



Programa de Pós-Graduação em Energia - PPGE

Instituto de Energia e Ambiente - IEE

Universidade de São Paulo - USP

Prof. Célio Bermann

# **PEN 5733: Fundamentos Ambientais dos Processos Energéticos**

## **4ª aula - A POLUIÇÃO DA BIOSFERA**

- . problemas ambientais: a acidificação
- . lixo doméstico e industrial
- . recuperação energética dos RSU

# Energia: principais problemas ambientais:

## ▶ Mudanças climáticas – Aquecimento global – Efeito-Estufa

- Emissão de CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) dos combustíveis fósseis
  - Petróleo
  - Carvão mineral
  - Gás natural

## ▶ Saúde pública – Ozônio troposférico

- Emissão de HC (hidrocarbonetos) e NO<sub>x</sub> (óxidos nitrosos) – formação do Ozônio troposférico (baixa altitude) – poluição atmosférica nas regiões metropolitanas (São Paulo; S.J.Campos; Campinas)

## ▶ Acidificação

- Através da emissão de CO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub> e SO<sub>x</sub> (óxidos + H<sub>2</sub>O) comprometendo a atmosfera, as águas e os solos

## ► Acidificação

- Através da emissão de COx, NOx e SOx (óxidos + H<sub>2</sub>O) comprometendo a atmosfera, as águas e os solos



- Precipitações Ácidas

Formam-se ácidos a partir dos óxidos

- CO<sub>x</sub> carbônico

- NO<sub>x</sub> nitroso, nítrico + umidade atmosférica  
(H<sub>2</sub>O)

- SO<sub>x</sub> sulfuroso, sulfúrico

Origem: 50 % natural

50 % atividades antropogênicas  
(termelétricas e refinarias)

pH: concentração de íons de Hidrogênio (H<sup>+</sup>)

escala logarítmica: 14 → alcalino (básico)

7 → neutro

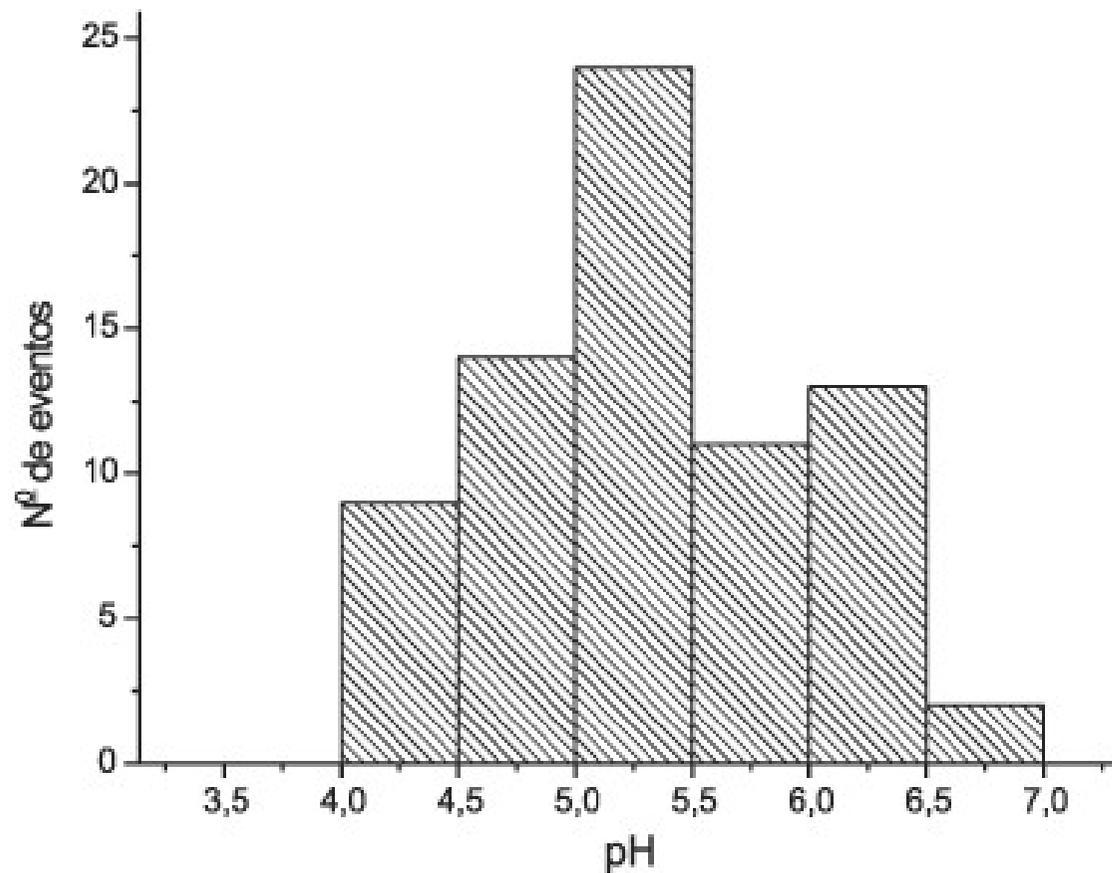
0 → ácido

Alguns valores comuns de pH

Substância	pH
Acido de bateria	<1.0
Suco gástrico	2.0
Sumo de limão	2.4
Cola (refrigerante)	2.5
Vinagre	2.9
Sumo de laranja ou maçã	3.5
Cerveja	4.5
Café	5.0
Chá	5.5
Chuva ácida	< 5.6
Saliva pacientes com cancro	4.5-5.7
Leite	6.5
Água pura	7.0
Saliva humana	6.5-7.4
Sangue	7.34 - 7.45
Água do mar	8.0
Sabonete de mão	9.0-10.0
Amónia caseira	11.5
Cloro	12.5
Hidróxido de sódio caseiro	13.5

## **GASES RESPONSÁVEIS PELA CHUVA ÁCIDA E SUAS ORIGENS**

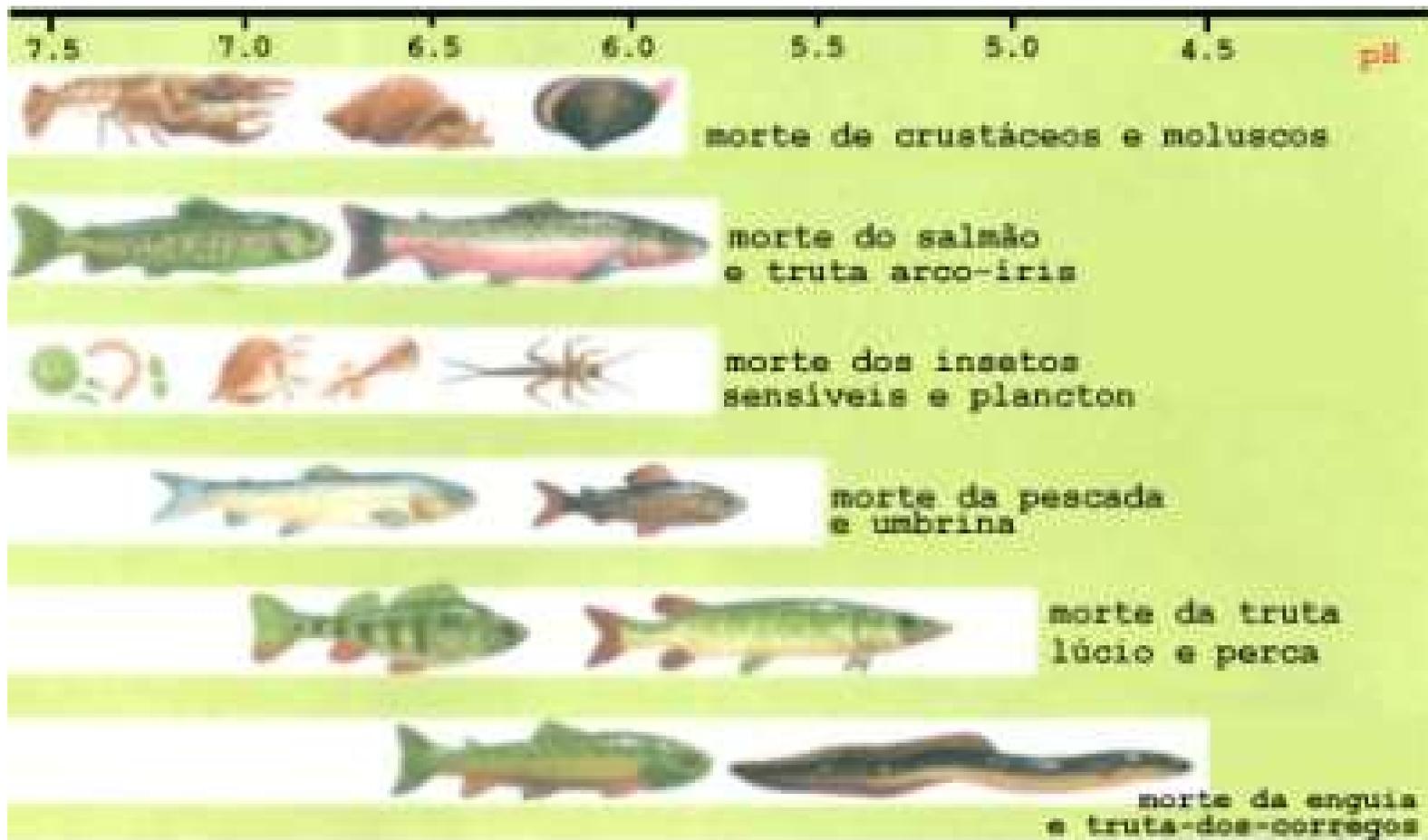
<b>Dióxido de Enxofre</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- fabricação de fertilizantes</li><li>- aquecimento de minérios do grupo de sulfatos</li><li>- fabricação de celulose e ácido sulfúrico</li><li>- combustão do carvão e derivados de petróleo, em veículos, usinas termelétricas, indústrias, altos-fornos, etc.</li></ul>
<b>Óxidos de nitrogênio</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- combustão do carvão vegetal</li><li>- combustão dos derivados de petróleo (especialmente em veículos)</li><li>- indústrias de ácido nítrico e ácido sulfúrico</li><li>- fumaça de cigarros</li></ul>
<b>Ácido fluorídrico</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- fundições de metais pesados e de alumínio</li><li>- indústrias de fertilizantes</li><li>- indústrias de vidro, esmalte e porcelana</li></ul>
<b>Ácido clorídrico</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- indústrias de fertilizantes</li><li>- indústrias eletroquímicas</li><li>- processos de esmaltação da porcelana</li><li>- combustão de materiais contendo cloro</li></ul>



*Figura 2. Histograma dos valores de pH de 73 amostras de águas de chuva, coletadas durante o período de Junho de 1999 a Junho de 2000, na região da Termelétrica de Figueira, Paraná*

**Fonte:** Marlene Fluesl; Patrícia Hamal; Adalgiza Fornaroll. **Avaliação do nível da vulnerabilidade do solo devido à presença de termelétrica a carvão (Figueira, PR- Brasil).** Revista Química Nova, vol.26 no.4, São Paulo, July/Aug. 2003.

## Efeitos da acidificação na cadeia trófica



Fonte: Laboratório de Hidrologia da Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP

# Efeitos da acidificação em obras artísticas





Profeta Jeremias por Aleijadinho



# 1. Modelos de Dispersão

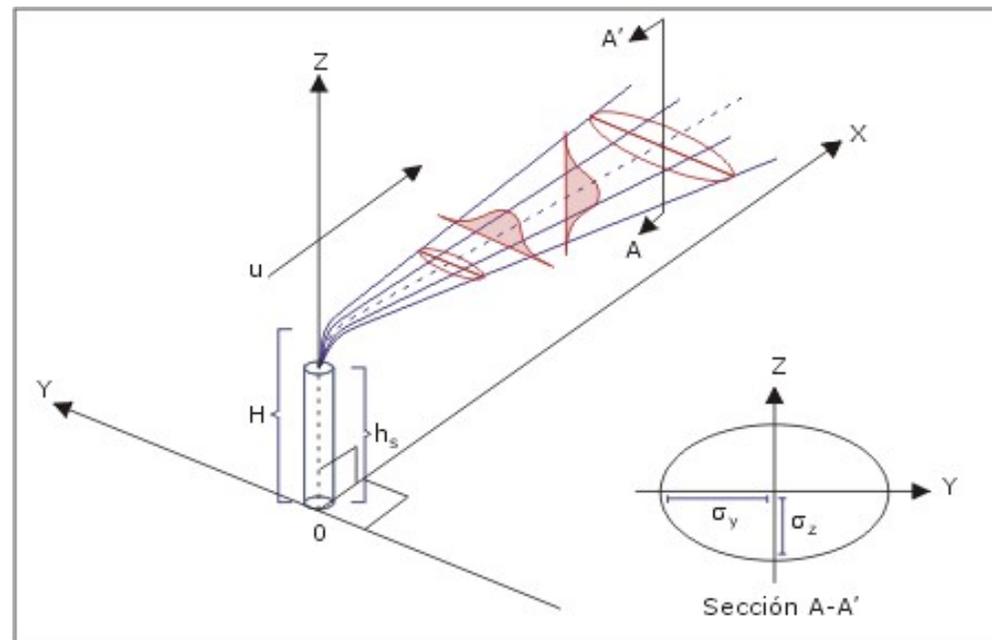
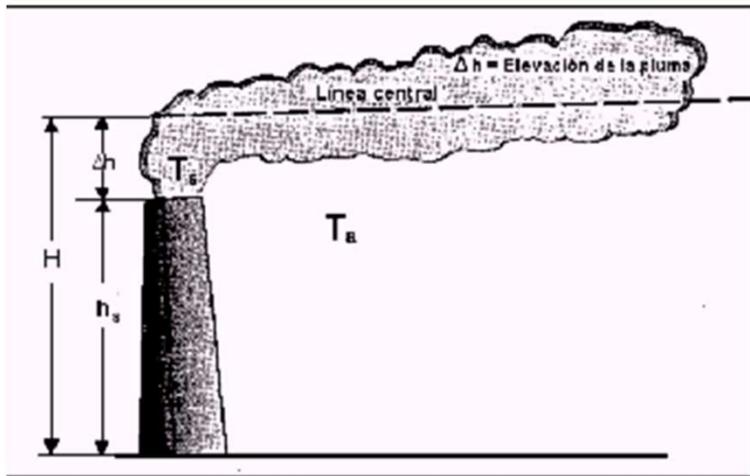
- Emissão (t/h; t/dia; t/ano)
- Altura da chaminé
- Condições atmosféricas: Direção dos ventos  
Temperatura  
Umidade relativa

## Ecuación de distribución gausiana

$$x = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2} \left\{ e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H}{\sigma_z}\right)^2} + e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H}{\sigma_z}\right)^2} \right\}$$

Donde:

- $x$  = concentración del contaminante en el nivel del suelo (g/m<sup>3</sup>)
- $Q$  = masa emitida por unidad de tiempo
- $\sigma_y$  = desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección y (horizontal)
- $\sigma_z$  = desviación estándar de la concentración de contaminantes en dirección z (vertical)
- $u$  = velocidad del viento
- $y$  = distancia en dirección horizontal
- $z$  = distancia en dirección vertical
- $H$  = altura efectiva de la chimenea



Representación esquemática de la pluma gausiana (Fonte: Turner, 1970)



## 2. Acidez diretamente proporcional à quantidade de emissões (NIAR, Oslo, Noruega)

- padrão para avaliação:  $> 12 \text{ t SO}_2 / \text{km}^2 / \text{ano}$

Quadrícula de 150 por 150 km, área de 22.500 km<sup>2</sup>

RMSP	120.000 t SO <sub>2</sub> / ano
Campinas	80.000 t SO <sub>2</sub> / ano
São José dos Campos	50.000 t SO <sub>2</sub> / ano
Cubatão	<u>50.000 t SO<sub>2</sub> / ano</u>
	300.000 t SO <sub>2</sub> / ano

resultam em  $13,3 \text{ t SO}_2 / \text{km}^2 / \text{ano}$

**Tabela 1 - Padrões Nacionais de Qualidade do Ar e Critérios para Episódios Críticos de Poluição do Ar**

Poluente	Tempo de amostragem	Padrão Primário ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Padrão Secundário ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Atenção ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Alerta ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Emergência ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
PTS	24h*	240 80 <sup>2</sup>	150 60 <sup>2</sup>	375	625	875
SO <sub>2</sub>	24h*	365 80 <sup>1</sup>	100 40 <sup>1</sup>	800	1.600	2.100
O <sub>3</sub>	1h*	160	160	400 200**	800	1.000
FMC	24h*	150 60 <sup>1</sup>	100 40 <sup>1</sup>	250	420	500
MP <sub>10</sub>	24h*	150 50 <sup>1</sup>	150 50 <sup>1</sup>	250	420	500
NO <sub>2</sub>	1h	320 100 <sup>1</sup>	190 100 <sup>1</sup>	1130	2260	3000
CO	1h*	40.000 (35 ppm)	40.000 (35 ppm)			
	8h*	10.000 (9ppm)	10.000 (9ppm)	17.000 (15ppm)	34.000 (30ppm)	46.000 (40ppm)

1 - Média aritmética anual

2 - Média geométrica anual

\*O padrão não deve ser excedido mais que uma vez ao ano

\*\*Limite para o Estado de São Paulo, que possui legislação mais restritiva.

**FMC - Fumaça**

**PTS - Partículas totais em suspensão**

**MP<sub>2,5</sub> - Partículas inaláveis finas (diâmetro < 2,5  $\mu\text{m}$ )**

**SO<sub>2</sub> - Dióxido de enxofre**

**MP<sub>10</sub> - Partículas inaláveis (diâmetro < 10  $\mu\text{m}$ )**

**O<sub>3</sub> - ozônio**

**NO<sub>2</sub> - dióxido de nitrogênio**

**CO - monóxido de carbono**

# Padrões de Qualidade do Ar adotados pela EPA-Agência de Proteção Ambiental dos EUA

POLUENTE	TEMPO DE AMOSTRAGEM	PADRAO (UG/M3)	MÉTODO DE MEDIÇÃO
Partículas Totais em Suspensão	24 horas (1)	260	Amostrador de Grandes Volumes
	MGA (2)	75	
Dióxido de Enxofre	24 horas (1)	365	Pararosanilina
	MAA (3)	80	
Monóxido de Carbono	1 hora (1)	40.000 (35 ppm)	Infra-vermelho não Dispersivo
	8 horas (1)	10.000 (9 ppm)	
Ozona	1 hora (1)	235 (0,12 ppm)	Quimioluminescência
Hidrocarbonetos (menos metano)	3 horas (6h às 9h)	160 (0,24 ppmC)	Cromatografia Gasosa/ Ionização de Chama
Dióxido de Nitrogênio	MAA (3)	100	Quimioluminescência
Chumbo	90 dias	1.5	Absorção Atômica
Partículas Totais em Suspensão	1 hora	-	Amostrador de Grandes Volumes
	24 horas	150-230	
	MAA (3)	60-90	
Dióxido de Enxofre	1 hora	-	Pararosanilina
	24 horas	100-150	
	MAA (3)	40-60	
Fumaça	1 hora	-	Infra-vermelho não Dispersivo
	24 horas	100-150	
	MAA (3)	40-60	
Ozona	1 hora	100-200	Quimioluminescência
	24 horas	-	
	MAA (3)	-	
Dióxido de Nitrogênio	1 hora	190-320	Quimioluminescência
	24 horas	-	
	MAA (3)	-	

FONTE: Relatório sobre "Qualidade do ar da Região Metropolitana de São Paulo e em Cubatão - 1985", publicado pela CETESB em 1988.

OBSERVAÇÕES: (1) Não deve ser excedido mais que uma vez ao ano  
 (2) Média Geométrica Anual  
 (3) Média Aritmética Anual

# Resíduos Urbanos: Definição

“Restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis, podendo-se apresentar no estado sólido, semi-sólido ou líquido, desde que não seja passível de tratamento convencional”

# SANEAMENTO BÁSICO NO BRASIL

Segundo estudo do IBGE publicado em 2000, no ano de 1989 apenas 47,3% dos municípios brasileiros dispunham de esgotamento sanitário. Onze anos mais tarde (2011), a situação não melhorou muito: 52,2% dispondendo desses serviços. Em geral, quanto maior a população do município, maior a proporção de domicílios atendidos. As diferenças regionais são marcantes: apenas 7,1% dos municípios da região Sudeste não dispõem desse serviço, diante de 92,9% dos municípios da região Norte.

Se a cobertura do serviço é reduzida e o tratamento pouco abrangente, a situação se agrava quanto à destinação final. Dos municípios que dispõem de esgotamento, um terço tratam esse efluente, ao passo que a maioria (dois-terços) despejam o material in natura no meio ambiente - geralmente em rios - provocando impactos ambientais negativos já bem conhecidos.

Ainda segundo o IBGE, o volume total de esgotos no Brasil atinge 14,5 milhões de m<sup>3</sup>/dia, o que resulta em 5,2 bilhões de m<sup>3</sup>/ano.

2019 (IBGE): 68,3% dos municípios no Brasil dispõem de esgotamento sanitário.

# Resíduos Sólidos

## Classificação quanto aos riscos

- Classe I (Perigosos): apresentam riscos à saúde pública quando manuseados de forma inadequada (em função de suas características intrínsecas de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade).
- Classe II (Não Inertes): podem apresentar características de combustibilidade, biodegradabilidade ou solubilidade com possibilidade de acarretar riscos à saúde ou ao meio ambiente.
- Classe III (Inertes): não oferecem riscos à saúde e ao meio ambiente.

# Resíduos Sólidos

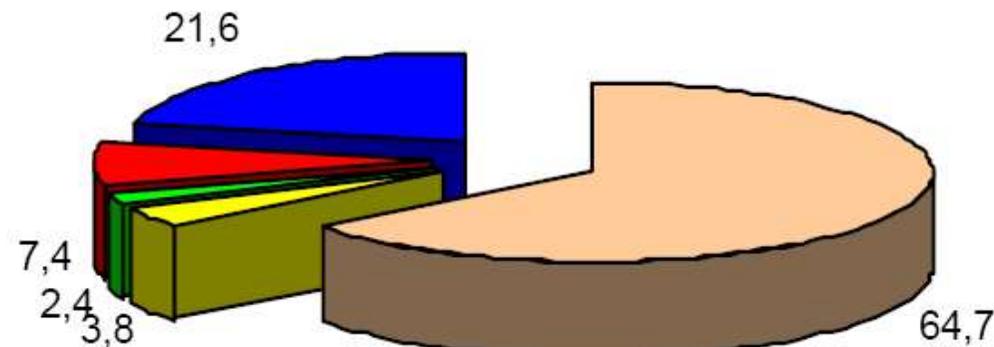
## Classificação quanto à natureza

- Lixo doméstico ou residencial
- Lixo comercial
- Lixo público
- Lixo domiciliar especial (Entulho de obras, pilhas e baterias, lâmpadas fluorescentes, pneus, etc...)
- Lixo de fontes especiais (Lixo industrial, lixo radioativo, lixo de portos, aeroportos e terminais ferroviários, lixo agrícola e resíduos de serviços de saúde)

# Resíduos Sólidos:

## Geração de resíduos

- Características Físicas:
- Composição gravimétrica no Brasil



■ MATÉRIA ORGÂNICA ■ METAL ■ VIDRO ■ PLÁSTICO ■ PAPEL

# Resíduos Sólidos:

## Geração de resíduos

- Características Físicas:

- Composição gravimétrica no Mundo

Composição gravimétrica do lixo de alguns países (%)				
COMPOSTO	BRASIL	ALEMANHA	HOLANDA	EUA
Mat. orgânica	65,00	61,20	50,30	35,60
Vidro	3,00	10,40	14,50	8,20
Metal	4,00	3,80	6,70	8,70
Plástico	3,00	5,80	6,00	6,50
Papel	25,00	18,80	22,50	41,00

Fonte: ALEXANDRA, Iana – Saneamento Ambiental – Resíduos Sólidos, s/d. Disponível em: <http://www.hidro.ufcg.edu.br/twiki/pub/Disciplinas/SaneamentoB%E1sico/ResiduosSolidos.ppt>

**Tabela 4 - Composição gravimétrica (%) do lixo.**

<b>Componentes</b>	<b>1927</b>	<b>1957</b>	<b>1969</b>	<b>1976</b>	<b>1991</b>
<b>Matéria orgânica</b>	<b>82,50</b>	<b>76,00</b>	<b>52,20</b>	<b>62,70</b>	<b>60,60</b>
<b>Papel/papelão/jornal</b>	<b>13,40</b>	<b>16,70</b>	<b>29,20</b>	<b>21,40</b>	<b>13,87</b>
<b>Plástico duro/filme</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1,90</b>	<b>5,00</b>	<b>11,47</b>
<b>Metal ferroso</b>	<b>1,70</b>	<b>2,23</b>	<b>7,80</b>	<b>3,90</b>	<b>2,83</b>
<b>Metal não ferroso</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,10</b>	<b>0,69</b>
<b>Trapos/couro/borracha</b>	<b>1,50</b>	<b>2,70</b>	<b>3,80</b>	<b>2,90</b>	<b>4,39</b>
<b>Vidros</b>	<b>0,90</b>	<b>1,40</b>	<b>2,60</b>	<b>1,70</b>	<b>1,69</b>
<b>Terra/pedras</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>0,70</b>	<b>0,77</b>
<b>Madeiras</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>2,40</b>	<b>1,60</b>	<b>0,75</b>
<b>Diversos</b>	<b>-</b>	<b>0,10</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>
<b>Pedras</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>1,71</b>
<b>Peso Específico (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>500</b>	<b>300</b>	<b>230</b>	<b>-</b>	<b>234</b>

Fonte: Diário Oficial, n. 288, 1992, p. 12.

### COMPOSIÇÃO MÉDIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS BRASIL

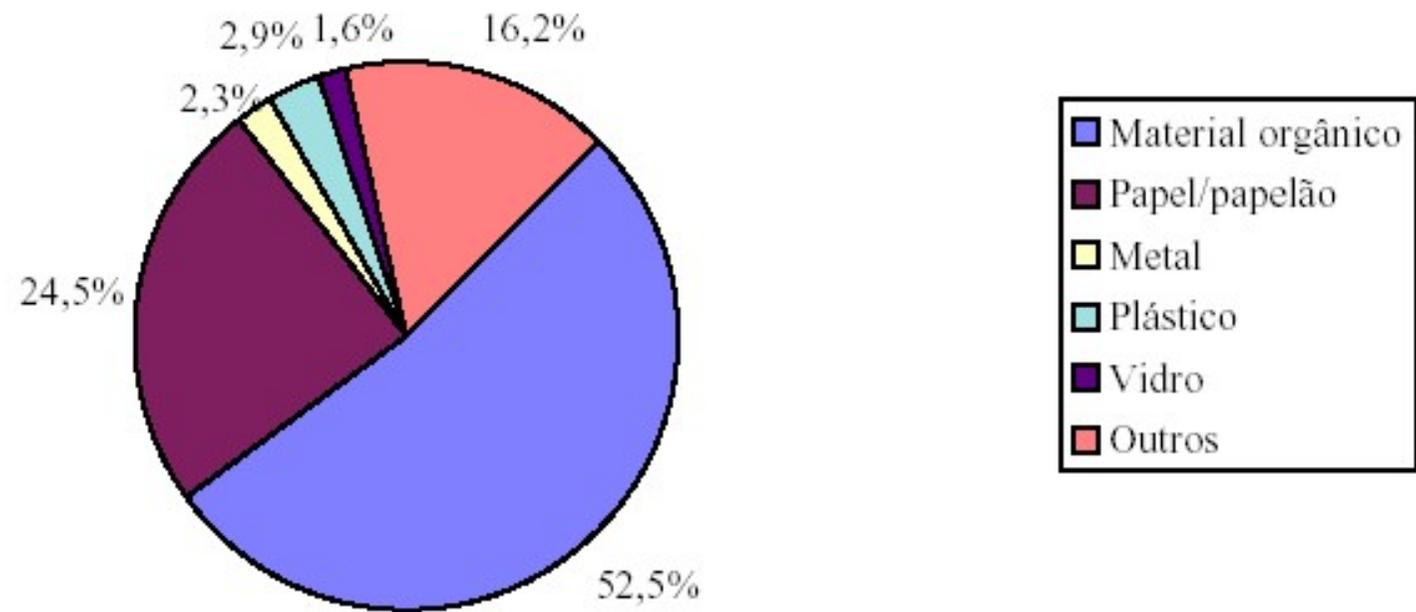


Figura 3. Composição física média dos RSU no Brasil. (IPT,2000).

Tabela 1494 - Composição gravimétrica do lixo no Município do Rio de Janeiro - 1995 - 2007.

Componentes (%)	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
<b>Recicláveis</b>	45,23	44,07	43,23	45,43	47,39	43,26	43,96	41,1	40,14	32,85	33,74	33,84	36,27
Papel - Papelão(1)	24,05	22,26	21,08	22,22	21,85	19,77	18,71	18,78	16,06	12,48	13,51	14,83	14,61
Plástico (2)	15,07	15,09	16,11	16,78	19,9	17,61	19,77	17,61	19,17	15,44	15,34	14,69	17,17
Vidro(3)	2,62	3,63	3,22	3,68	3,48	3,22	3,52	2,74	2,99	3,23	3,24	2,71	2,90
Metal (4)	3,49	3,09	2,82	2,75	2,16	2,66	1,96	1,97	1,92	1,7	1,65	1,61	1,59
<b>Matéria Orgânica (5)</b>	45,43	48,8	49,09	48,51	50,05	51,27	51,65	55,96	53,05	59,72	60,74	61,35	58,13
<b>Rejeitos</b>	9,34	7,13	7,68	6,08	2,56	5,47	4,39	2,94	6,82	7,42	5,52	4,82	5,61
Inerte total (6)	0,44	0,97	1,53	0,89	0,63	0,94	0,72	0,35	1,46	1,37	0,86	0,75	0,73
Folha / flores	4,81	2,46	3,04	1,97	0,72	1,91	1,5	0,6	2,34	2,12	1,06	1,30	1,75
Madeira	0,96	0,53	0,76	0,68	0,18	0,44	0,44	0,38	0,66	0,66	0,34	0,33	0,38
Borracha	0,17	0,18	0,24	0,33	0,11	0,3	0,29	0,18	0,25	0,22	0,24	0,32	0,21
Pano - Trapo	2,43	2,5	1,71	1,9	0,79	1,61	1,28	1,21	1,83	1,51	1,58	1,61	1,75
Couro	0,26	0,16	0,27	0,21	0,1	0,18	0,1	0,15	0,26	0,27	0,22	0,07	0,21
Osso	0,27	0,33	0,13	0,08	0,03	0,09	0,06	0,07	0,01	0	0,04	0,02	0,00
Coco	...	...	...	...	...	...	...	...	...	1,27	1,17	0,41	0,58
Vela / parafina	...	...	...	...	...	...	...	...	...	0,01	0,01	0,01	0,01
Total (%)	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Peso Específico (kg/m³)	203,58	194,79	163,98	168,15	186,1	198,47	169,02	150,81	154,44	153,6	148,35	144,93	144,54
Teor de Umidade (%)	64,54	70,2	67,02	63,67	63,1	62,91	60,89	63,74	72,49	76,55	50,45	56,86	65,22
Peso da amostra (kg)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	16625,80	17144,54

Fonte: PCRJ, Companhia Municipal de Limpeza Urbana – COMLURB.

(1) - papel, papelão e tetra pack

(2) plástico duro, PET, filme

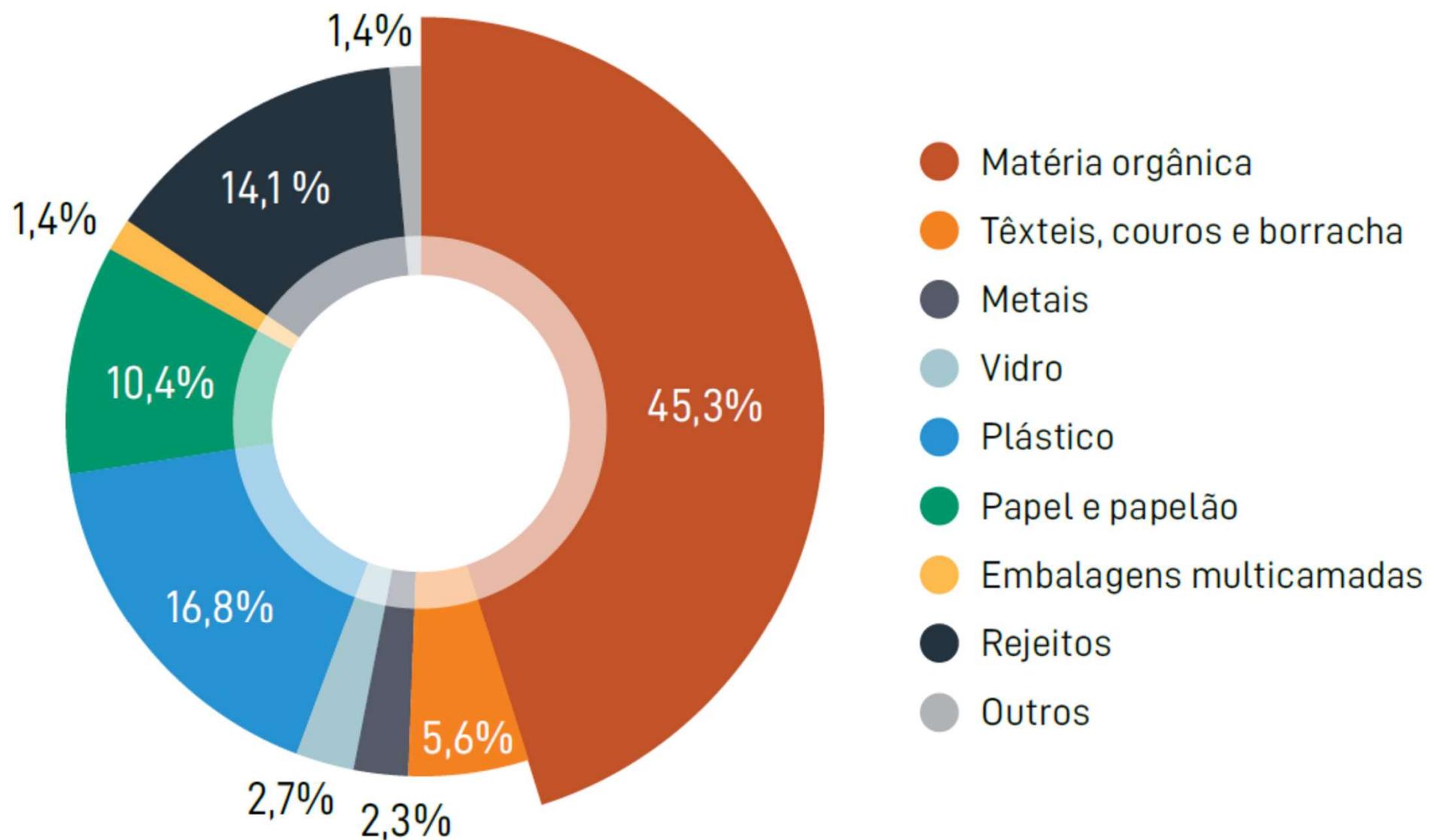
(3) vidro caro e escuro

(4) - metal ferroso e não ferroso

(5) matéria orgânica putrescível e agregado fino

(6) - pedra, areia, louça e cerâmica

GRÁFICO 26. GRAVIMETRIA DOS RSU NO BRASIL



Conforme dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) em 2020, a quantidade de RSU coletado no Brasil foi de 199.311 ton/dia, contra um total de 216.629 ton/dia gerados - o que indica uma boa eficiência global de coleta (92%). Contudo, a destinação muitas vezes é inadequada, em especial nos municípios menores, onde predominam os lixões.

*Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS*

## **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2006**

### **Parte 1 – Texto Visão Geral da Prestação de Serviços**

Faixa 1 – até 30.000 habitantes

Faixa 2 – de 30.001 até 100.000 habitantes

Faixa 3 – de 100.001 a 250.000 habitantes

Faixa 4 – de 250.001 a 1.000.000 habitantes

Faixa 5 – de 1.000.001 a 3.000.000 habitantes

Faixa 6 – mais de 3.000.000 de habitantes

### QUADRO 3.3

Média dos percentuais de população urbana atendida com coleta de RDO, por tipo de freqüência da coleta, segundo porte dos municípios Brasil, municípios selecionados, 2006

Faixa populacional	Quantidade de municípios (municípios)	População urbana atendida * (Co014) (habitantes)	Freqüência da coleta de RDO		
			Diária (Co134) (%)	2 ou 3 vezes na semana (Co135) (%)	1 vez na semana (Co136) (%)
1	68	894.644	47,4	42,5	10,1
2	49	2.160.118	44,5	48,4	7,1
3	60	8.857.631	36,4	59,6	3,9
4	56	24.290.525	27,7	68,0	4,3
5	12	20.701.747	39,7	60,2	0,2
6	2	16.497.621	7,0	93,0	0,0
Total	247	73.402.286	33,9	61,8	4,3

Fonte SNIS

(\*) Municípios em que a população atendida foi informada como sendo superior à população urbana existente, adotou-se o valor desta última.

Nota: RDO: Resíduos Sólidos Domiciliares

### QUADRO 3.8

Massa coletada (RDO+RPU) *per capita* em relação à população urbana, segundo porte dos municípios  
Brasil, municípios selecionados, 2006

Faixa populacional	Quantidade de municípios (municípios)	Massa coletada <i>per capita</i> (l <sub>021</sub> )		
		Mínima Kg/hab./dia	Máxima Kg/hab./dia	Média Kg/hab./dia
1	54	0,24	2,98	0,83
2	39	0,43	2,04	0,74
3	50	0,38	2,89	0,92
4	48	0,39	1,68	0,82
5	12	0,55	1,66	0,95
6	2	0,96	1,25	1,07
Total	205	0,24	2,98	0,93

Fonte SNIS

Nota: RDO: Resíduos Sólidos Domiciliares  
RPU: Resíduos Sólidos Públicos

QUADRO 3.32

Massa de materiais recicláveis recuperados (exceto matéria orgânica e rejeitos), por tipo de material, segundo porte dos municípios

Brasil, municípios selecionados, 2006

Faixa populacional	Quantidades de municípios (municípios)	Quantidades de materiais recuperados					
		Papéis e papelões (Cs010) (t/ano)	Plásticos (Cs011) (t/ano)	Metais (Cs012) (t/ano)	Vidros (Cs013) (t/ano)	Outros materiais (Cs014) (t/ano)	Totais (Cs009) (t/ano)
1	19	1.544	804	645	342	229	3.564
2	17	3.000	2.525	1.837	1.417	1.321	10.100
3	20	11.377	7.507	8.601	2.654	3.800	33.938
4	33	17.864	12.962	4.964	3.261	2.712	41.763
5	8	25.390	12.689	5.928	4.794	2.292	51.092
6	2	8.844	5.935	1.503	2.566	255	19.103
Total	99	68.018 44,3%	42.421 27,6%	23.477 15,3%	15.034 9,8%	4.524 2,9%	153.474 100,0%

Fonte SNIS

QUADRO 3.34

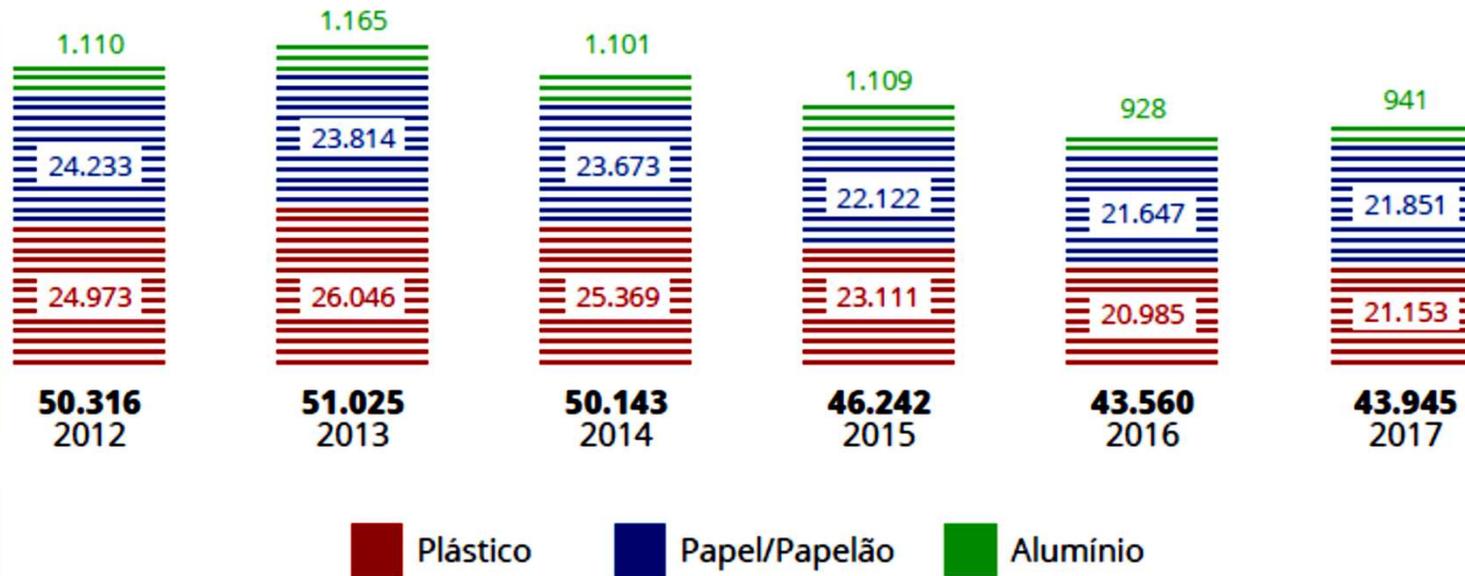
Incidências de materiais recicláveis recuperados, por tipo de material,  
segundo porte dos municípios

Brasil, municípios selecionados, 2006

Faixa populacional	Quantidades de municípios (municípios)	Incidência de recicláveis recuperados				
		Papéis e papelões (I <sub>034</sub> ) (%)	Plásticos (I <sub>035</sub> ) (%)	Metais (I <sub>038</sub> ) (%)	Vidros (I <sub>039</sub> ) (%)	Outros materiais (I <sub>040</sub> ) (%)
1	19	37,5	23,9	17,6	10,2	10,8
2	17	38,5	25,3	14,7	11,8	9,7
3	20	44,9	24,6	15,4	6,9	8,2
4	33	50,5	24,2	11,6	9,1	4,6
5	8	52,6	23,4	9,6	11,3	3,2
6	2	40,3	36,1	9,3	10,9	3,5

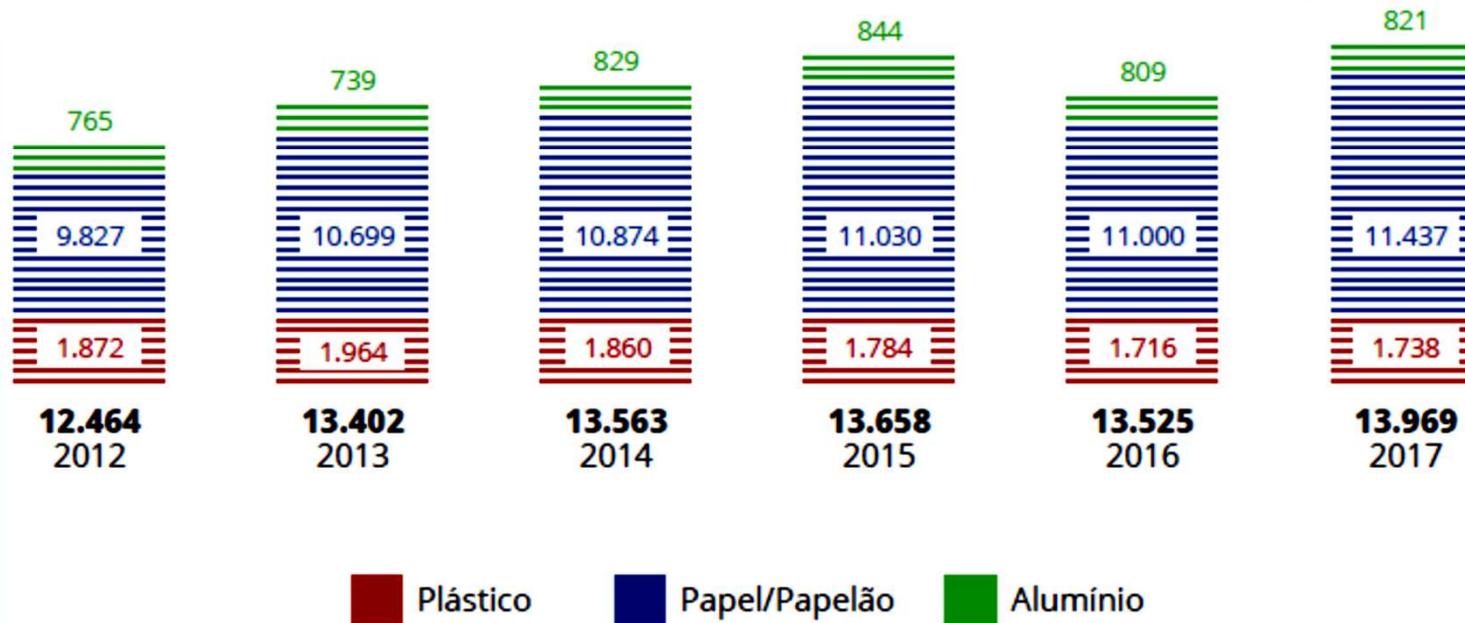
Fonte SNIS

GRÁFICO 4. RESÍDUOS RECICLÁVEIS GERADOS, 2012 - 2017 (T/DIA)



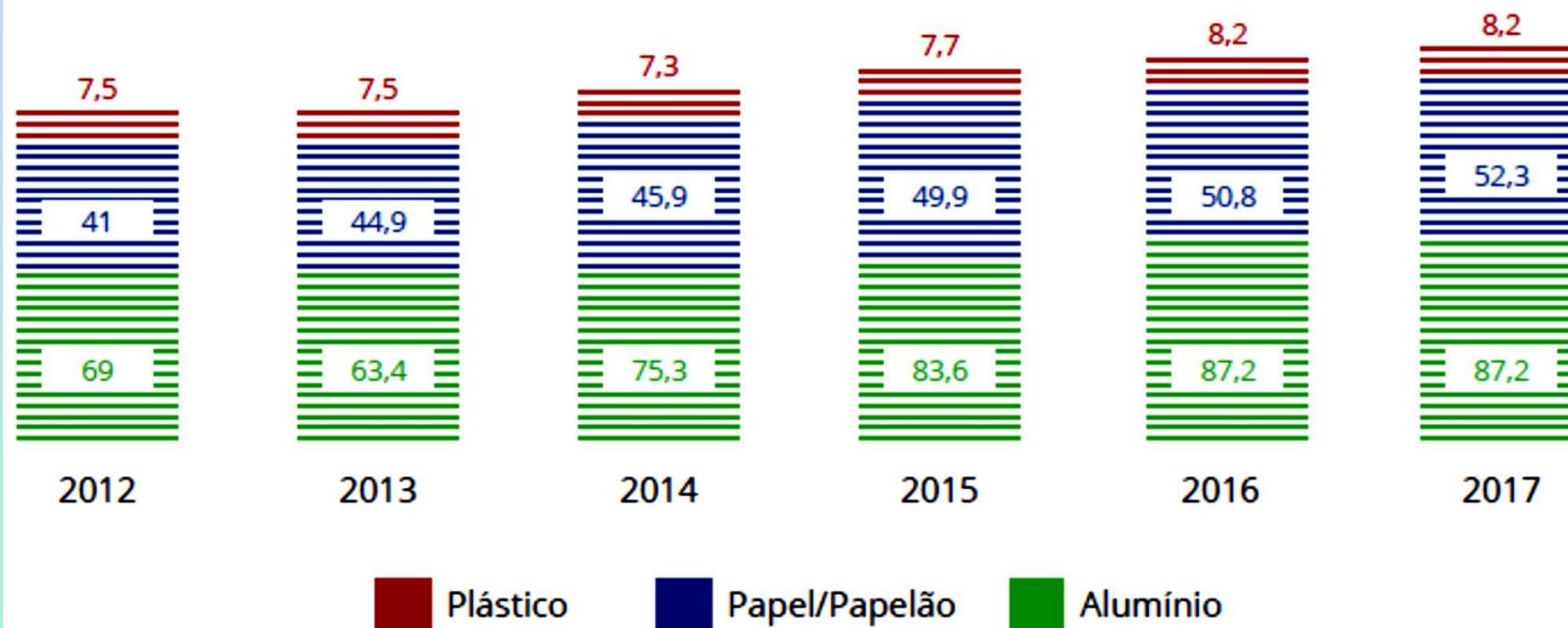
Fonte: SNIS (2012) e Associações. Elaboração: LCA Consultores.

GRÁFICO 5. RESÍDUOS RECICLÁVEIS RECUPERADOS, 2012 - 2017 (T/DIA)



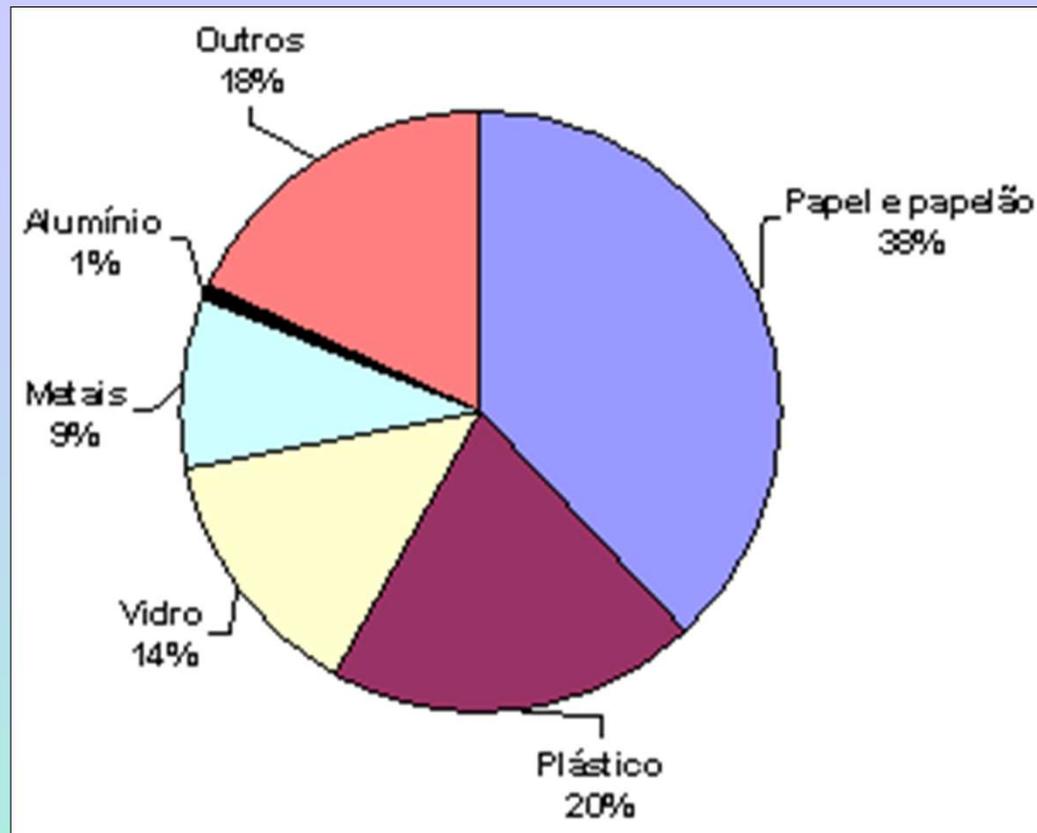
Fonte: Associações. Elaboração: LCA Consultores.

GRÁFICO 6. ÍNDICE DE RECUPERAÇÃO DOS RESÍDUOS RECICLÁVEIS, 2012 - 2017 (%)



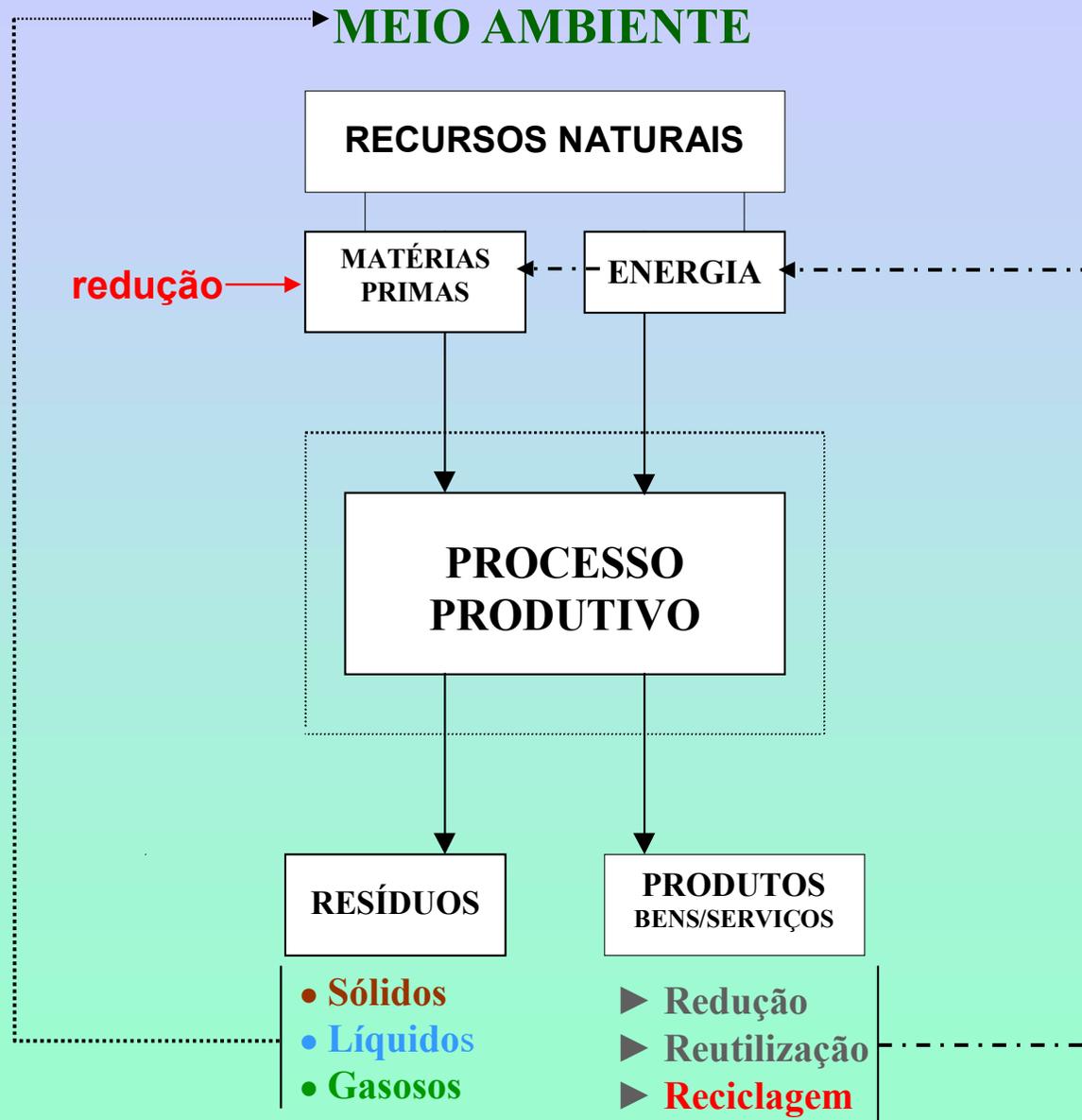
Fonte: ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017, 2018

## Brasil: Composição da coleta seletiva (em peso)



Fonte: CEMPRE, 2005.

Latas de alumínio	96%
Baterias chumbo-ácido (automotivas)	80%
Papel ondulado (caixas para transporte de produtos)	77%
Pneus	58%
Papel de escritório	50%
Vidro	46%
Latas de aço	29%
Óleo lubrificante usado	27%
Plásticos	20%
Material orgânico (compostado)	3%



# Cálculo da Energia Conservada com a Reciclagem

Indicadores de Energia Total Economizada por Reciclável (MJ/kg)

<b>Energia Total Conservada [MJ/kg]</b>	<b>Brasil</b>	<b>Canadá</b>		<b>Austrália</b>	<b>Estados Unidos</b>	
	<i>Calderoni (1996)</i>	<i>Morris min (1996)</i>	<i>Morris max (1996)</i>	<i>Warnken ISE (2007)</i>	<i>EPA min (2008)</i>	<i>EPA max (2008)</i>
<i>Papeis</i>	35,70	18,46	29,86	13,70	9,32	21,08
<i>Plástico</i>	51,65	59,53	87,48	60,20	55,78	55,78
<i>Vidro</i>	6,18	0,51	3,81	12,40	1,84	1,84
<i>Metais (alumínio e ferrosos)</i>	54,11	13,45	37,80	35,23	30,51	30,51

Indicadores de Energia Elétrica Economizada por Reciclável (kWh/kg)

<b>Eletricidade Economizada [kWh/kg] – 35% de eficiência</b>	<b>Brasil</b>	<b>Canadá</b>		<b>Austrália</b>	<b>Estados Unidos</b>	
	<i>Calderoni (1991)</i>	<i>Morris min (1996)</i>	<i>Morris max (1996)</i>	<i>Warnken ISE (2007)</i>	<i>EPA min (2008)</i>	<i>EPA max (2008)</i>
<i>Papeis</i>	0,715	0,370	0,598	0,274	0,187	0,422
<i>Plástico</i>	0,969	1,117	1,641	1,130	1,047	1,047
<i>Vidro</i>	0,111	0,009	0,069	0,223	0,033	0,033
<i>Metais (alumínio e ferrosos)</i>	1,052	0,264	1,611	0,657	1,122	1,122

Fonte: EPE. Inventário Energético de Resíduos Sólidos Urbanos. Nota Técnica DEA 18/14. Série Recursos Energéticos. Rio de Janeiro, outubro/2014.

# COLETA SELETIVA E RECICLAGEM NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO



Foto: BERMANN, C., 18/07/2014

# COLETA SELETIVA E RECICLAGEM NO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO



Foto: BERMANN, C., 18/07/2014







**Tabela 8 - Destinação dos resíduos sólidos urbanos em 1991 segundo sua origem.**

Unidade: 1.000 t / ano

DESTINO DO LIXO	LIXO COLETADO					PARTICULAR	TOTAL	91 (%)	93 (%)
	Domiciliar	Varrição	Resíduos de Saúde		Diversos				
			Hospitalar	Farm/Veter					
<b>INCINERADORES</b>									
Vergueiro	4,711	-	28,319	2,377	-	6,382	41,789	1,3	1,7
Ponte Pequena	215,002	0,987	6,425	0,410	0,623	0,805	224,252		
<b>TRANSBORDOS</b>									
Itaquera	226,559	10,686	-	-	0,006	-	237,250		
Vergueiro	1,239	-	-	-	0,308	-	1,547		
Ponte Pequena	281,736	0,704	3,911	0,304	0,483	4,027	291,165		
<b>USINAS DE COMPOSTAGEM</b>									
Vila Leopoldina	159,325	0,026	-	-	-	0,043	159,393	6,5	8,3
São Mateus	118,619	-	-	-	0,002	-	118,621		
<b>CENTRO DE RECICLAGEM</b>									
Pinheiros	1,681	-	-	-	-	0,277	1,958	3,1	0,1
<b>ATERROS SANITÁRIOS</b>									
Santo Amaro	638,567	64,521	-	-	27,638	271,067	1.001,792	89,1	89,9
Albertina	602,105	111,023	-	-	26,210	78,495	817,833		
Bandeirantes	215,741	61,688	-	-	26,254	505,907	809,591		
Inertes de Itatinga	-	-	-	-	65,911	338,796	404,707		
<b>MATERIAL INERTE</b>									
	-	32,811	-	-	96,244	-	129,055		
<b>TOTAL</b>	<b>2.465,283</b>	<b>282,445</b>	<b>38,654</b>	<b>3,092</b>	<b>243,679</b>	<b>1.205,799</b>	<b>4.238,953</b>		

Fonte: Diário Oficial, n. 288, 1992, p. 13.

# DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

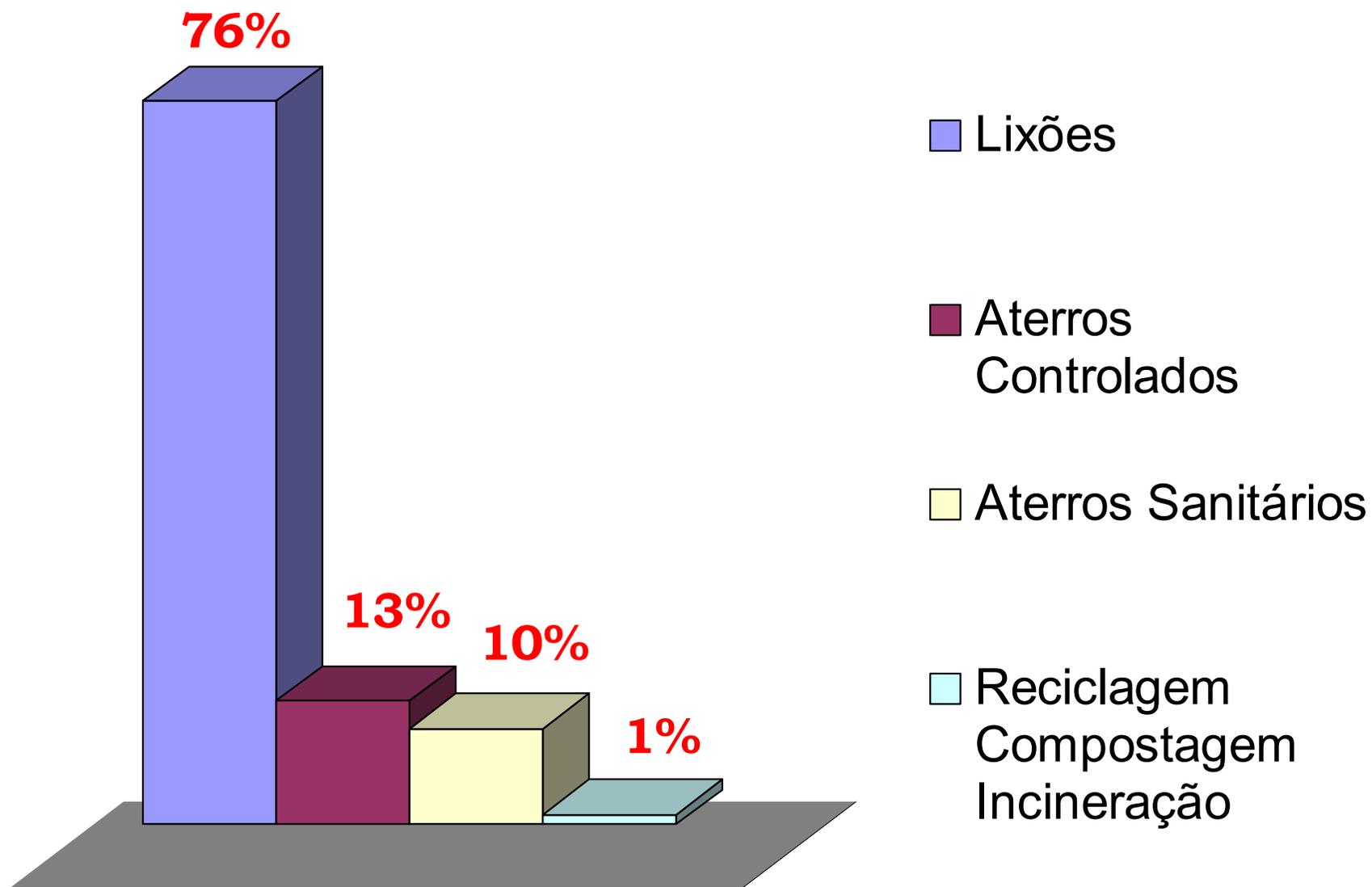
Situação do destino final nas regiões brasileiras					
REGIÕES	LIXÕES	ATERROS SANITÁRIOS	ATERROS CONTROLADOS	USINAS	OUTROS
Norte	89,70	3,67	3,99	2,58	0,06
Nordeste	90,67	2,25	5,45	0,74	0,89
Centro-Oeste	54,05	13,10	27,00	5,02	0,83
Sudeste	26,58	24,62	40,48	4,41	3,91
Sul	40,72	51,97	4,91	0,98	1,42
Brasil	49,27	23,33	21,90	3,00	2,50

Nota: Valores expressos em porcentagem da quantidade de lixo coletado nas cidades.

Fonte: ALEXANDRA, Iana – Saneamento Ambiental – Resíduos Sólidos, s/d. Disponível em: <http://www.hidro.ufcg.edu.br/twiki/pub/Disciplinas/SaneamentoB%E1sico/ResiduosSolidos.ppt>

**Data?**

# DESTINAÇÃO DO LIXO NO BRASIL



Fonte: ?  
Data?

GRÁFICO 5. **DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU NO BRASIL POR TIPO DE DESTINAÇÃO (T/DIA)**

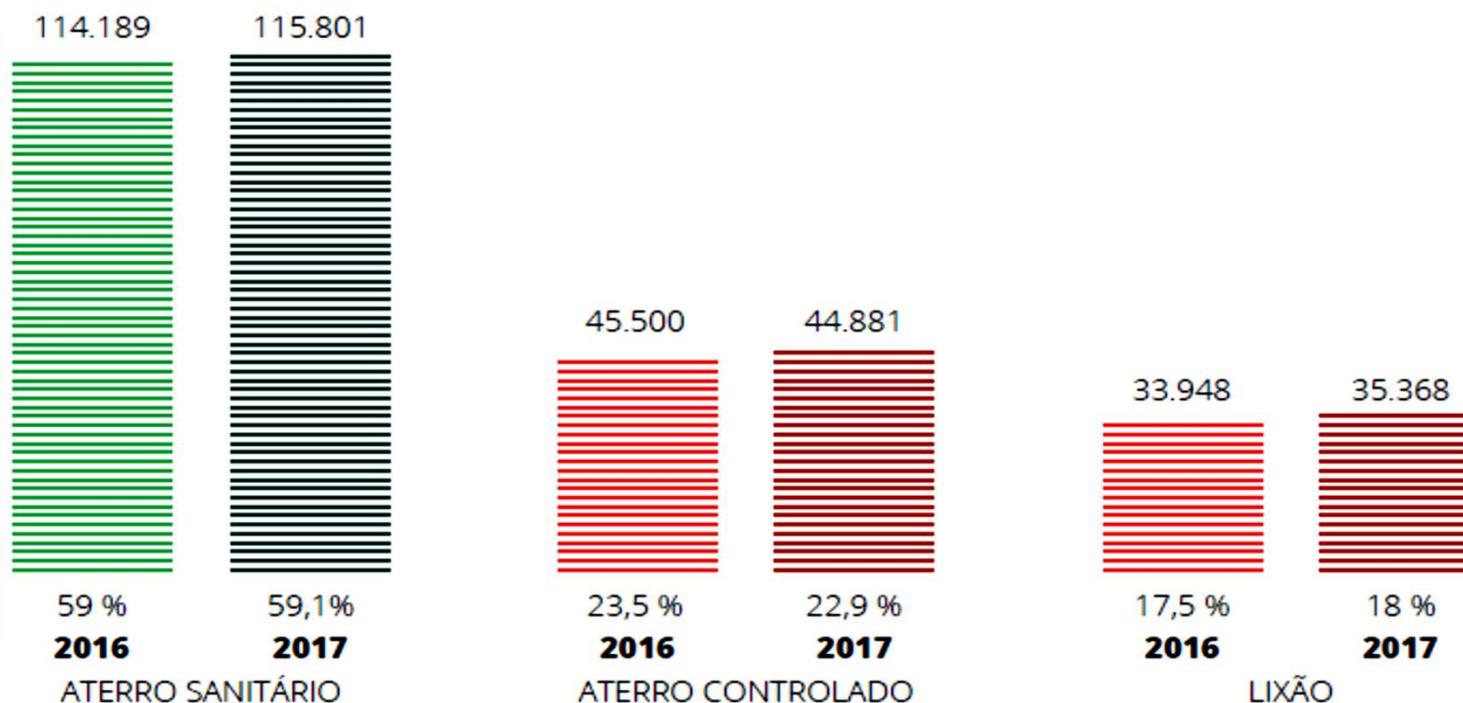


GRÁFICO 6. **DISPOSIÇÃO FINAL DOS RSU COLETADOS NO BRASIL (T/ANO)**

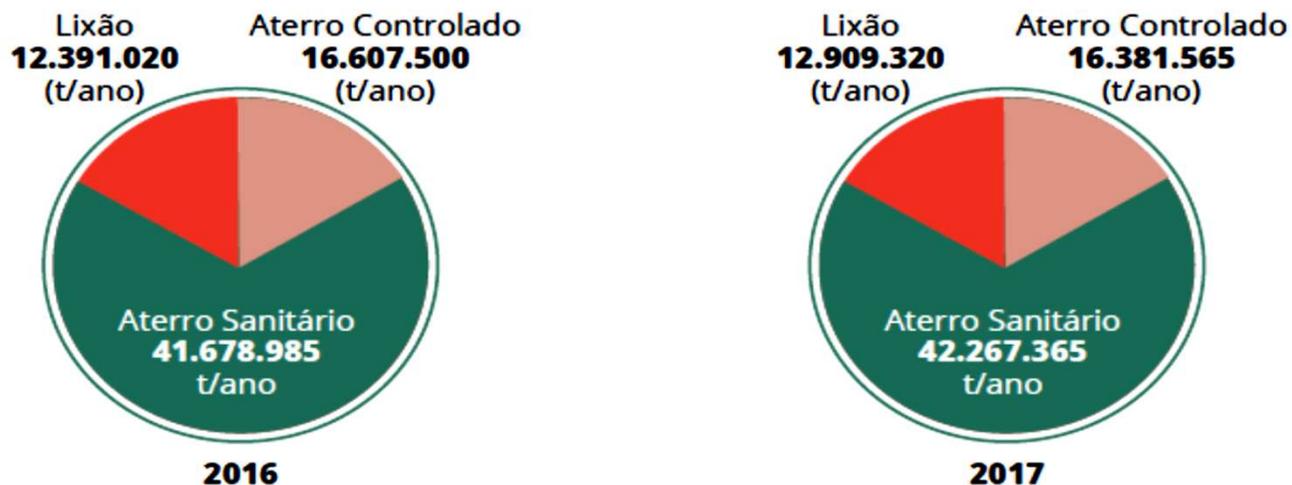
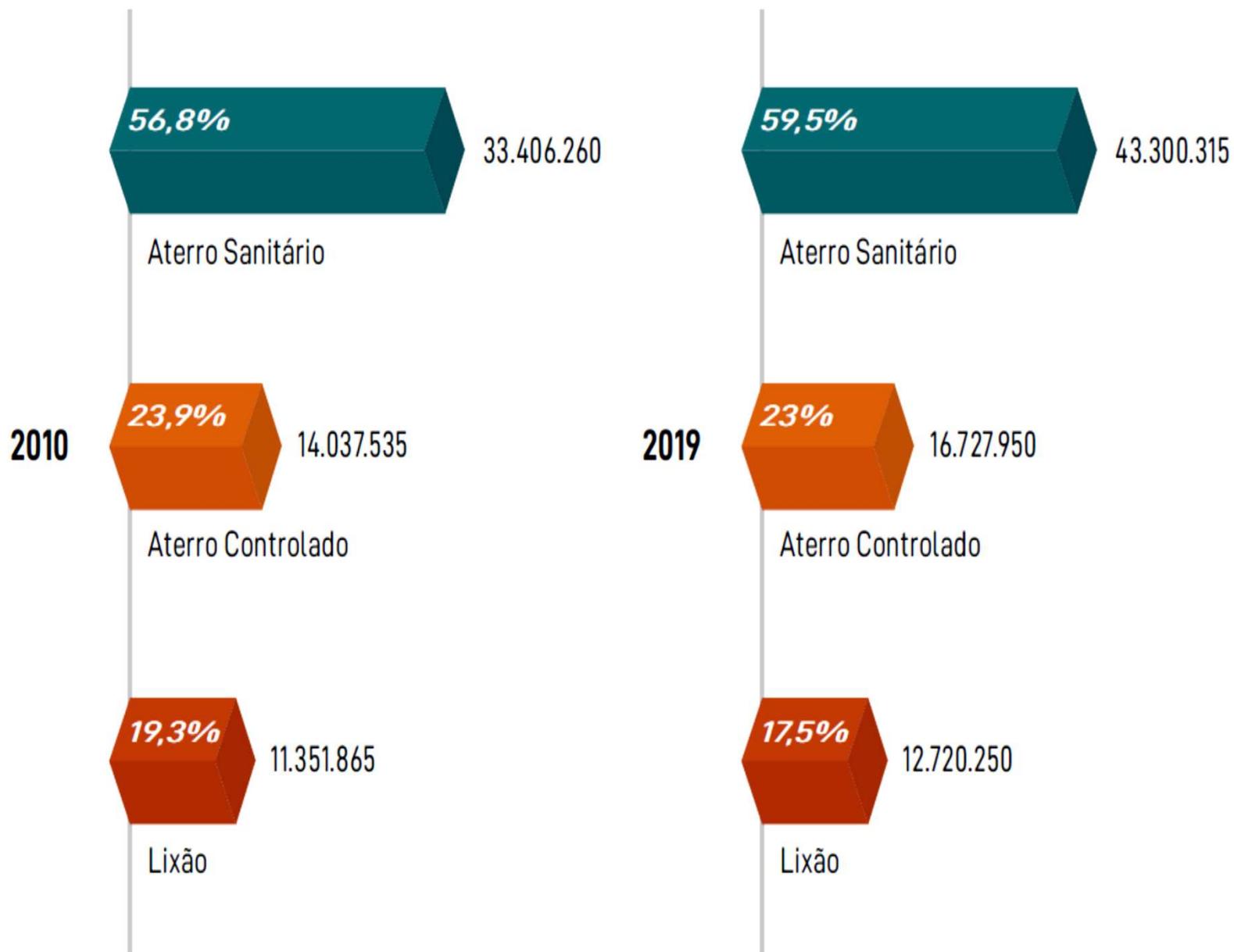


GRÁFICO 8. DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU NO BRASIL, POR TIPO DE DESTINAÇÃO (T/ANO)







# DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

- “Lixões”







# DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

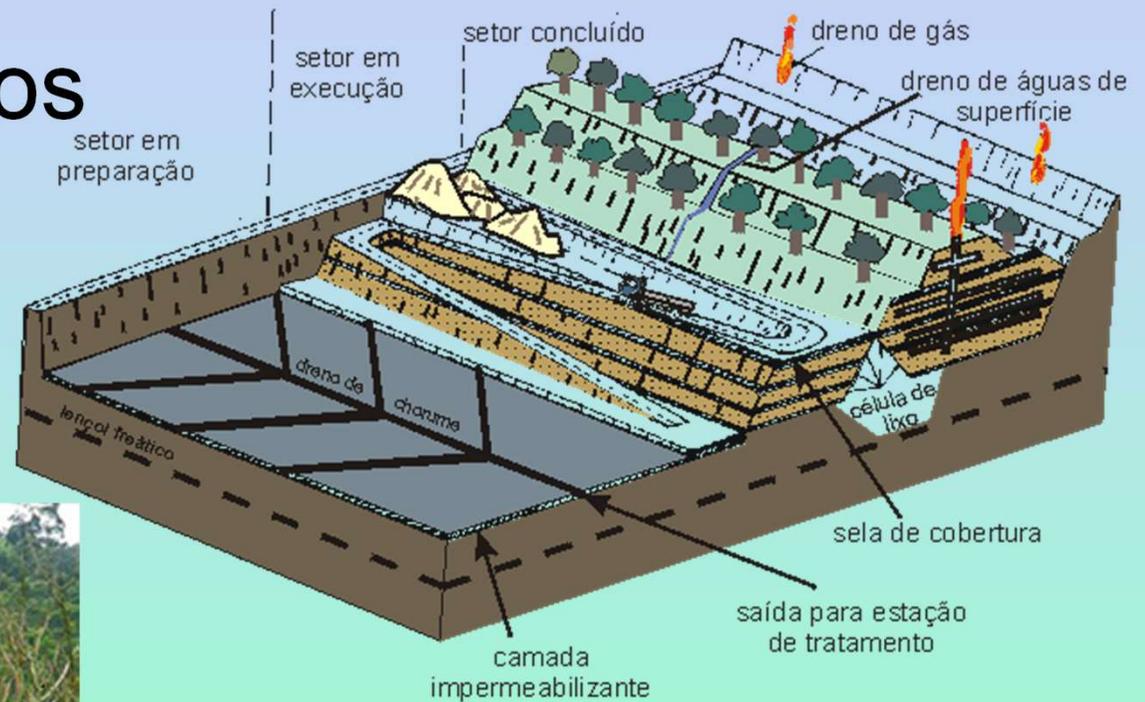
- Aterros controlados

Os aterros chamados de controlados, geralmente são antigos lixões que passaram por um processo de remediação da área do aterro, ou seja, isolamento do entorno para minimizar os efeitos do gerado, canalização deste chorume para tratamento adequado, remoção dos gases produzidos em diferentes profundidades do aterro, recobrimento das células expostas na superfície, compactação adequada para o recebimento de novos resíduos.



# DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

- Aterros sanitários

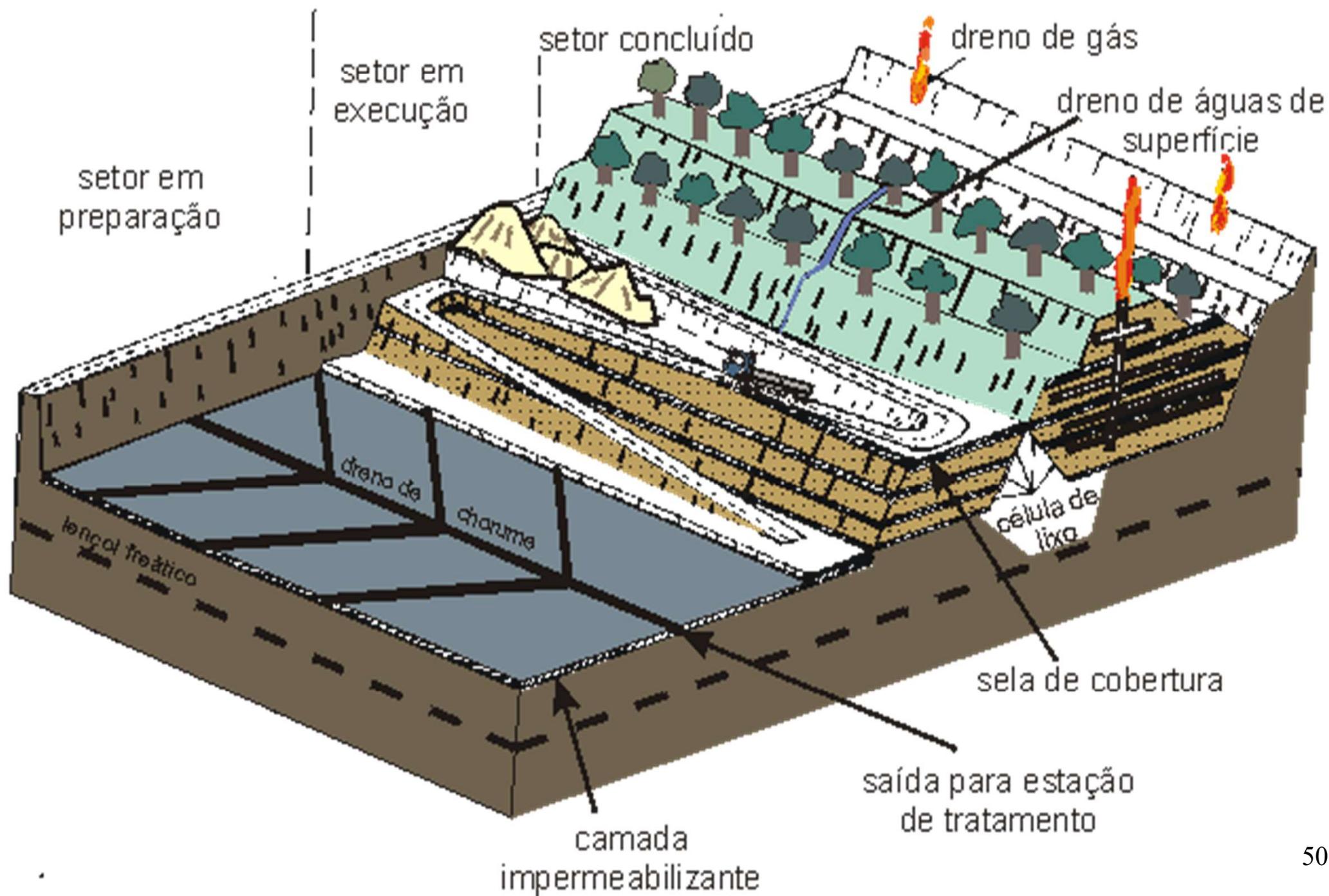


# RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA

- **Aterro sanitário**

Equipamentos necessários:

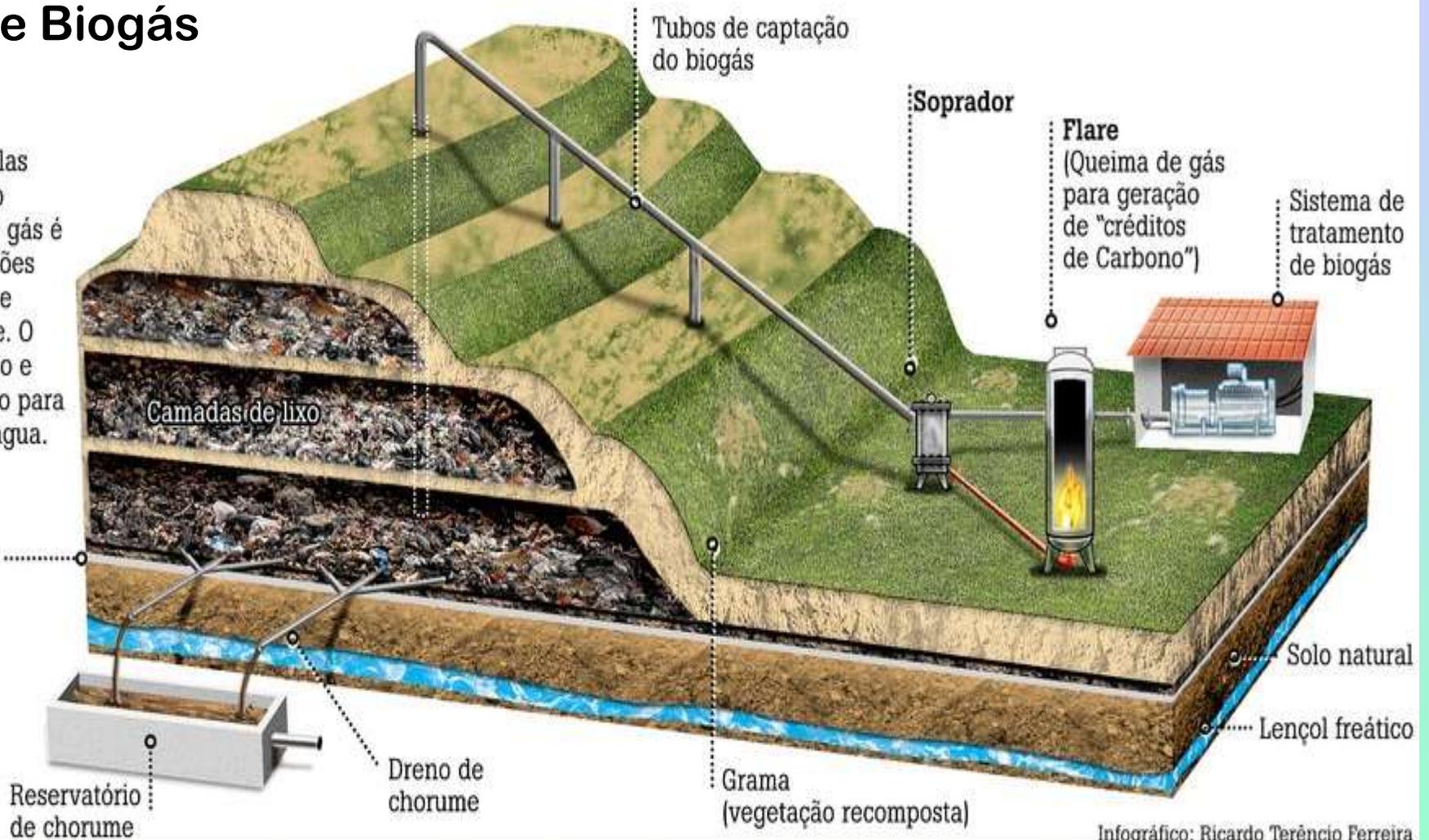
- Sistema de impermeabilização superior
- Poços de drenagem de biogás
- Rede de coleta e bombas de vácuo
- Grupos geradores



# Estação de Biogás

Ao ser decomposto pelas bactérias, o lixo gera o biogás e o chorume. O gás é conduzido por tubulações para ser queimado e se tornar menos poluente. O chorume é armazenado e destinado a tratamento para ser transformado em água.

**Manta plástica PEAD** (Polietileno Alta Densidade) para impermeabilização, que protege o solo e o lençol freático



Infográfico: Ricardo Terêncio Ferreira

# Biogás - Caracterização

- Produto da decomposição anaeróbia matéria orgânica
- Composição:

Metano (CH <sub>4</sub> )	50% a 75%
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	25% a 40%
Hidrogênio (H <sub>2</sub> )	1% a 3%
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	0,5% a 2,5%
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	0,1% a 1%
Gás Sulfídrico (H <sub>2</sub> S)	0,1% a 0,5%
Amônio (NH <sub>3</sub> )	0,1% a 0,5%
Monóxido de Carbono (CO)	0% a 0,1%
Água (H <sub>2</sub> O)	Variável

Fonte: Cassini(2003)

# Biogás - Poder calorífico e potencial energético

- **Poder calorífico x composição:**

Composição Química do Biogás	Peso Específico (Kg/Nm <sup>3</sup> )	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)	Poder Calorífico Inferior (kcal/Nm <sup>3</sup> )
10% CH <sub>4</sub> , 90% CO <sub>2</sub>	1,8393	465,43	856,06
40% CH <sub>4</sub> , 60% CO <sub>2</sub>	1,4643	2338,52	3424,29
60% CH <sub>4</sub> , 40% CO <sub>2</sub>	1,2143	4229,98	5136,46
65% CH <sub>4</sub> , 35% CO <sub>2</sub>	1,1518	4831,14	5564,50
75% CH <sub>4</sub> , 25% CO <sub>2</sub>	1,0268	6253,01	6420,59
95% CH <sub>4</sub> , 5% CO <sub>2</sub>	0,7768	10469,6	8132,78
99% CH <sub>4</sub> , 1% CO <sub>2</sub>	0,7268	11661,02	8475,23

Fonte: Adaptado de Avellar (2001)

**Poder calorífico médio:** 5.000 kcal/Nm<sup>3</sup>

1 m<sup>3</sup> de biogás = 0,454 kg de GLP (substituição do botijão de 13 kg de GLP por um biodigestor de 26 m<sup>3</sup> de capacidade).

**Gás Natural Seco:**

Poder calorífico Inferior: 8.800 kcal/Nm<sup>3</sup>

Poder calorífico Superior: 9.256 kcal/Nm<sup>3</sup>

# BIOGÁS

Poder calorífico: 5.000 kcal/m<sup>3</sup>

## Equivalência energética do biogás

1 m <sup>3</sup> Biogás	0,61 L de gasolina
	0,58 L de querosene
	0,5 kg de gás liquefeito de petróleo (GLP)
	0,79 L de álcool combustível
	1,538 kg de lenha
	1,428 kWh de energia elétrica
	0,55 L de óleo diesel
	20 kg de lixo urbano
	2,5 kg de resíduos secos vegetais
	14,3 kg de resíduos sólidos de frigorífico

# ATERROS SANITÁRIOS

1 tonelada

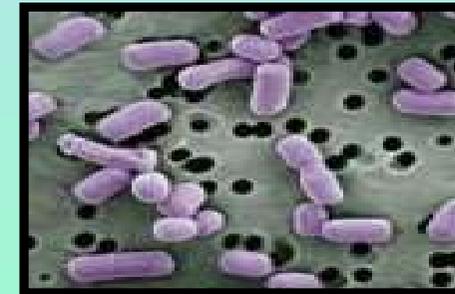
Resíduos sólidos urbanos



Matéria orgânica  
biodegradável

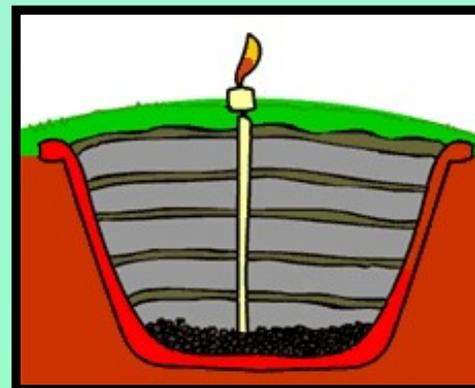


Digestão anaeróbica



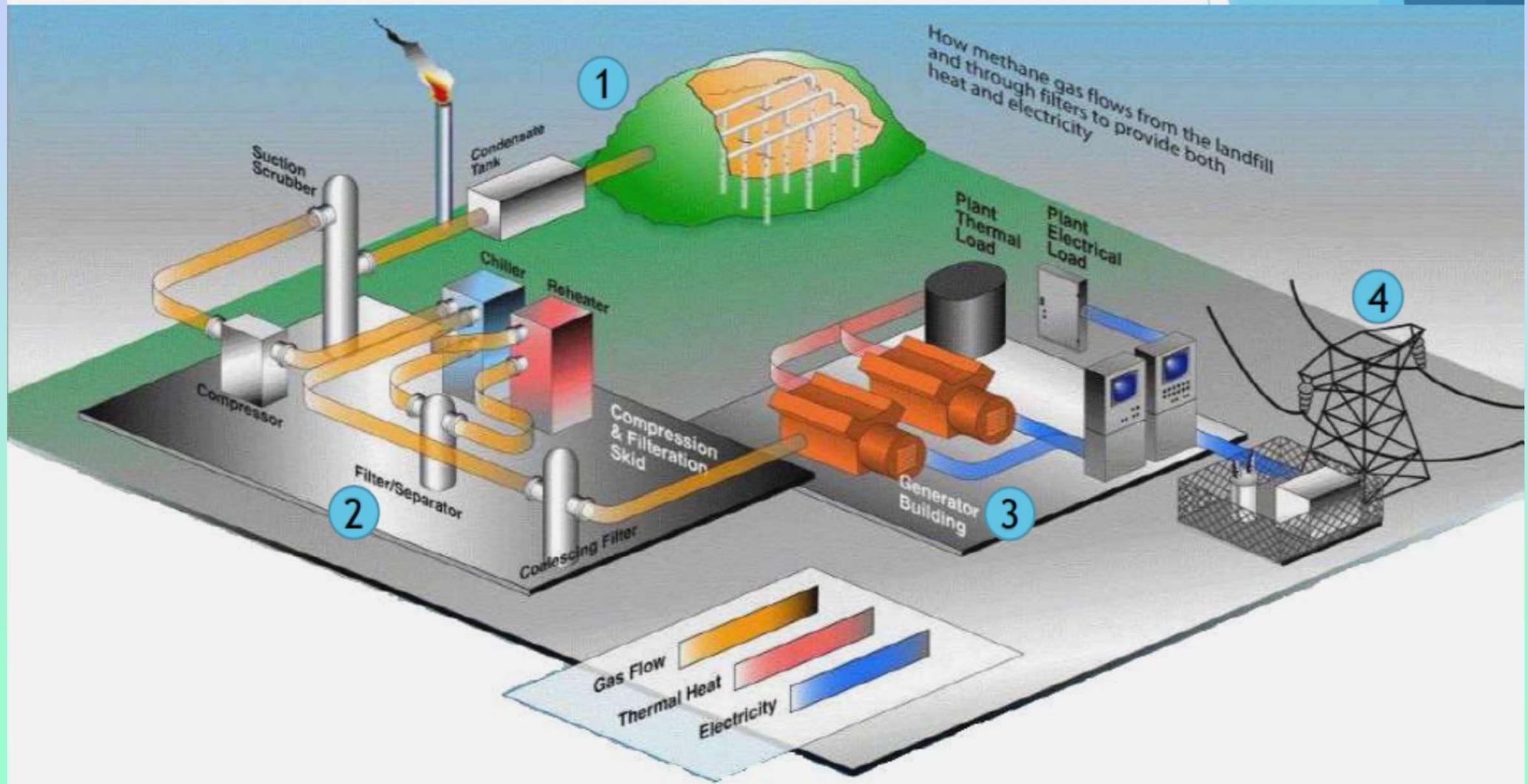
**BIOGÁS**

200 m<sup>3</sup>



# GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM O BIOGÁS DE ATERROS - ETAPAS

1-Captação 2-Tratamento 3-Geração de energia 4-Conexão à rede elétrica



Fonte: Grupo Solvi - Avanços da Geração de Energia Termelétrica por Biomassa e outras Fontes Alternativas como Biogás, Biometano. 30° FIEE SMART FUTURE – GTCD, São Paulo, 25/7/2019.

## TERMELÉTRICA A BIOGÁS EM OPERAÇÃO - TERMOVERDE CAIEIRAS

- Potencia Instalada de 30MW – em breve será ampliada.
- Aterro recebe 10.000 t/dia de resíduos urbanos
- Em operação desde 2016



Fonte: Grupo Solvi - Avanços da Geração de Energia Termelétrica por Biomassa e outras Fontes Alternativas como Biogás, Biometano. 30° FIEE SMART FUTURE – GTCD, São Paulo, 25/7/2019.



Fonte: Marcelo Lima Camargo / Solvi

A termelétrica é composta de unidade geradora de energia com 21 motores geradores de 1.407 KW cada; central de tratamento do biogás; subestação seccionadora elevadora para conexão na linha de transmissão de 138kV, que liga a termelétrica ao SIN (Sistema Interligado Nacional) chegando aos consumidores finais de energia.

# ATERROS SANITÁRIOS

## VANTAGENS

- Custo de investimento muito menor que o requerido por outras formas de tratamento de resíduos
- Baixo custo de operação
- Método de disposição final completo
- Simplicidade operacional
- Flexibilidade operacional

# ATERROS SANITÁRIOS

## DESVANTAGENS

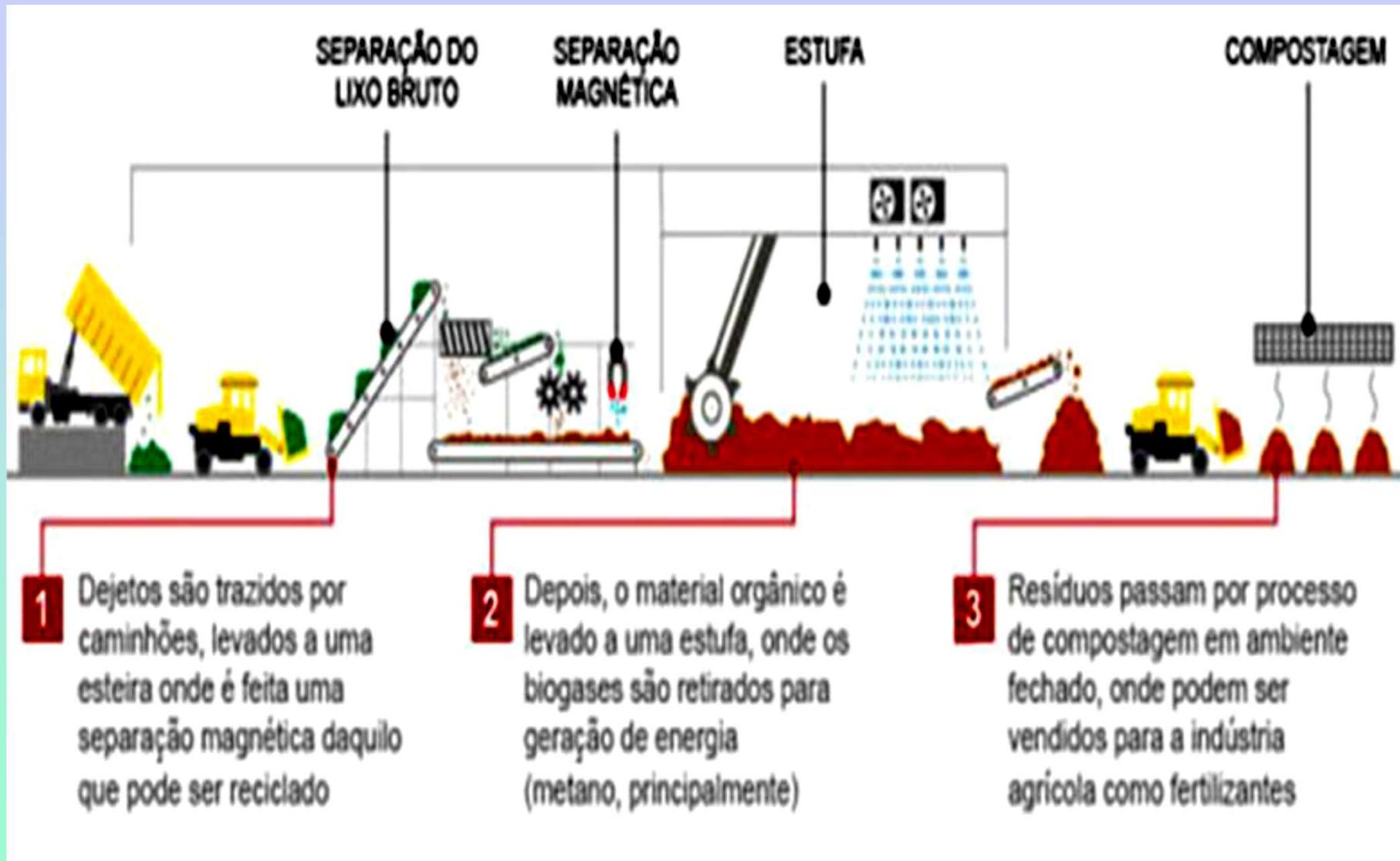
- Não trata os resíduos, consistindo em uma forma de armazenamento no solo
- Requer áreas significativas
- A sua operação depende de condições climáticas
- Apresenta risco de contaminação do solo e da água subterrânea

# COMPOSTAGEM

Define-se compostagem como o processo natural de decomposição biológica de materiais orgânicos, de origem animal e vegetal, pela ação de microrganismos. Para que ele ocorra, não é necessário a adição de qualquer componente físico ou químico à massa do lixo.



## Usina de Compostagem



Fonte: Costa, I. P. & Abreu, Y. V. Estudo sobre a possibilidade de geração de energia a partir de resíduos de saneamento (lixo, esgoto). Revista Desafios, v. 05, n. 01, 2018.

# COMPOSTAGEM

## VANTAGENS

- Possibilidade de reciclagem de materiais triados
- Produção de composto orgânico auxiliar da fertilização química e biológica do solo
- Fácil manutenção e operação do que quando comparado com a técnica de incineração

# COMPOSTAGEM

## DESVANTAGENS

- Alto custo de investimento
- Viável se houver demanda do composto gerado
- Limitado por sua capacidade operacional
- Necessidade de encaminhamento dos rejeitos para aterro sanitário ou incineradores

# INCINERAÇÃO

É um processo de queima, na presença de excesso de oxigênio, no qual os materiais à base de carbono são decompostos, despreendendo calor e gerando um resíduo de cinzas.

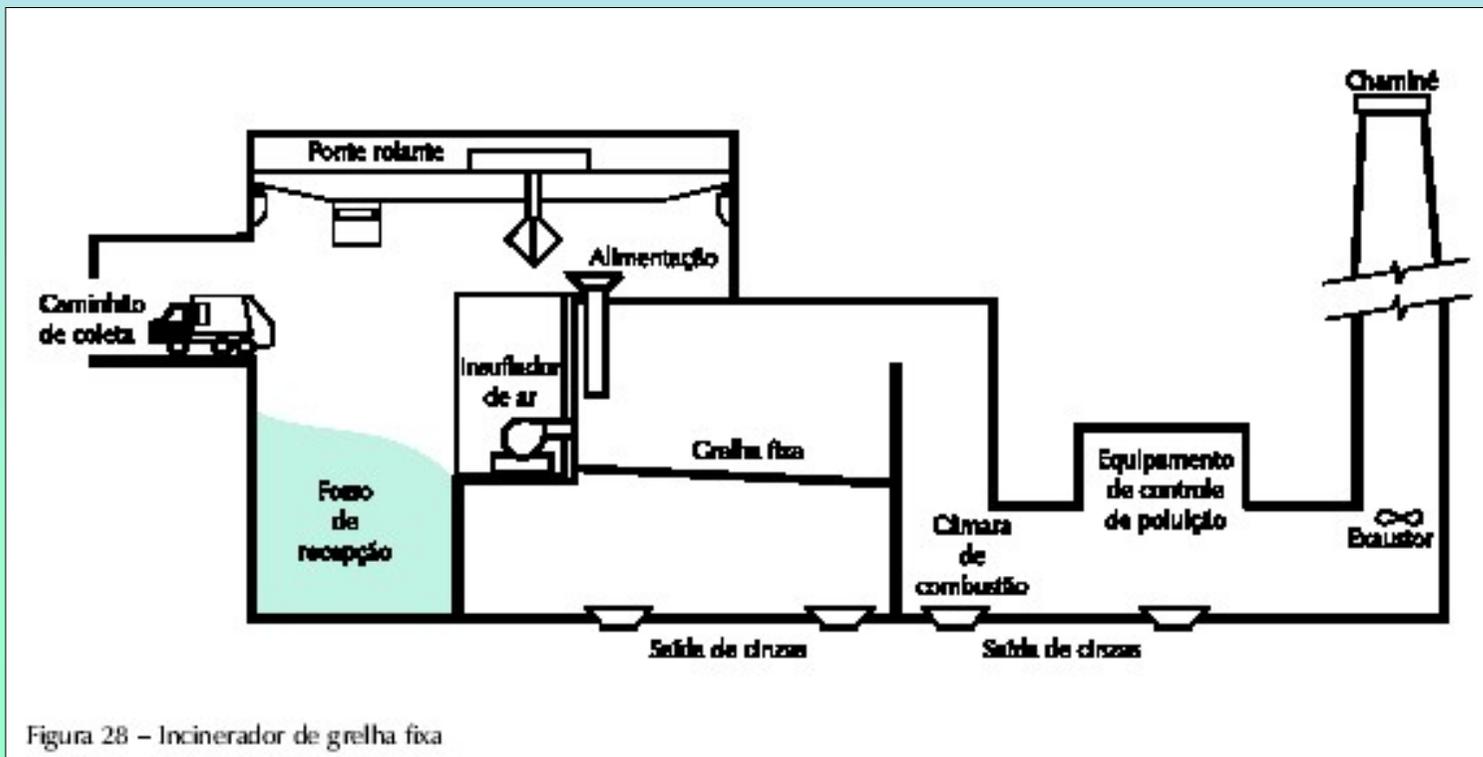
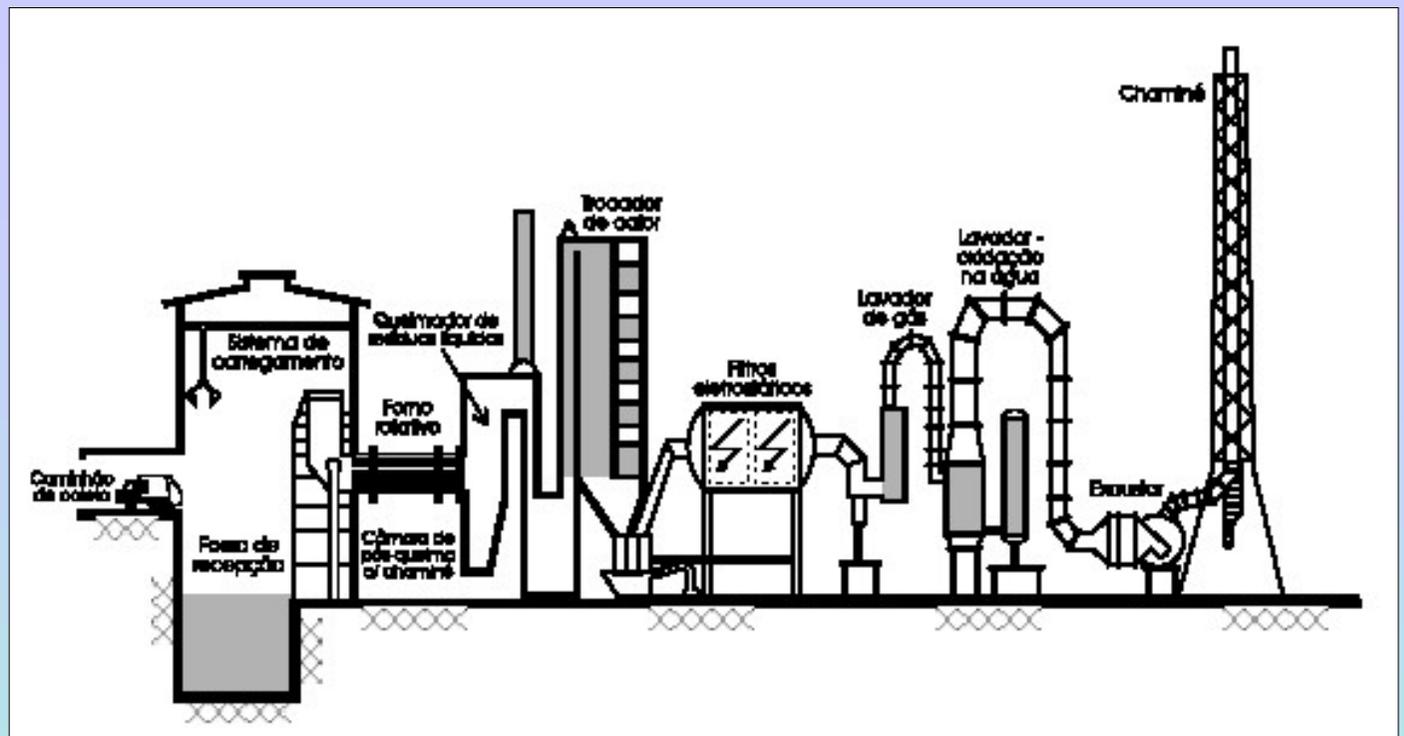


Figura 28 – Incinerador de grelha fixa

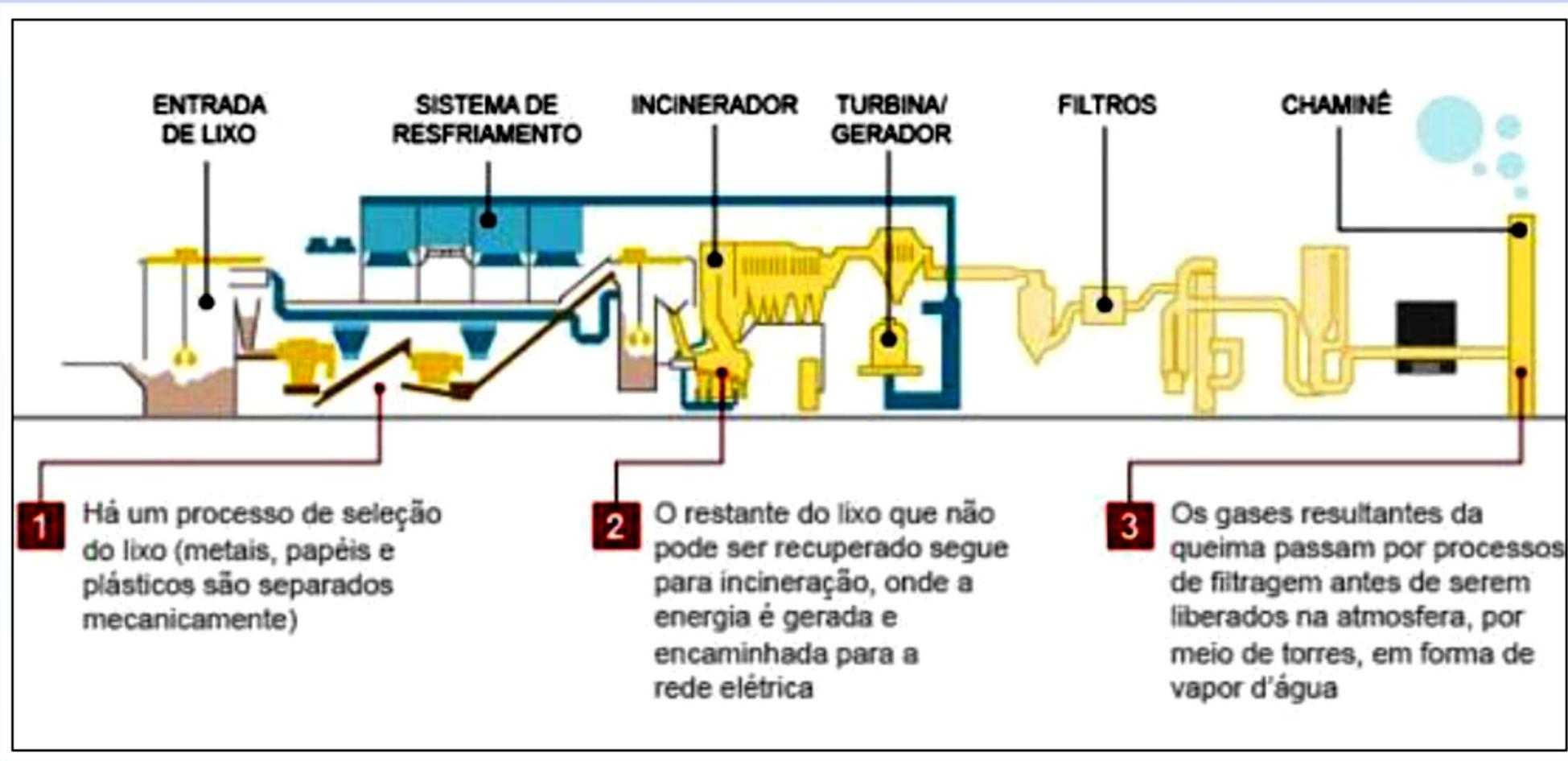
### **Poder calorífico de materiais encontrados em RSU (kcal/kg)**

<i>Plásticos</i>	6.301
<i>Borracha</i>	6.780
<i>Couro</i>	3.629
<i>Têxteis</i>	3.478
<i>Madeira</i>	2.520
<i>Alimentos</i>	1.311
<i>Papel</i>	4.033

- para PCI < 1.675 kcal/kg, a incineração não é tecnicamente viável;
- para 1.675 kcal/kg < PCI < 2.000 kcal/kg, a viabilidade técnica da incineração ainda depende de algum tipo de pré-tratamento que eleve o poder calorífico;
- para PCI > 2.000 kcal/kg, a queima bruta (“*mass burning*”) é tecnicamente viável.

Fonte: IVIG/COPPE [Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais da Coordenação de Programas de Pós-Graduação em Engenharia da UFRJ]. Rotas Tecnológicas para aproveitamento energético dos RSU. 2005, 237 p.

## Usina de Incineração



Fonte: Costa, I. P. & Abreu, Y. V. Estudo sobre a possibilidade de geração de energia a partir de resíduos de saneamento (lixo, esgoto). Revista Desafios, v. 05, n. 01, 2018.



Unidade de Recuperação Energética (URE) Valoriza Santos é um projeto da Valoriza Energia SPE, empresa controlada pelo grupo Diniz/Terracom. A URE pretende ser instalada no aterro sanitário do Sítio das Neves, com capacidade para incinerar as cerca de 2 mil toneladas de lixo recolhidas diariamente em sete das nove cidades da região e gerar 50 megawatts de energia elétrica, suficientes para abastecer um município de 250 mil habitantes.

Fonte: <https://www.oeco.org.br/reportagens/mp-pede-suspensao-de-licenciamento-de-incineradora-de-lixo-em-santos/>

# INCINERAÇÃO

## VANTAGENS

- Redução significativa de volume dos resíduos
- Requer áreas relativamente pequenas
- Pode receber grande variedade de resíduos
- Possibilidade de localização próxima de áreas urbanas, se devidamente controlada, diminuindo os custos de transporte
- A sua operação não é dependente de condições meteorológicas
- Não há contato direto dos operários com o lixo
- Forma correta do ponto de vista sanitário para eliminar resíduos de serviços de saúde

# INCINERAÇÃO DESVANTAGENS

- Alto custo de investimento e operação
- Requer mão de obra especializada para operação e manutenção
- Requer rígido controle das normas de segurança
- Produz poluentes atmosféricos prejudiciais à saúde (p.ex. dioxinas; furanos; metais pesados)
- Requer a remoção de poluentes orgânicos persistentes (POP), objeto da Convenção de Estocolmo.