.8. Composição do biogás processado num biodigestor: (Castanón, 2002).

Gases	Porcentagem (%)
Metano (CH <sub>4</sub> )	40 a 75
Dióxido de Carbono (CO <sub>2</sub> )	25 a 40
Nitrogênio (N)	0,5 a 2,5
Oxigênio (O)	0,1 a 1,0
Acido sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	0,1 a 0,5
Amoníaco (NH <sub>3</sub> )	0,1 a 0,5
Monóxido de Carbono (CO)	0,0 a 0,1
Hidrogênio (H)	1,0 a 3,0



## 6.1.3 Composição química do biogás

### a) Diferentes biomassas e a produção de biogás

Tabela 8.9. Produção diária de resíduos líquidos e esterco para diversos animais.

Resíduo	Unidade	Suínos	Frango de corte	Gado de corte	Gado de leite	Ovinos
Líquidos	% dia <sup>-1</sup> (PV)	5,1	6,6	4,6	9,4	3,6
Sólidos	kg animal <sup>-1</sup> dia <sup>-1</sup>	2,3 a 2,5	0,12 a 0,18	10 a 15	10 a 15	0,5 a 0,9

Tabela 8.10. Quantidade de rejeitos para a produção de 1 m<sup>3</sup> de biogás.

Matéria Prima	Quantidade (kg)
Esterco fresco de bovino	25
Esterco seco de galinha	2,3
Resíduos secos de vegetais	2,5
Esterco seco de suíno	2,86

## 6.2 Processos de produção do biogás

### 6.2.1 Biodigestão anaeróbica

- Fases nos processos de fermentação metanogênica:
  - Primeira fase: Moléculas orgânicas em ácidos graxos, sais ou gás;
  - Segunda fase: Ácidos graxos, sais ou gás em mistura gasosa essencialmente constituída por metano e dióxido de carbono.
- O organismo anaeróbico não pode sobreviver em locais com oxigênio;
- Reações bioquímicas que ocorrem no processo ([Figura 8.11](#));

### 6.2.2 Condições indispensáveis à digestão anaeróbica

- Impermeabilidade ao ar: microrganismos (produz  $\text{CO}_2$ );
- Temperatura adequada: 20 a 45 °C (mesofílica); 50 a 65 °C (termofílica);
- Nutrientes: relação carbono-nitrogênio (20:1 e 30:1);
- Teor de água: 90% do peso do conteúdo total;
- pH: 6,6 e 7,6
- Substâncias tóxicas: detergentes e outros produtos químicos.

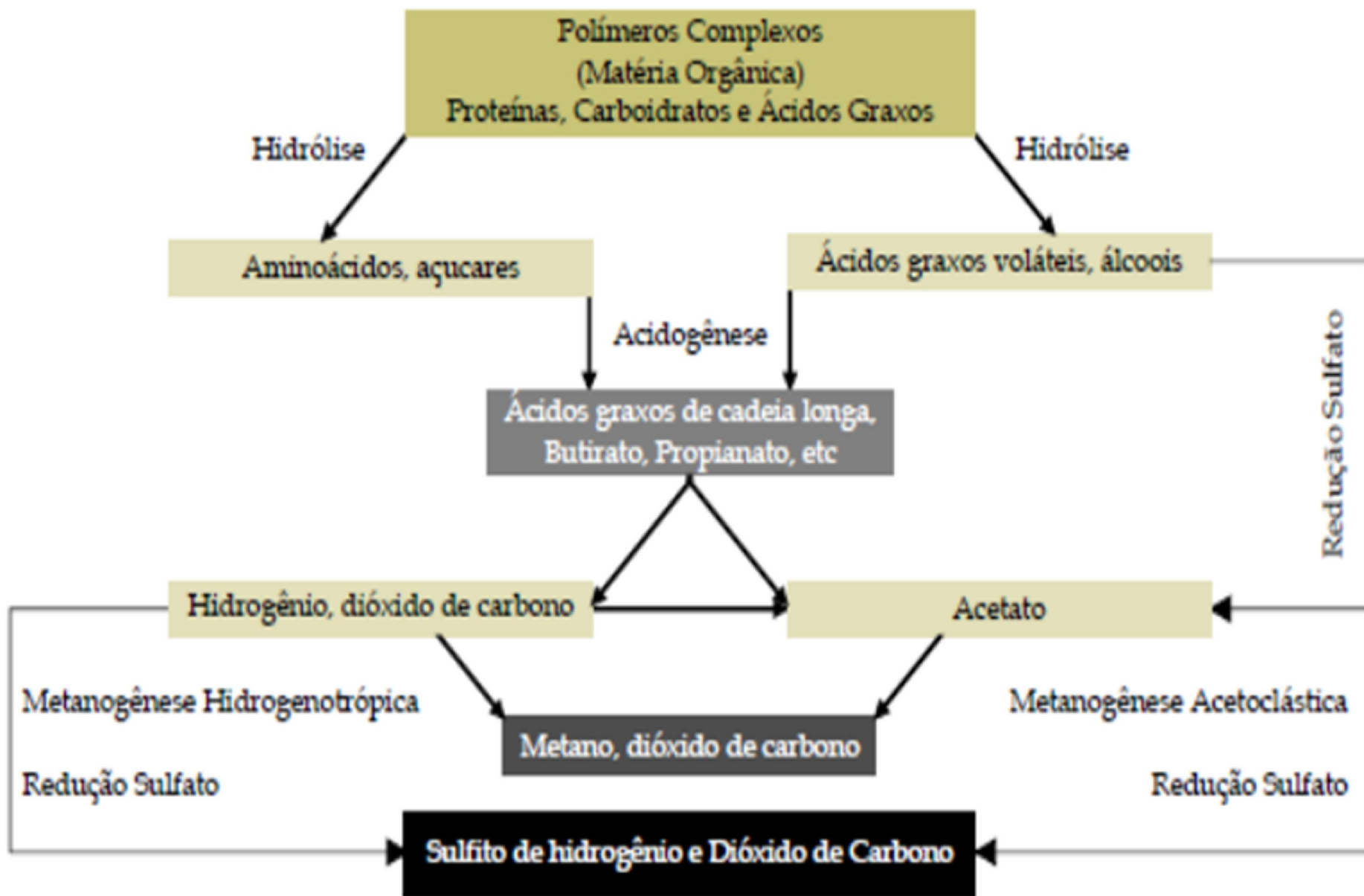


Figura 8.11 – Digestão anaeróbica da matéria orgânica.

## 6.3 Tipos de biodigestores

- Biodigestão: Degradação da biomassa por microorganismos;
- Biodigestor: Câmara onde se realiza o processo bioquímica da biodigestão;
- Classificação dos biodigestores:
  - Industrial;
  - Urbano;
  - Agrícola (setores rurais)
- Componentes ou partes dos digestores mais eficientes:
  - Tanque de entrada;
  - Tubo de carga
  - Digestor;
  - Septo;
  - Gasômetro;
  - Tubo de descarga;
  - Leito de secagem;
  - Saída do biogás.

## 6.3 Tipos de biodigestores

- Quanto aos tipos tem-se: Biodigestores horizontais ou verticais; alvenaria ou concreto; plástico ou lona; metal ou fibra de vidro;
- Quanto à forma de carregamento:
  - Descontínuos (batelada);
  - Contínuos.

### 6.3.1 Processo descontínuo (batelada)



Figura 8.12 – Sistema descontínuo (batelada) de produção de biogás.

## 6.3 Tipos de biodigestores

### 6.3.2 Processo contínuo

- Abastecido diário;
- Modelos mais conhecidos: Chinês e Indiano;
- Estrutura: maior parte fica abaixo no nível do solo;
- Precisa de agitação da matéria orgânica para evitar crostas;
- Produção uniforme de biogás.

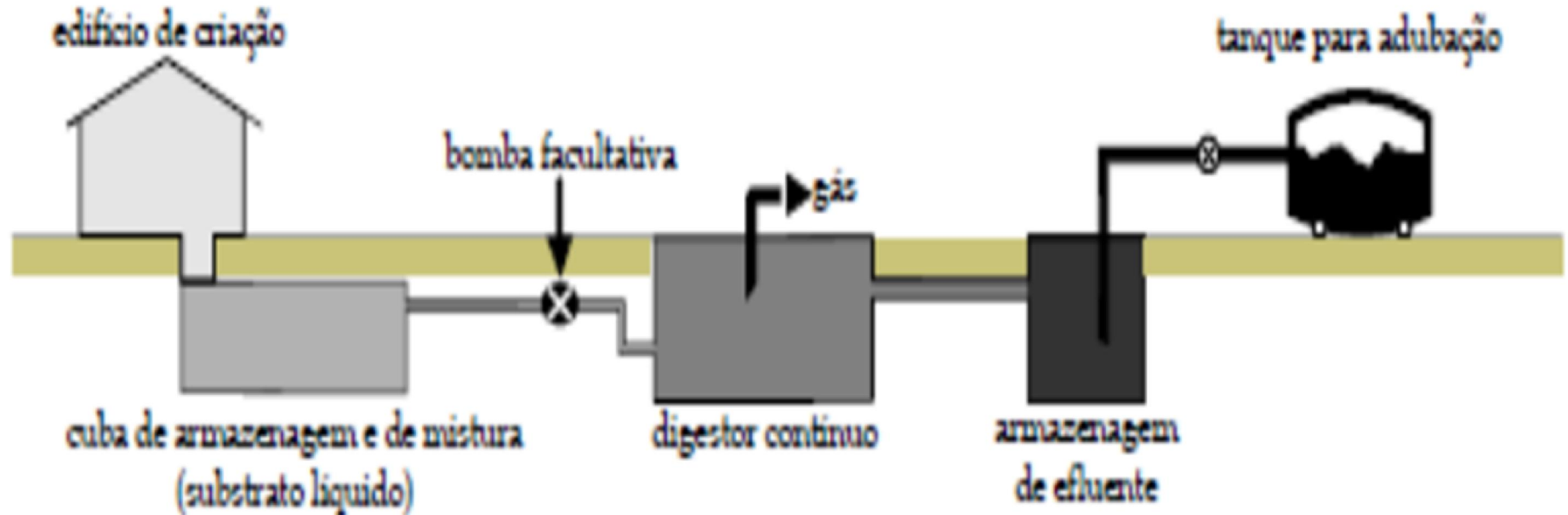


Figura 8.13 – Sistema contínuo de produção de biogás.

## 6.3.2 Processo contínuo

### a) Modelo Chinês

- Início da utilização: 1929-1930 na China;
- Cúpula fixa e de alvenaria;
- Exige esgotamento do gás com maior frequência para evitar desperdícios;
- Vantagens:
  - Custo baixo; ocupa pouco espaço; e, pouca variação da temperatura;
- Desvantagens:
  - Entupimentos; precisa de solos profundos; mais apropriado para produção de biofertilizante do que biogás.

## 6.3.2 Processo contínuo

### a) Modelo Chinês

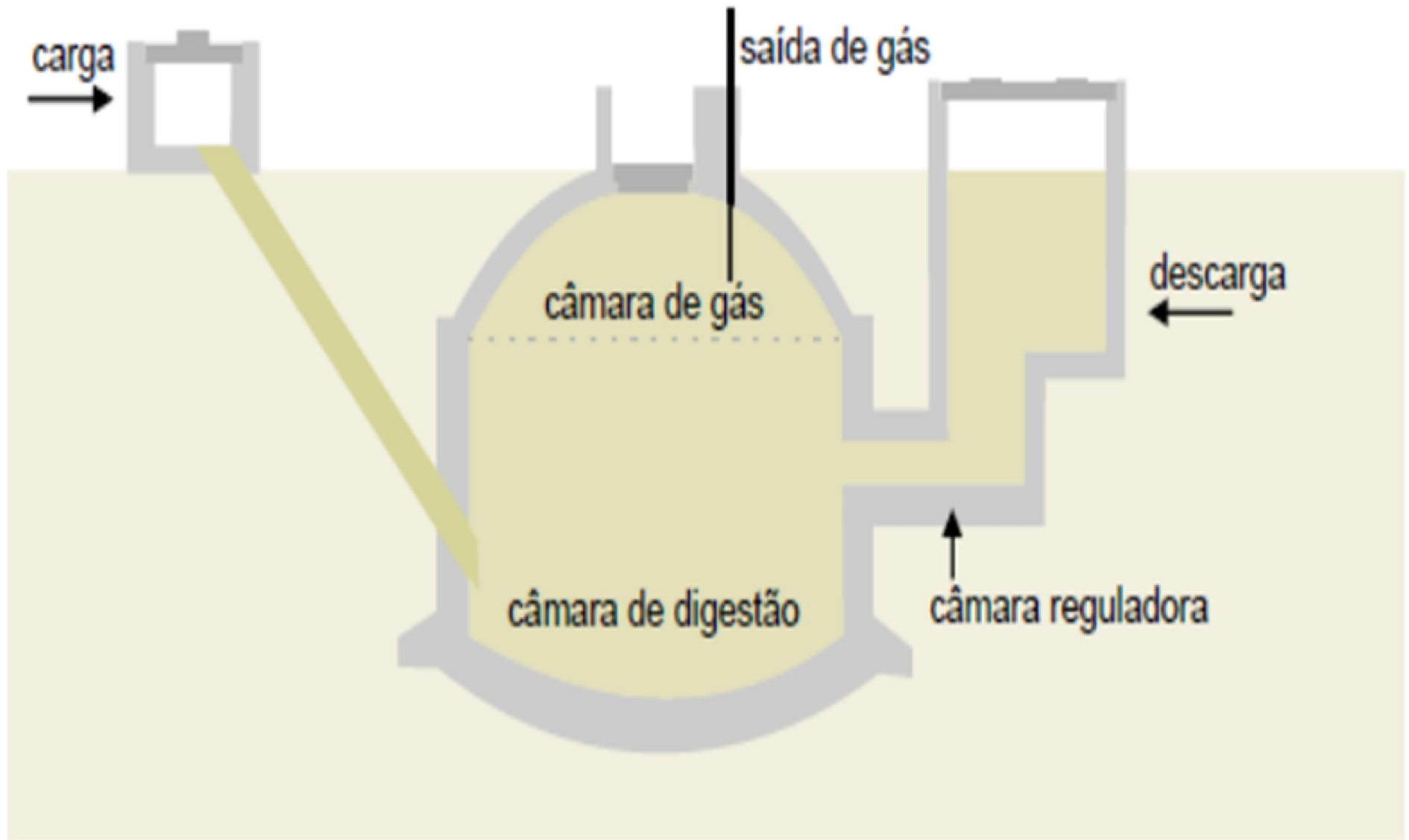


Figura 8.14 – Esquema de um biodigestor tipo chinês.



## 6.3.2 Processo contínuo

### b) Modelo Indiano

- Início da utilização: 1937 na Índia;
- Índia: 78 mil unidades implantada em 1978;
- Funciona como um gasômetro;
- Cúpula móvel;
- O peso da cúpula imprime certa compressão ao gás estocado, imprimindo maior pressão.
- Vantagens:
  - Custo baixo; ocupa pouco espaço no terreno (vertical); e, pouca variação da temperatura;
- Desvantagens:
  - Corrosão da cúpula de metal; Entupimentos; precisa de solos profundos;
- A principal diferença entre os modelos chinês e indiano está na construção da cúpula.

## 6.3.2 Processo contínuo

### b) Modelo Indiano

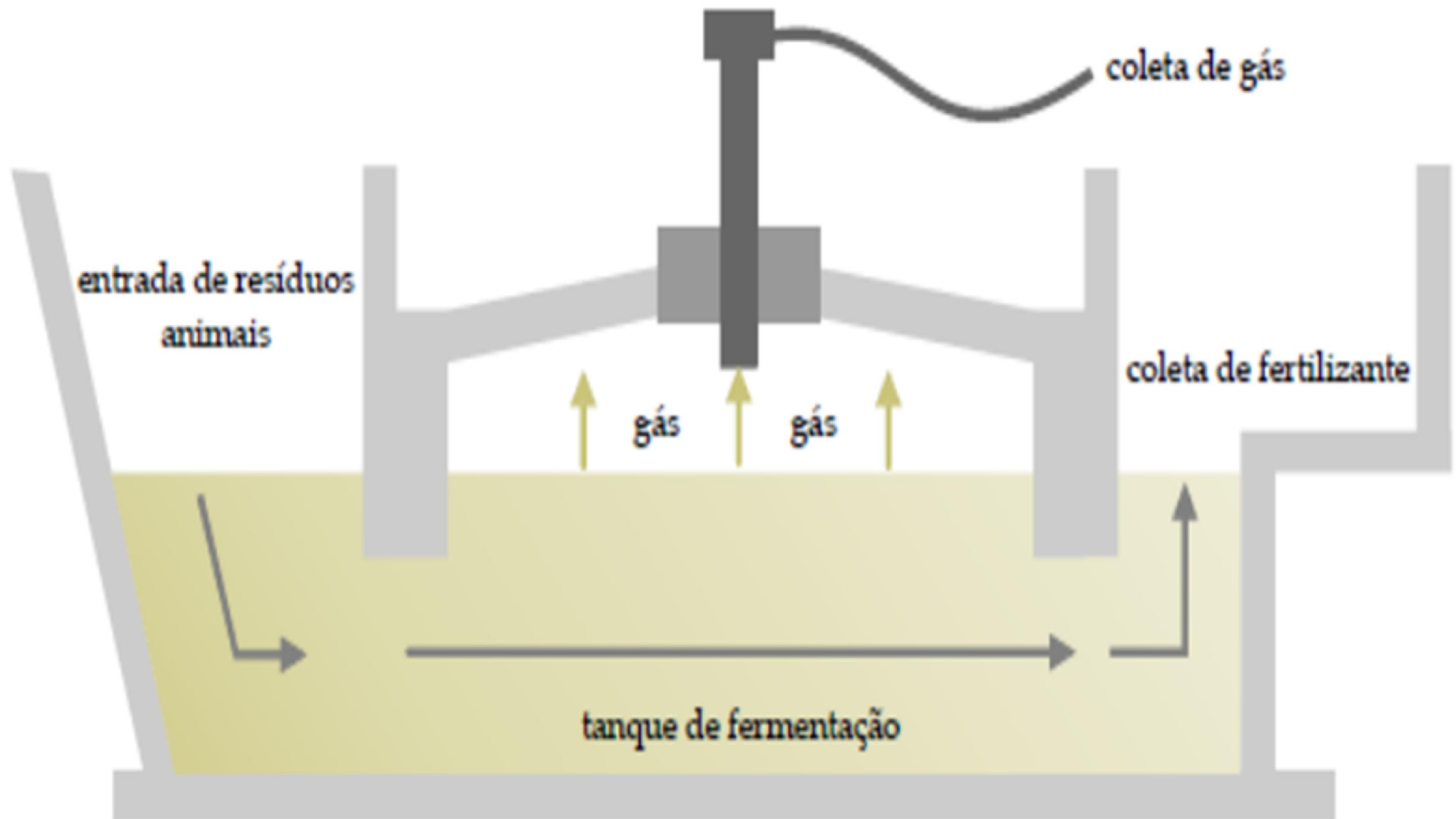


Figura 8.15 – Esquema de um biodigestor tipo Indiano.

## 6.3.2 Processo contínuo

### b) Modelo Marinha

- Modelo tipo horizontal ou lona;
- Largura é maior que a profundidade;
- Maior exposição ao Sol (aumenta produção de gás);
- Cúpula móvel de plástico maleável (tipo PVC);
- Caixa de carga feita em alvenaria , evitando entupimentos;
- Vantagens:
  - Custo baixo; área de exposição ao Sol; não precisa de solos profundos; pouco entupimento; fácil limpeza;
- Desvantagens:
  - Custo da cúpula; ocupa maior área;

## 6.3.2 Processo contínuo

### c) Modelo Marinha



Figura – Biodigestor modelo da Marinha ou Canadense.

## 6.4 Operação e carregamento do biodigestor

- Quantidade de água: 90% do peso do conteúdo total;
- É necessário o tratamento prévio da água usada para diluição;
- Efluente para fertirrigação: precisa eliminar os microorganismos patogênicos;
- Fertilizantes fosfatados: proibido seu uso (na ausência do ar produz fosfina, que é extremamente tóxica e letal);
- Assegurar relativa estabilidade de temperatura;
- Volume do digestor deve ser suficiente para que o gás atenda as necessidades;
- É preferível um digestor menor com boa manutenção, do que um grande com manejo incorreto;
- O biodigestores é eficiente para tratar excrementos e melhorar a higiene e padrão sanitário do meio rural;
- Carga e descarga do biodigestor devem ser feitas ao mesmo tempo.

## 6.5 Dimensionamento do biodigestor

**Exemplo 8.6** – Dimensionar um biodigestor modelo indiano para uma pequena propriedade rural, contendo 10 bovinos de corte. Os animais pastejam durante o dia e são recolhidos ao final do dia.

– Cálculo da produção de esterco:

Cada animal produz em média  $10 \text{ kg dia}^{-1}$  de esterco (Tabela 8.11). Logo, a massa de total diária de esterco produzida será:

$$m_{\text{esterco}} = 10 \text{ bovinos} \cdot 10 \text{ kg dia}^{-1} = 100 \text{ kg dia}^{-1}$$

Obs.: Para animais que pastejam durante o dia e são recolhidos ao final do dia somente 1/3 do esterco diário produzido é coletado:

$$m_{\text{esterco}} = \frac{1}{3} \cdot 100 \text{ kg dia}^{-1} = 33,33 \text{ kg dia}^{-1}$$

Tabela 8.11. Produção de esterco fresco diário.

Animal	Dejeto ( $\text{kg dia}^{-1}$ )	Biogás ( $m^3_{\text{biogás}} \text{ kg}^{-1}_{\text{esterco}}$ )	GLP ( $\text{kg}_{\text{GLP}} m^{-3}_{\text{biogás}}$ )
Suíno	2,5	0,075 a 0,089	0,413
Bovino de corte	10	0,040	0,450
Bovino de leite	10	0,040 a 0,049	0,502
Caprino/Ovino	0,5	0,040 a 0,061	0,580
Equino	10	0,048	0,450

– Cálculo da produção de biogás:

Com os coeficientes de conversão da [Tabela 8.11](#), tem-se que:

$$V_{biogás} = m_{esterco} \cdot 0,04 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} = 33,33 \text{ kg dia}^{-1} \cdot 0,04 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1} = 1,33 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$$

ou considerando a conversão para GLP

$$M_{GLP} = V_{biogás} \cdot 0,45 \text{ kg}_{GLP} \text{ m}^{-3}_{biogás} = 1,33 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} \cdot 0,45 \text{ kg}_{GLP} \text{ m}^{-3}_{biogás} = 0,60 \text{ kg}_{GLP} \text{ dia}^{-1}$$

– Cálculo do volume do biodigestor ( $V_b$ )

$$V_{biodigestor} = V_c \cdot t_{RH}$$

Sendo:  $V_{biodigestor}$  – volume do biodigestor ( $\text{m}^3$ );  $V_{carga}$  – volume de carga diária ( $\text{m}^3 \text{ dia}^{-1}$ );  
 $t_{RH}$  – tempo de retenção hidráulica no biodigestor (dias).

O volume de carga diária ( $V_c$ ) consiste no volume de estorno diluído em água que será inserido no biodigestor:

$$V_{carga} = V_{esterco} + V_{água}$$

Considerando que a massa específica do esterco  $\rho_{esterco} = 600 \text{ kg m}^{-3}$ , tem-se o seguinte volume de esterco:

$$\rho_{esterco} = \frac{m_{esterco}}{V_{esterco}} \rightarrow V_{esterco} = \frac{m_{esterco}}{\rho_{esterco}} = \frac{33,33 \text{ kg dia}^{-1}}{600 \text{ kg m}^{-3}} = 0,0556 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$$

Conforme [Tabela 8.12](#), para dejetos bovinos, a recomendação é que biomassa seja misturada na proporção de 1:1 com água. Assim:

$$V_{carga} = V_{esterco} + V_{\acute{a}gua} = 0,0556 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} + 0,0556 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} = 0,111 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$$

[Tabela 8.12](#). Relação esterco/água de alguns tipos de dejetos.

Tipo de dejetos	Relação esterco:água
Suíno	1:2
Bovino	1:1
Aves	1:3



Considerando o  $t_{RH} = 30$  dias, tem-se:

$$V_{biodigestor} = V_{carga} \cdot t_{RH} = 0,111 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1} \cdot 30 \text{ dias} = 3,33 \text{ m}^3$$

– Cálculo do diâmetro do tanque cilíndrico: foi adotada altura do tanque  $h = 1,5$  m

$$V_{biodigestor} = A_{base} \cdot h = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \quad \rightarrow \quad d = \sqrt{\frac{V_b \cdot 4}{\pi \cdot h}} = \sqrt{\frac{3,33 \cdot 4}{\pi \cdot 1,5}} = 1,68 \text{ m}$$

– Cálculo da caixa de entrada

As dimensões da caixa cilíndrica de entrada devem ser suficientes para suportar o volume de carga diária. Adotando a altura da caixa  $h = 0,5$  m, tem-se:

$$V_{c.carga} = A_{base} \cdot h = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \quad \rightarrow \quad d = \sqrt{\frac{V_c \cdot 4}{\pi \cdot h}} = \sqrt{\frac{0,111 \cdot 4}{\pi \cdot 0,5}} = 0,53 \text{ m}$$

A caixa de carga deverá ser construída com o piso a 20 centímetros de altura acima do nível da borda do tanque de fermentação.

Diferentemente do tanque de digestão e da caixa de carga, possuindo formato cilíndrico, a caixa de descarga tem formato retangular. Seu dimensionamento deve considerar, no mínimo, três vezes o volume da carga diária, para permitir o armazenamento do biofertilizante.

$$V_{c.descarga} \geq 3 \cdot V_{c.carga} = 3 \cdot 0,111 = 0,333 \text{ m}^3$$

$$V_{c.descarga} = L \cdot C \cdot H$$

Adotando-se altura de 0,5 m e largura de 0,6 m, tem o comprimento:

$$0,333 = 0,6 \cdot C \cdot 0,5 \quad \rightarrow \quad C = 1,11 \text{ m}$$

A borda da caixa de descarga deve ficar 20 cm de altura abaixo do nível da borda do tanque de fermentação. A caixa de descarga será dividida em dois compartimentos.

## 7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) **Atlas de energia elétrica do Brasil**. Brasília: ANEEL, 2002. 153p.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL) **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3º ed. Brasília: ANEEL, 2008. 236p.

ARAÚJO, A. R. A.; AQUINO, C. B.; MEDEIROS, D. A.; MOURA, H. R.; MILITAO, I. M. Dimensionamento de um biodigestor rural para o assentamento Trangola. **In: V Congresso brasileiro dos engenheiros sem fronteiras**. cbESF, 2018

BRASIL – Ministério das Minas e Energia **Balanço energético nacional: relatório final**. Empresa de Pesquisa Energética, 2017.

COELHO, S. T.; MONTEIRO, M. B.; KARNIOL, M. R.; GHILARDI, A. **Atlas de Bioenergia do Brasil**. São Paulo: Projeto Fortalecimento Institucional do CENBIO/MME, 2008.

GOLDEMBERG, J. Atualidade e perspectivas no uso de biomassa para geração de energia. **Revista Atual de Química**, v. 9, n. 1, p. 15-28, 2017.

SALOMOM, K. R.; TIAGO FILHO, G. L. **Biomassa**. Itajubá: FAPEPE, 2007, 36p. (Série Energias Renováveis).

**FIM**