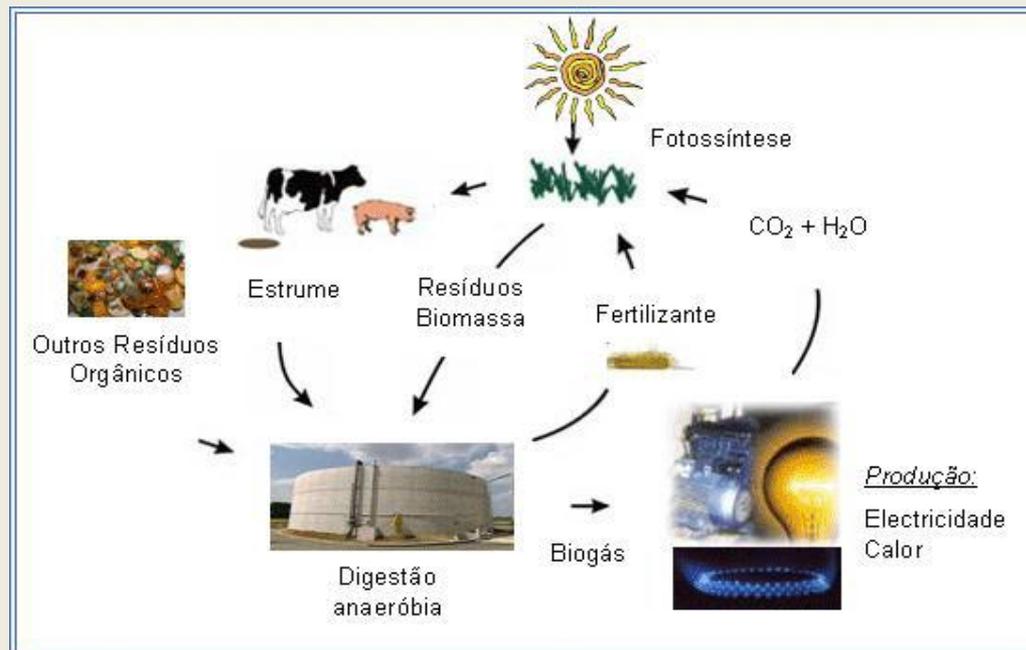


Biogás

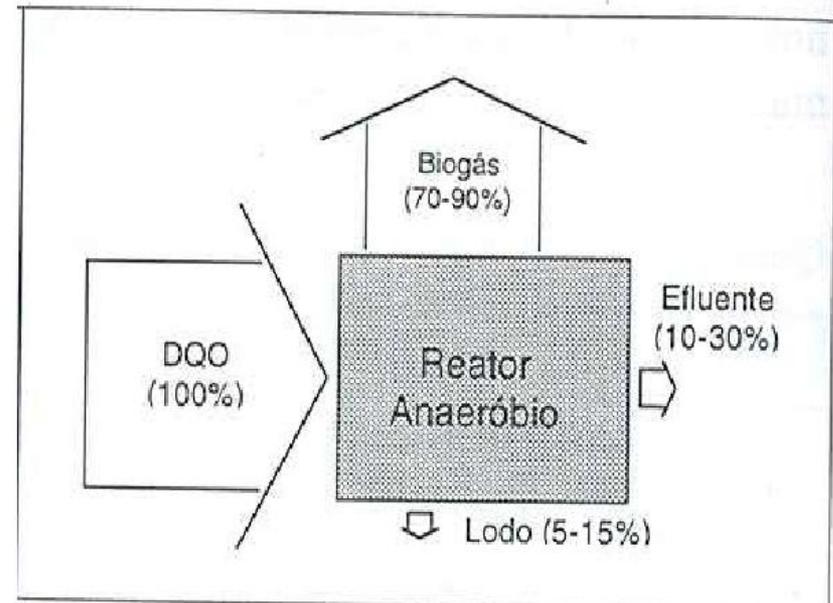
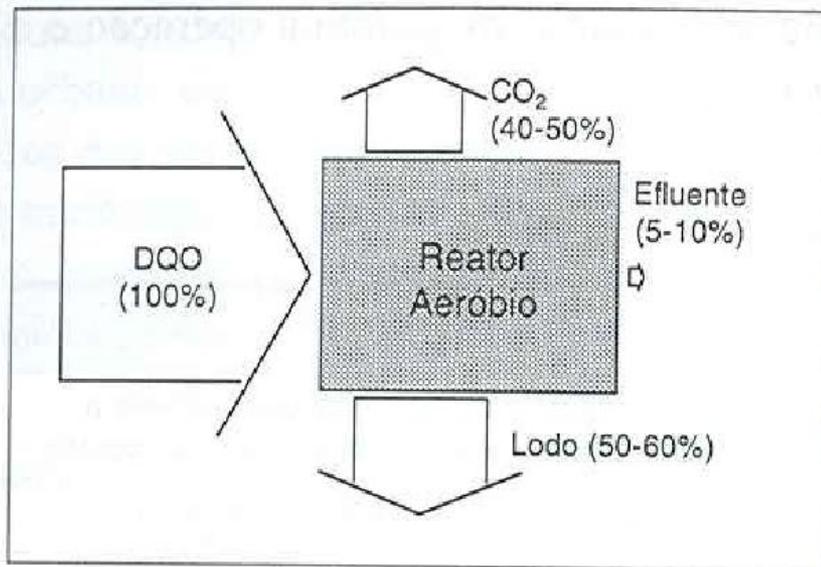
Biogás

- A produção de Biogás vem de milhões de anos antes de Cristo. Os povos antigos essencialmente agrícolas como no caso dos Hindus , Chineses e Japoneses, foram os povos que trouxeram esta tecnologia rudimentar até os dias de hoje.
- O Biogás é uma mistura gasosa combustível, produzida através da **digestão anaeróbica**, ou seja, pela biodegradação da matéria orgânica, pela ação de bactérias na ausência de oxigênio.



Biogás

- **Processo aeróbio** – presença de oxigênio – 40-50% de degradação biológica com conversão em CO₂ – formação de lodo;
- **Processo anaeróbio** – ausência de oxigênio – maior parte do material orgânico é convertido em biogás (70-90%);



Processo aeróbio



Composição e propriedades do biogás

Gás	Concentração típica	Densidade (kg. m ⁻³)	Poder Calorífico (kJ .m ⁻³)	Solubilidade em água (g.l ⁻¹)	Propriedades gerais
CH ₄	45 -60 %	0,717	35.600	0,0645	Incolor, inodoro, asfixiante Inflamável
CO ₂	35 -50 %	1,977	---	1,688	Incolor, inodoro, asfixiante
N ₂	0 -10 %	1,250	---	0,019	Incolor, inodoro,
O ₂	0 – 4 %	1,429	---	0,043	Incolor, inodoro,
CO	< 0,1 %	1,250	12,640	0,028	Incolor, inodoro, inflamável, tóxico
H ₂	< 0,1%	0,090	10.760	0,001	Incolor, inodoro, inflamável
H ₂ S	0 - 70 ppm	1,539	---	3,846	Incolor, tóxico

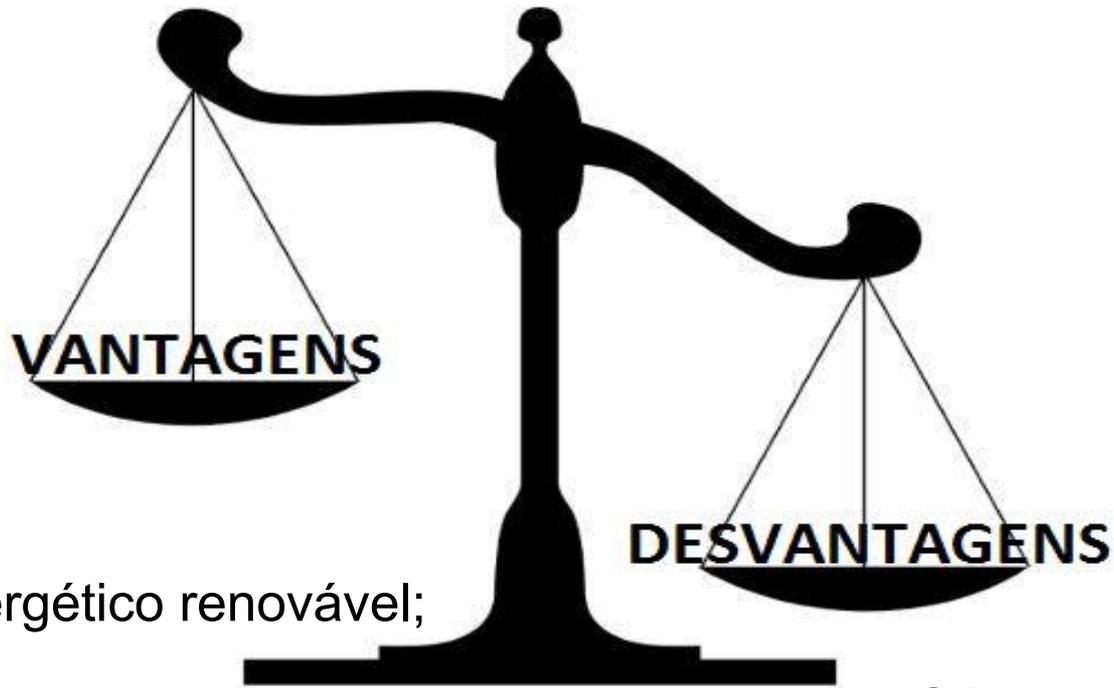
Fonte: MACIEL (2003)

Equivalência energética de 1m³ de Biogás

Combustível	Quantidades equivalentes
Carvão	1,5 m ³
Gás Natural	1,5 m ³
Óleo cru	0,72 L
Gasolina	0,98 L
Álcool	1,34 L
Eletricidade	2,21 kWh

Fonte: FARRET (1999)

- O poder calorífico do biogás é de aproximadamente 21.600 kJ/m³
- Ou 6,0 kWh/m³.



✓ Recurso energético renovável;

✓ Energia ecologicamente correta, diminuindo a utilização de recursos fósseis.

○ Gás metano não transformado em gás carbônico contribui diretamente para o efeito estufa e o aquecimento global.

Metano 21x mais estufa que dióxido de carbono

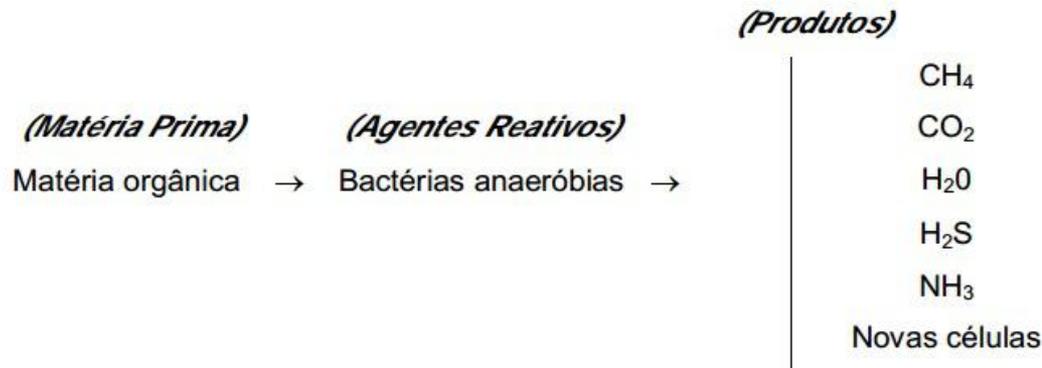
Produção de biogás – Matérias primas

- Excrementos de animais;
 - Lodos de esgoto;
 - Lixo doméstico;
 - Resíduos agrícolas;
 - Afluentes industriais;
-
- Neste caso a digestão anaeróbia é realizada em biodigestores especialmente projetados;
 - O resíduo dos biodigestores é um excelente **biofertilizante**;



Produção de biogás – Digestão anaeróbia

- A digestão anaeróbia é um processo biológico envolvendo um conjunto de diferentes grupos de microorganismos, na ausência de oxigênio molecular, degradando compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídios em formas mais simples como metano e gás carbônico;



Produção de biogás – Digestão anaeróbia

- As etapas da digestão anaeróbia são: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese
- **Hidrólise:**
- o material orgânico particulado (polímeros) é convertido em compostos dissolvidos de menor peso molecular;
- interferência das chamadas exo enzimas que são excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas;
- As **proteínas** são degradadas por meio de (poli) peptídios para formar **aminoácidos**
- Os **carboidratos** se transformam em **açúcares solúveis** (mono e dissacarídeos)
- Os **lipídios** são convertidos em **ácidos graxos** de longa cadeia de carbono (C15 a C17) e **glicerina**
- Dentre as bactérias comumente encontradas em reatores anaeróbios destacam-se: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Micrococcus*, *Bacillus* e *Escherichia*.

Produção de biogás – Digestão anaeróbia

- Acidogênese:
- Os compostos dissolvidos, gerados no processo de hidrólise ou liquefação, são absorvidos nas células das bactérias fermentativas;
- São convertidos em compostos mais simples que são excretados pelas células, como ácidos graxos voláteis de cadeias curtas (AGV), álcoois, ácido láctico e compostos minerais como CO₂, H₂, NH₃, H₂S;
- Açúcares e aminoácidos são fermentados em ácido acético, ácido propiônico, ácido butírico, etc.;
- A fermentação acidogênica é realizada por um grupo diversificado de bactérias, na maior parte na forma anaeróbia;
- *Clostridium, Bacteroides*

Produção de biogás – Digestão anaeróbia

- Acetogênese:
- Desempenham um importante papel entre a acidogênese e metanogênese;
- Há a conversão de produtos da acidogênese (propionato e butirato) em compostos que formam os substratos para a produção de metano: acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- As bactérias acetogênicas (produtoras de hidrogênio) convertem ácidos graxos com mais de dois carbonos a ácidos acético, CO₂, H₂ (substratos para as bactérias metanogênicas);
- Os gêneros conhecidos de bactérias acetogênicas encontrados em digestores anaeróbios são *Syntrophobacter* e *Syntrophomonas*.

Produção de biogás – Digestão anaeróbia

- Metanogênese:

- O metano é produzido pelas bactérias acetotróficas, a partir da redução de ácido acético, ou pelas bactérias hidrogenotróficas, a partir da redução de dióxido de carbono. Tem-se as seguintes reações catabólicas:

- Metanogênese acetotrófica ou acetoclástica:

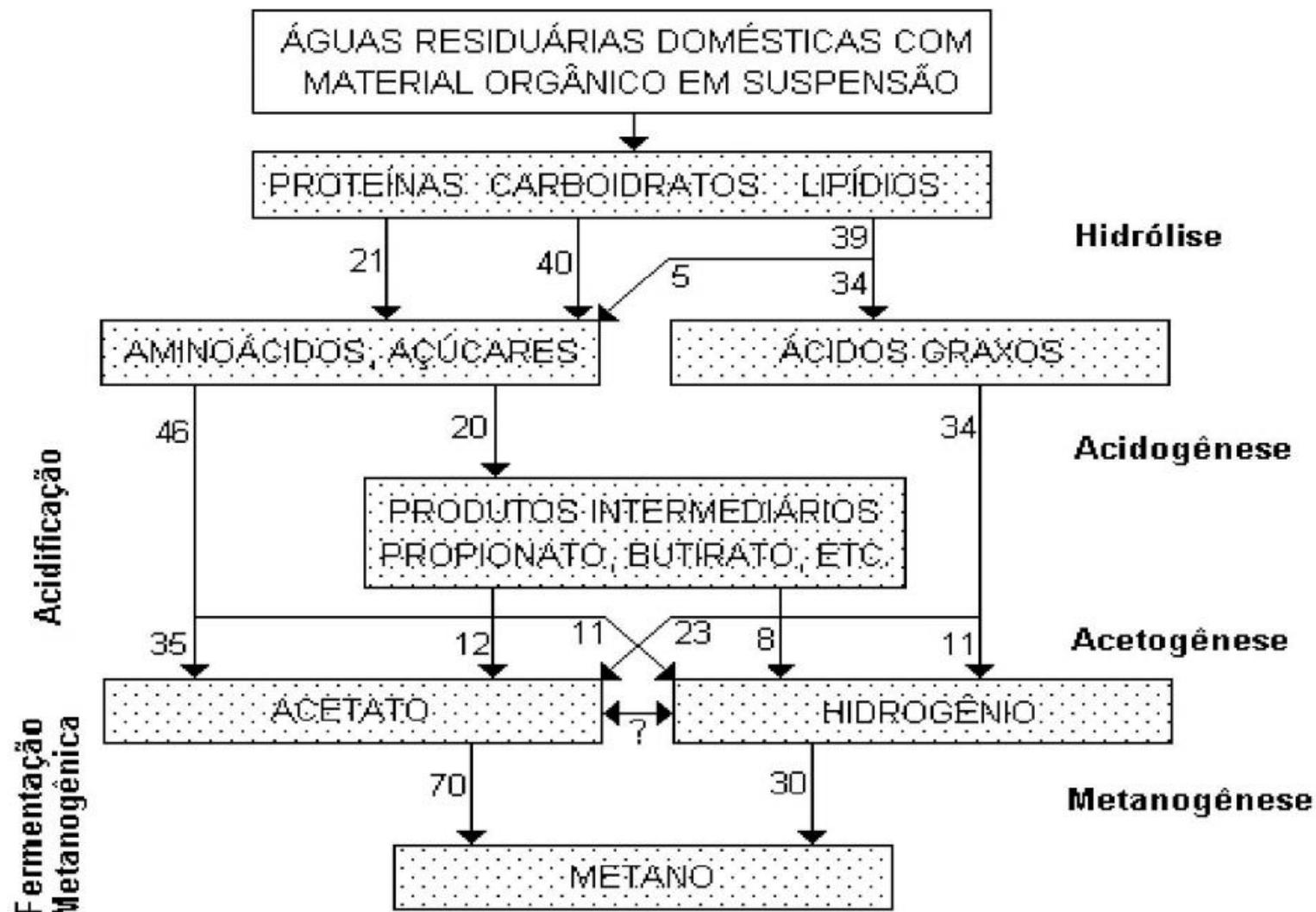


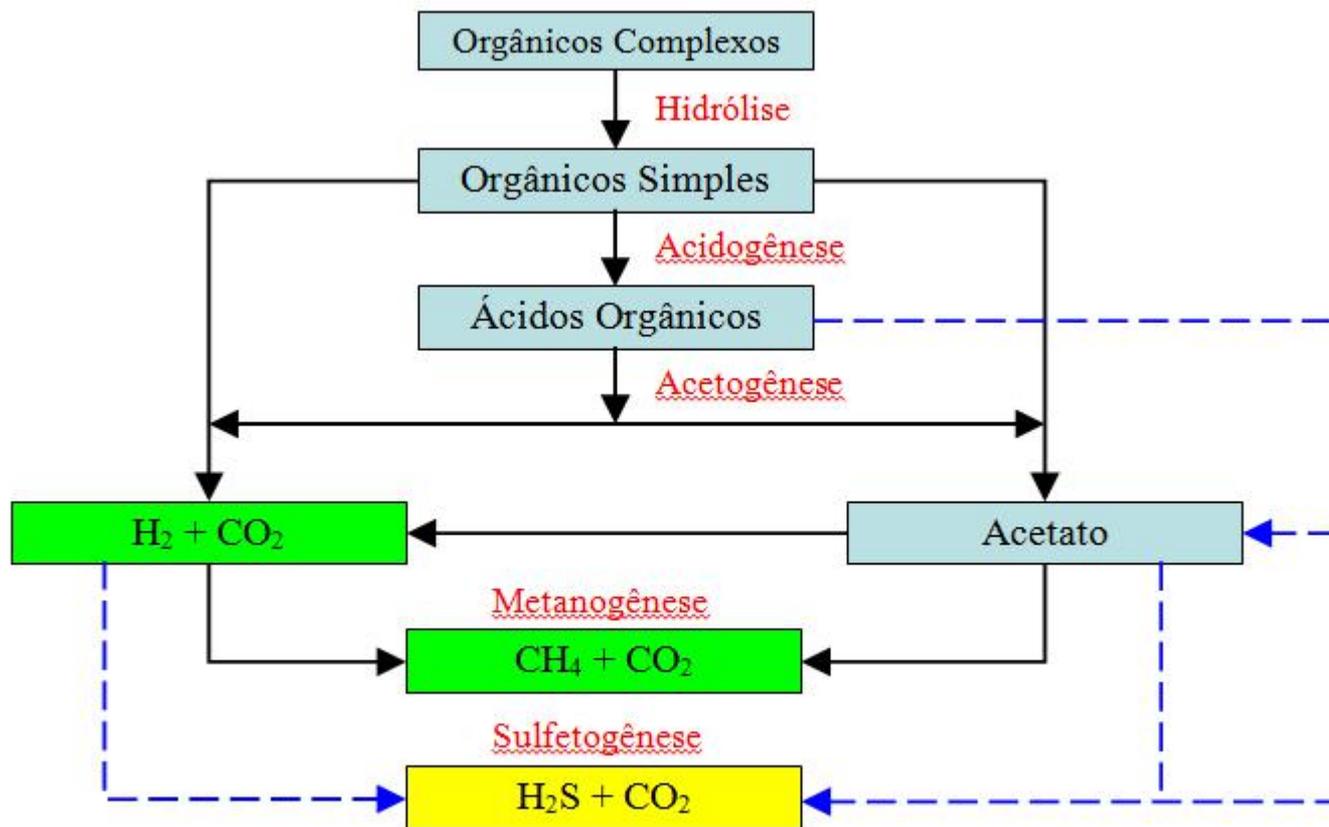
- Metanogênese hidrogenotrófica:



- *60 a 70% do metano produzido provém do acetato;*
- As bactérias pertencem a dois gêneros principais: *Methanosarcina* e *Methanosaeta*.

a





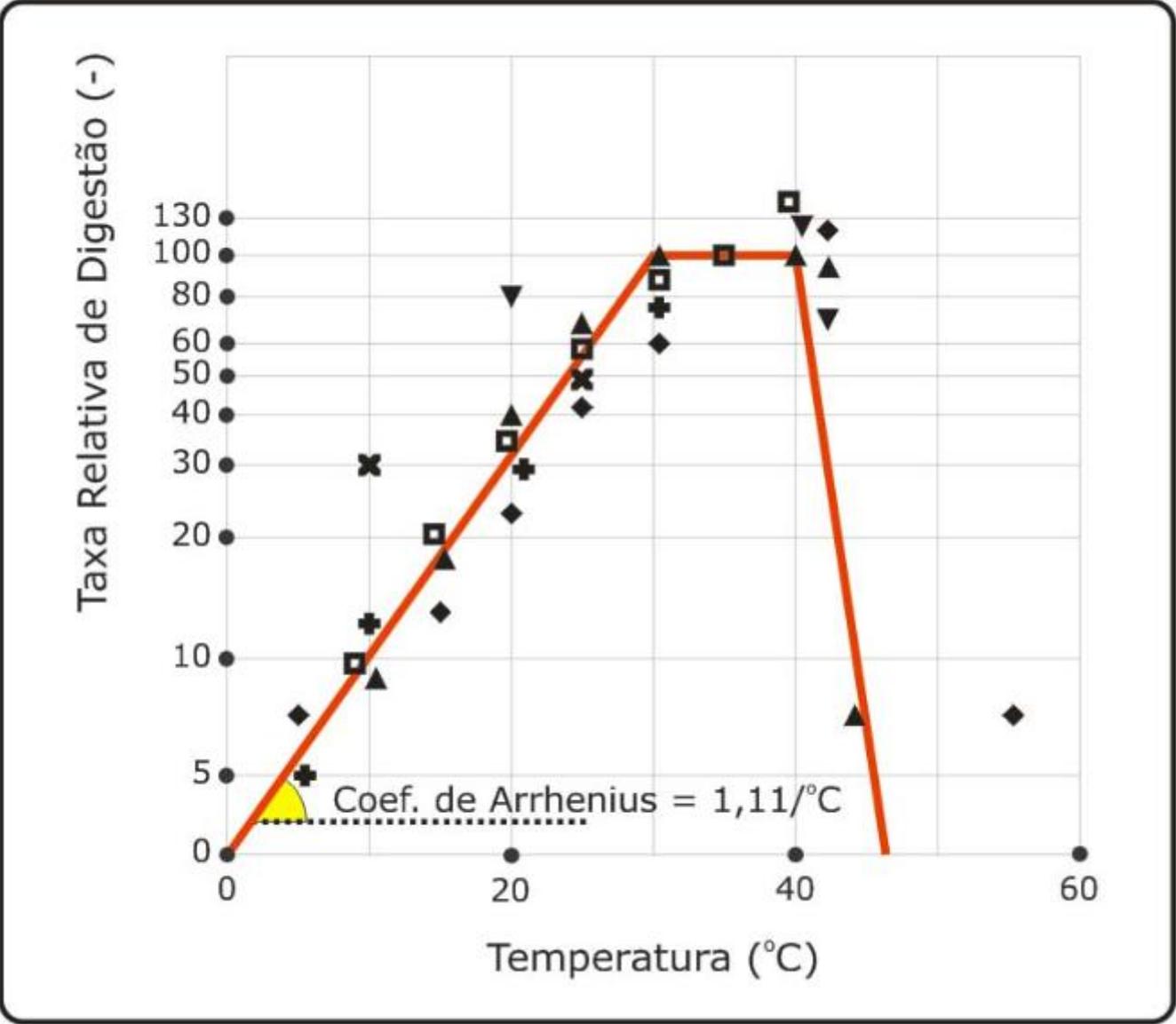
Reações importantes nos processos anaeróbios:

Oxidações (doadoras elétrons)		ΔG_0 , kJ
Propionato → acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^- + 3 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + \text{HCO}_3^- + \text{H}_2$	+ 76,1
Butirato → acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2 \text{H}_2$	+ 48,1
Etanol → acetato	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2 \text{H}_2$	+ 9,6
Lactato → acetato	$\text{CH}_3\text{CHOHCOO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{HCO}_3^- + \text{H} + 2\text{H}_2$	- 4,2
Acetato → metano	$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_3^- + \text{CH}_4$	- 31
Reduções (recebe elétrons)		
HCO_3^- → acetato	$2 \text{HCO}_3^- + 4 \text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + 4 \text{H}_2\text{O}$	- 104,6
HCO_3^- → metano	$\text{HCO}_3^- + 4 \text{H}_2 + \text{H} \rightarrow \text{CH}_4 + 3 \text{H}_2\text{O}$	-135,6
Sulfato → sulfeto	$\text{SO}_4^{2-} + 4 \text{H}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{HS}^- + 4 \text{H}_2\text{O}$	-151,9
Sulfato → sulfeto	$\text{SO}_4^{2-} + \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ \rightarrow 2 \text{HCO}_3^- + \text{H}_2\text{S}$	-59,9
Nitrato → amônia	$\text{NO}_3^- + 4 \text{H}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_4^+ + 3 \text{H}_2\text{O}$	-559,9
Nitrato → amônia	$\text{NO}_3^- + 4 \text{H}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{NH}_4^+ + 3 \text{H}_2\text{O}$	-511,4
Nitrato → nitrogênio	$2 \text{NO}_3^- + 5 \text{H}_2 + 2 \text{H}^+ \rightarrow \text{N}_2 + 6 \text{H}_2\text{O}$	-1120,5

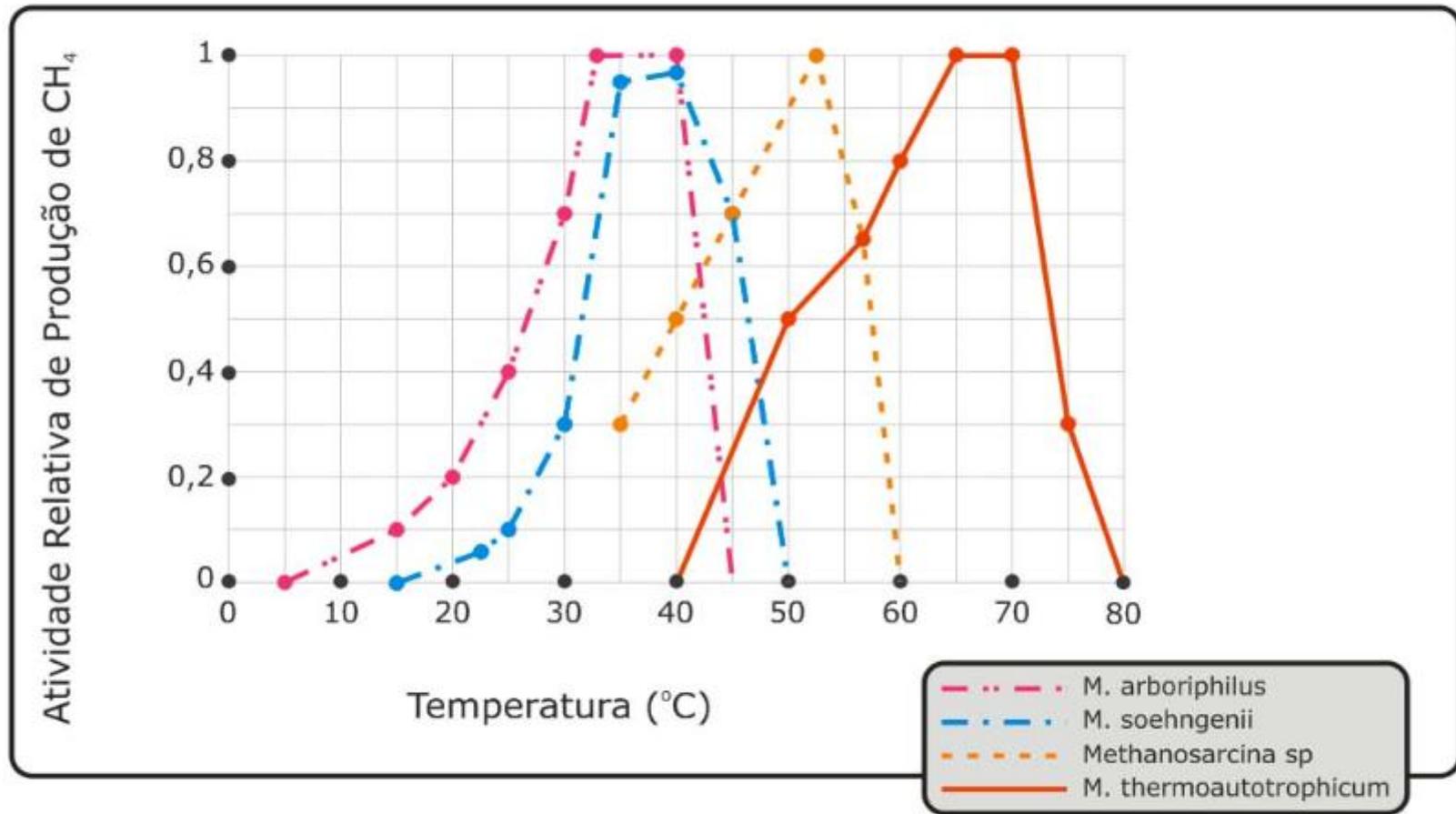
Produção de biogás – Digestão anaeróbia

- Para um bom desempenho dos reatores anaeróbios é imprescindível que os compostos sejam convertidos em precursores imediatos de metano, ou seja, acetato e hidrogênio.
- Fatores que influenciam a digestão anaeróbia: Alcalinidade e pH; Temperatura e presença de nutrientes.
- **Temperatura:**
- Provoca alterações na velocidade do metabolismo das bactérias, no equilíbrio iônico e na solubilidade dos substratos, principalmente de lipídios;
- Três limites de temperatura:
- Termofílica (50 a 65°C);
- Mesofílica (20 a 40°C);
- Psicofílica (0 a 20°C).

Crescimento e decaimento – Equação de Arrhenius



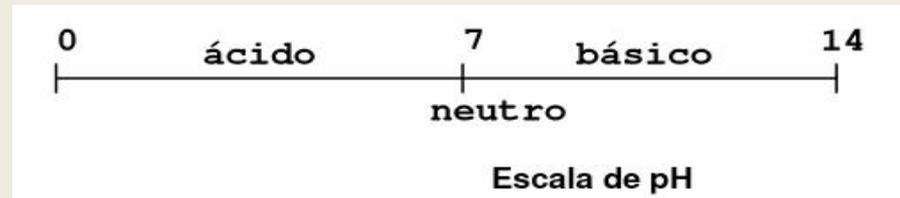
- 11% para um aumento de 1 °C.



Efeitos da Temperatura na Atividade Relativa de Produção de Metano em Bactérias Metanogênicas (BICALHO, 2007).

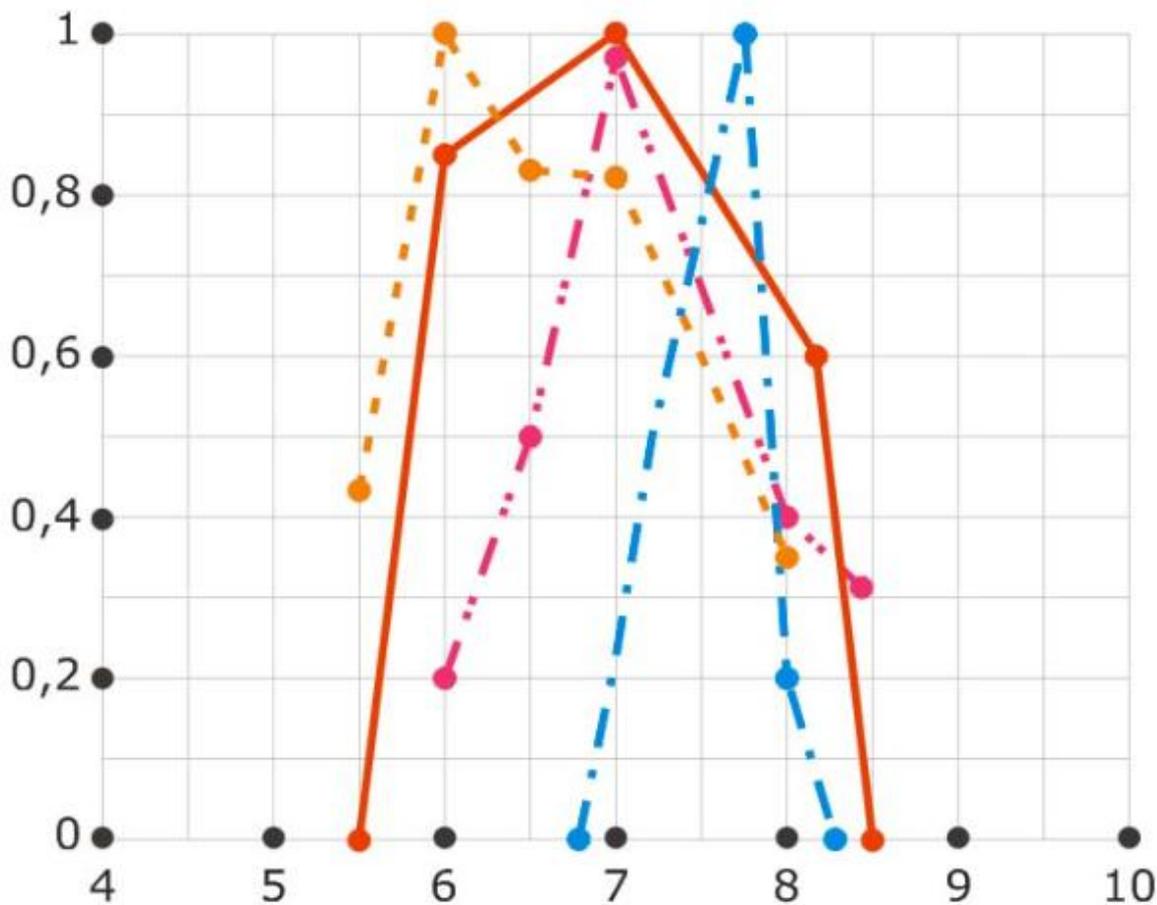
Produção de biogás – Digestão anaeróbia

- pH
- O pH é o parâmetro utilizado para avaliar as condições de acidez e basicidade;



- O pH, a alcalinidade e ácidos voláteis são fatores ambientais intimamente relacionados entre si;
- pH ótimo para a digestão anaeróbia é de 6.8 - 7.5, mas o processo ainda continua bem sucedido num limite de 6.0 - 8.0;
- Valores de pH abaixo de 6,0 e acima de 8,3 devem ser evitados, pois inibem as bactérias metanogênicas;
- O controle do pH visa a eliminação do risco de inibição das bactérias metanogênicas pelos baixos valores de pH;

Atividade Relativa de Produção de CH₄



pH

- M. arboriphilus
- M. soehngenii
- Methanosarcina sp
- M. mazei

Efeitos do pH na Atividade Relativa de Produção de Metano em Bactérias Metanogênicas (BICALHO, 2007)

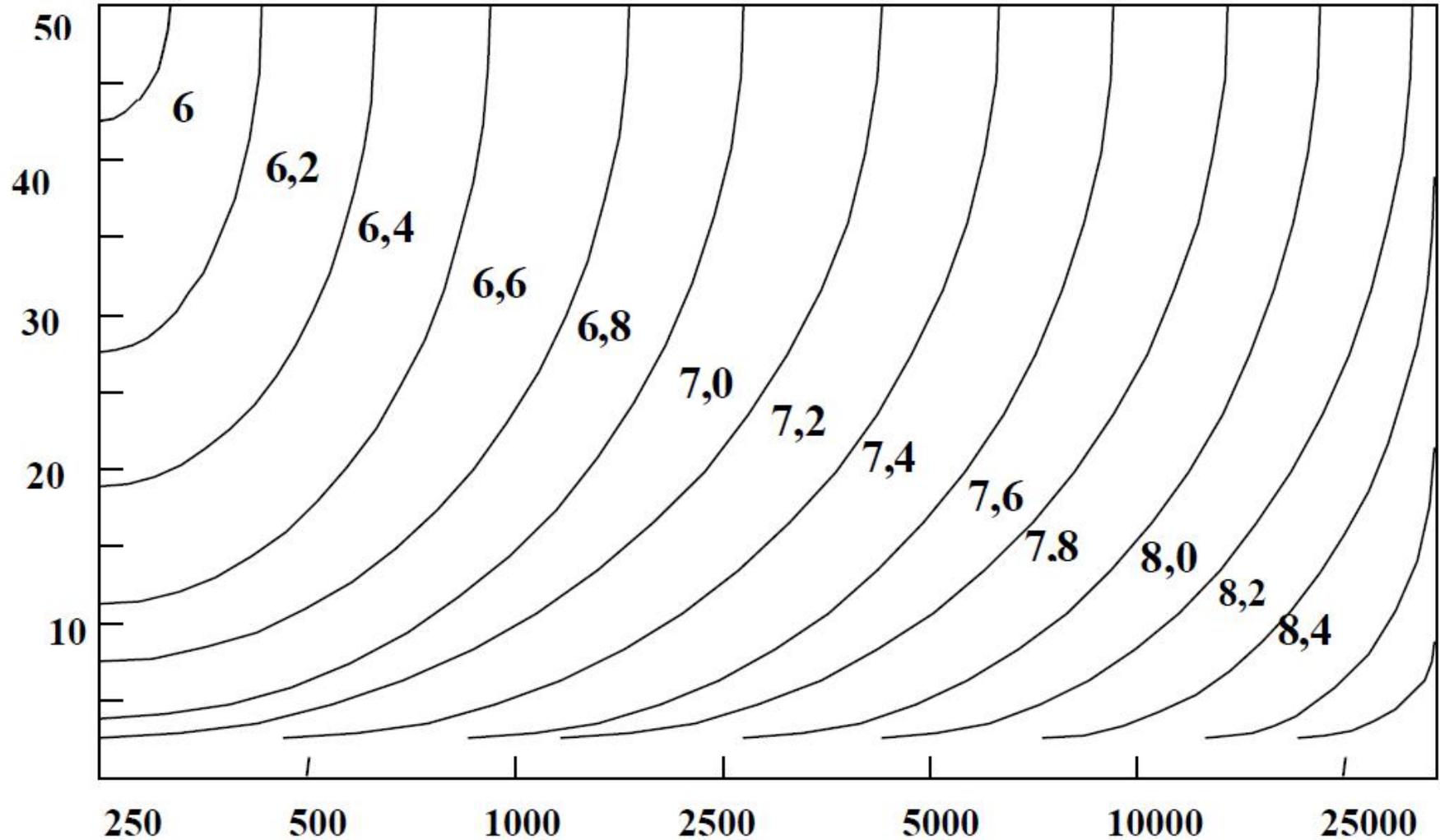
Produção de biogás – Digestão anaeróbia

- Alcalinidade

- A importância da alcalinidade é manter o sistema sempre em equilíbrio, para que não varie o pH mesmo com a produção de H+.
- A alcalinidade tem a função de neutralizar os ácidos voláteis;
- A alcalinidade total de um sistema é a soma das alcalinidades devida ao bicarbonato (AB) e aos próprios ácidos voláteis (AV):
- $AT = AB + 0,85 \times 0,833 \times AV$ onde 0,85 é a porcentagem de ácidos voláteis que são detectados, e 0,833 é o fator de transformação de CH₃COOH para CaCO₃.
- A alcalinidade tem a função de neutralizar os ácidos voláteis;
- Cal virgem – gera bicarbonato de cálcio.

A importância do bicarbonato no efeito do tamponamento.

% CO₂



Mg / l de CaCO_3

fonte : Foresti, E. (1993)

Produção de biogás – Digestão anaeróbia

- Nutrientes
- Nitrogênio (N) e fósforo (P) são os nutrientes essenciais para todos os processos biológicos;
- Em geral, admite-se que a relação DQO:N:P de 500:5:1 é suficiente para atender às necessidades de macronutrientes dos microrganismos anaeróbios (Speece, 1996);
- o enxofre (S) é também considerado um dos nutrientes essenciais para a metanogênese

Produção de biogás – Digestão anaeróbia

- Inibição:
- diminuição da temperatura;
- grandes concentrações do íon amônia (NH_4^{+-}N) que podem estar na faixa de 5000 a 7000 mg.L^{-1} ;
- concentrações de amônia (NH_3) maior que 200 – 300 mg.L^{-1} ;
- relações C/N distantes da faixa ótima de concentração de 8 – 20;
- presença de metais pesados;
- antibióticos;
- detergentes.

Produção de biogás – Digestão anaeróbia

- Agitação:
- melhor aproveitamento dos micro-organismos ao substrato, e manter a estabilidade do processo
- eliminar os gases produzidos;
- misturar o substrato aos micro-organismos;
- prevenir a formação de crosta e sedimento interno;
- evitar gradientes pronunciados de temperatura dentro do biodigestor;
- prevenir a formação de espaços inativos que possam reduzir o volume de fermentação.

Produção de biogás – Estimativa

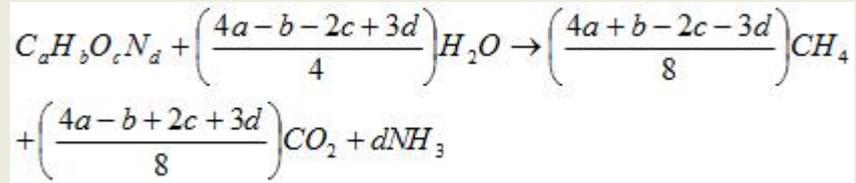
- A produção ideal de biogás pode ser calculada por meio da degradação de DQO no biodigestor;
- quantidade de oxigênio necessária para oxidar uma determinada massa de composto;
- Reação de oxidação do metano



- Um mol de metano requer dois moles de oxigênio para sua completa oxidação a gás carbônico e água
- Cada 16 gramas de CH_4 produzido e perdido para a atmosfera correspondem à remoção de 64 de DQO do resíduo. Isso corresponde a $0,25 \text{ kg } CH_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DQO}$. Em condições normais de temperatura e pressão, na qual um mole de gás metano (16 gramas) ocupa $0,0224 \text{ m}^3$, esta relação é $0,35 \text{ m}^3 CH_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DQO}$ removido.

Produção de biogás – Estimativa

- produção teórica de metano em função da degradação da biomassa



- Da expressão acima obtém-se a relação ideal de produção de metano e sólidos voláteis (litros $CH_4 \cdot g^{-1}$ SV):

$$J(CH_4, SV) = \frac{\left[\left(\frac{4a+b-2c-3d}{8}\right)22,4\right]}{(12a+b+16c+14d)}$$

Biomassa	Composição	CQO.SV ⁻¹	m ³ CH ₄ .kg ⁻¹ SV	m ³ CH ₄ .kg ⁻¹ DQO	%CH ₄
Hidrocarbonetos	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	1,19	0,415	0,35	50%
Proteínas	C ₅ H ₇ O ₂ N	1,42	0,496	0,35	50%
Lipídios	C ₅₇ H ₁₀₄ O ₆	2,90	1,014	0,35	70%

Produção de biogás – Estimativa

- Apesar do potencial teórico de biogás dar uma ideia aproximada da produção esperada, essa produção será inferior, devido a vários fatores, entre os quais:
- uma fração de biomassa é utilizada, entre 5 a 10 %, é utilizada pelos micro-organismos para sintetizar material celular;
- uma parte do material é perdido com o efluente;
- compostos fibrosos não são degradados;
- limitações devido a insuficiência de nutrientes;
- parte do material pode não ser acessado pelos micro-organismos.
- Com isso a conversão da biomassa em metano pelos micro-organismos, pode variar de 60 a 95 %, ou seja, 0,21 a 0,33 m³ CH₄.kg⁻¹ de DQO removida.

Produção de biogás – Estimativa

- Equação para estimar a produção de biogás:

$$PB = \frac{V_{ef} \cdot (DQO_e) \cdot Y}{C_{CH_4}}$$

- V_{ef} é a vazão de biomassa através do sistema de biodigestão anaeróbia ($m^3 \cdot dia^{-1}$);
- DQO_e é o valor médio da demanda química de oxigênio da biomassa residual removida (kg de DQO/ m^3 de biomassa ou g/mL);
- Y é a produção de metano por kg de DQO_e removida ($m^3 CH_4 \cdot kg^{-1} DQO_e$)
- C_{CH_4} é a concentração de metano no biogás (0 a 1).

Produção de biogás – Estimativa

(a) Porca reprodutora em ciclo fechado;

(b) Porca reprodutora em criações de leitões.

Animal		Biogás ($m^3.kg^{-1}$ SV)	Biogás ($m^3.animal^{-1}.dia^{-1}$)
Suínos	Porca reprodutora (a)	0,45	0,866
		0,45	0,933
	Porca reprodutora (b)	0,45	0,799
	Porco em engorda		
Bovinos	Vaca leiteira	0,28	0,980
	Bezerro	0,28	0,294
	Bovino de engorda	0,28	0,392
Galináceos	Galinha poedeira	0,46-0,77	0,010-0,017
	Frango de engorda	0,13	
Indústria			Biogás ($m^3.kg^{-1}$ de mat. org.)
Leite e derivados			0,60
Processamento de legumes			0,60
Processamento de fruta			0,55
Matadouros			0,45
Processamento de carne			0,50
Cervejarias			0,50
Indústria de papel			0,35

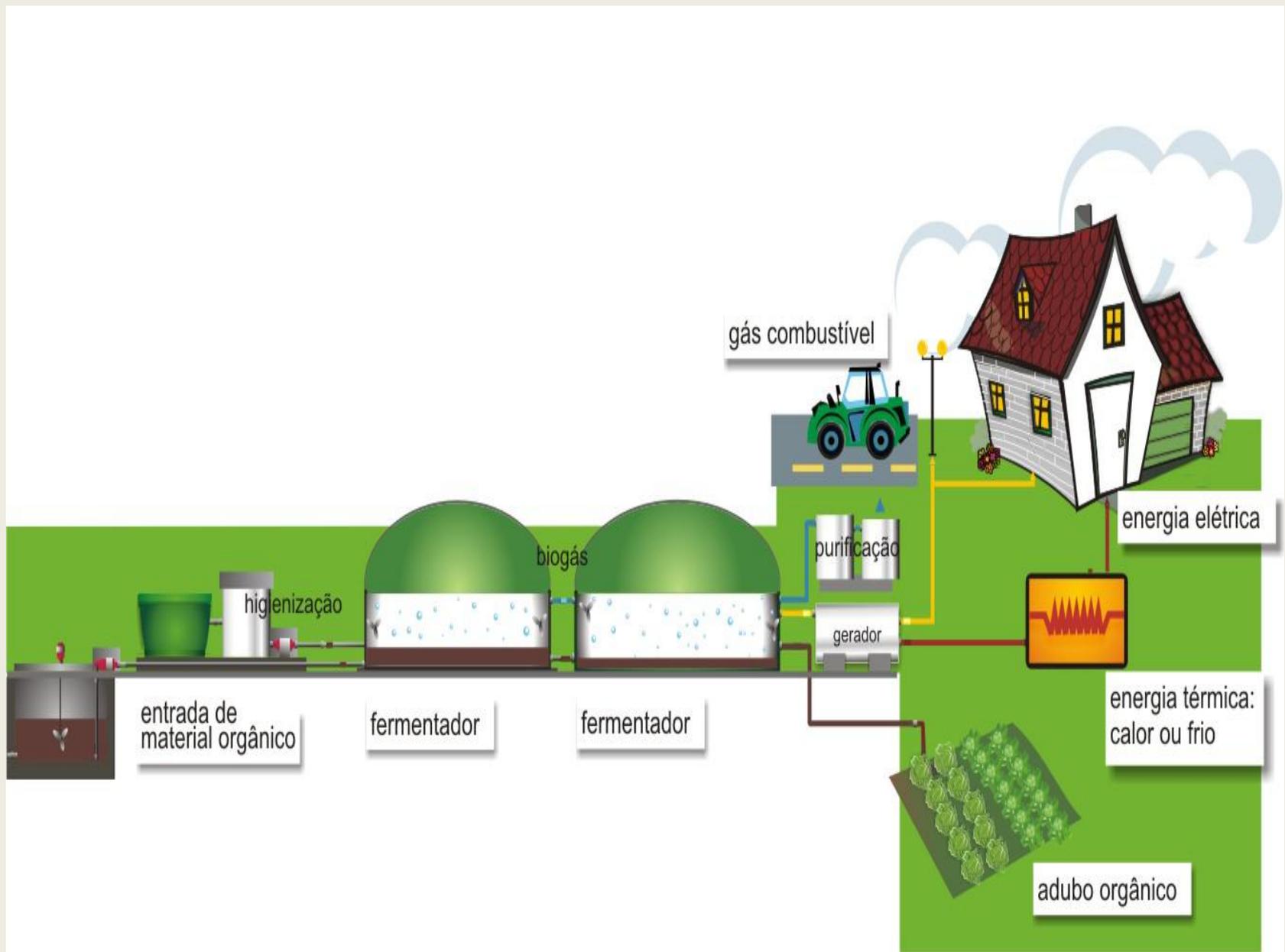
Produção de biogás – Biodigestores

- consistem basicamente numa câmara de fermentação, onde é processada a biodigestão da matéria orgânica;
- Função: saneamento, o atendimento de uma demanda energética e a utilização do material biodegradado como fertilizante;

Classificação de biodigestores

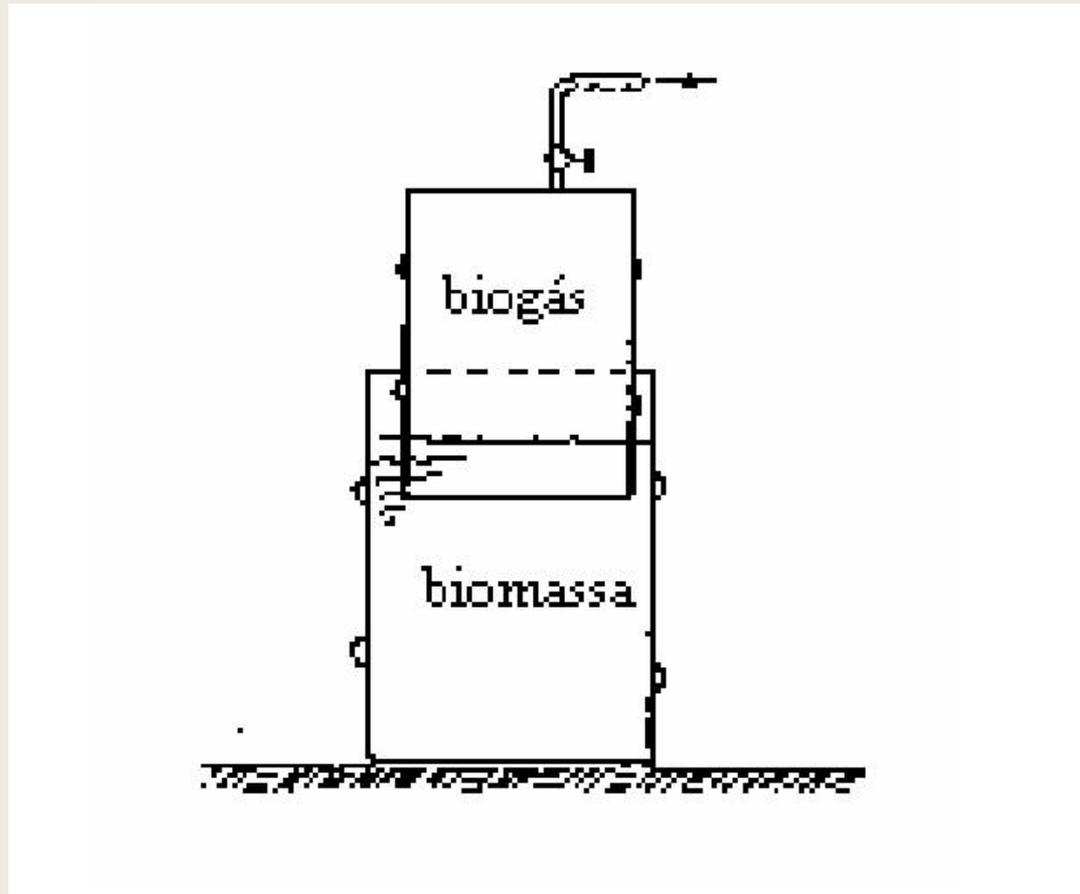
Tipo de operação	Forma de construção	Armazenamento de biogás	Faixa de temperatura	Fluxo do material
batelada (fixa)	enterrada	gasômetro	criofílico	vertical
semi-contínua	semi-enterrada	gasômetro externo	mesofílico	horizontal
contínua	externa		termofílico	ascendente

Produção de biogás – Biodigestores



Produção de biogás – Biodigestores

- **Batelada Simples** – os outros tipos podem ser considerados uma variação dessa concepção;
- O resíduo é colocado misturado com água no tambor;
- Preparação de inócuo.



Produção de biogás – Biodigestores

- Batelada em plástico – mesofílico, com gasômetro externo e sem agitação.

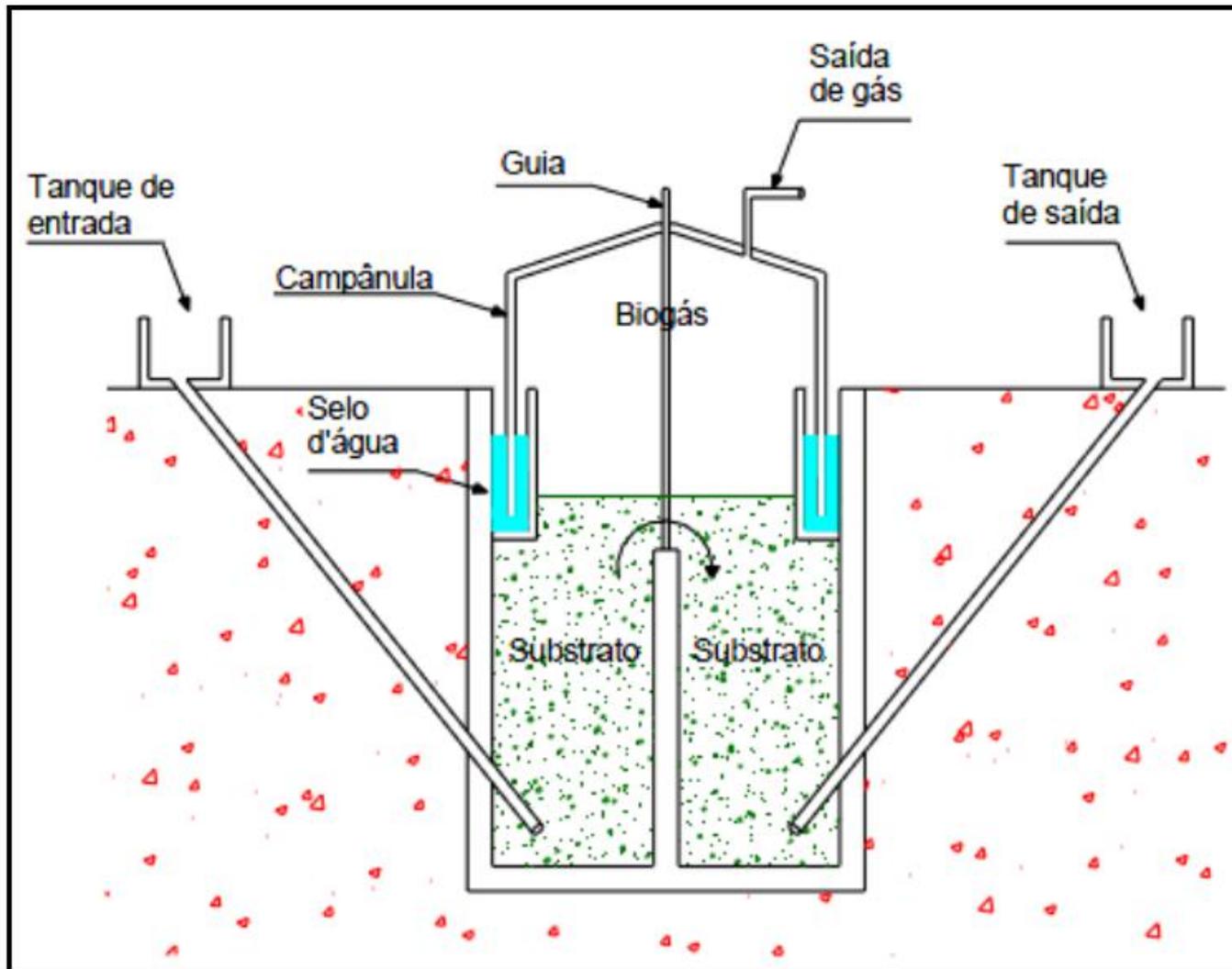


Produção de biogás – Biodigestores

- **Modelo Indiano**
- Possui uma campânula flutuante com gasômetro – pressão constante;
- O reservatório de fermentação possui duas câmaras;

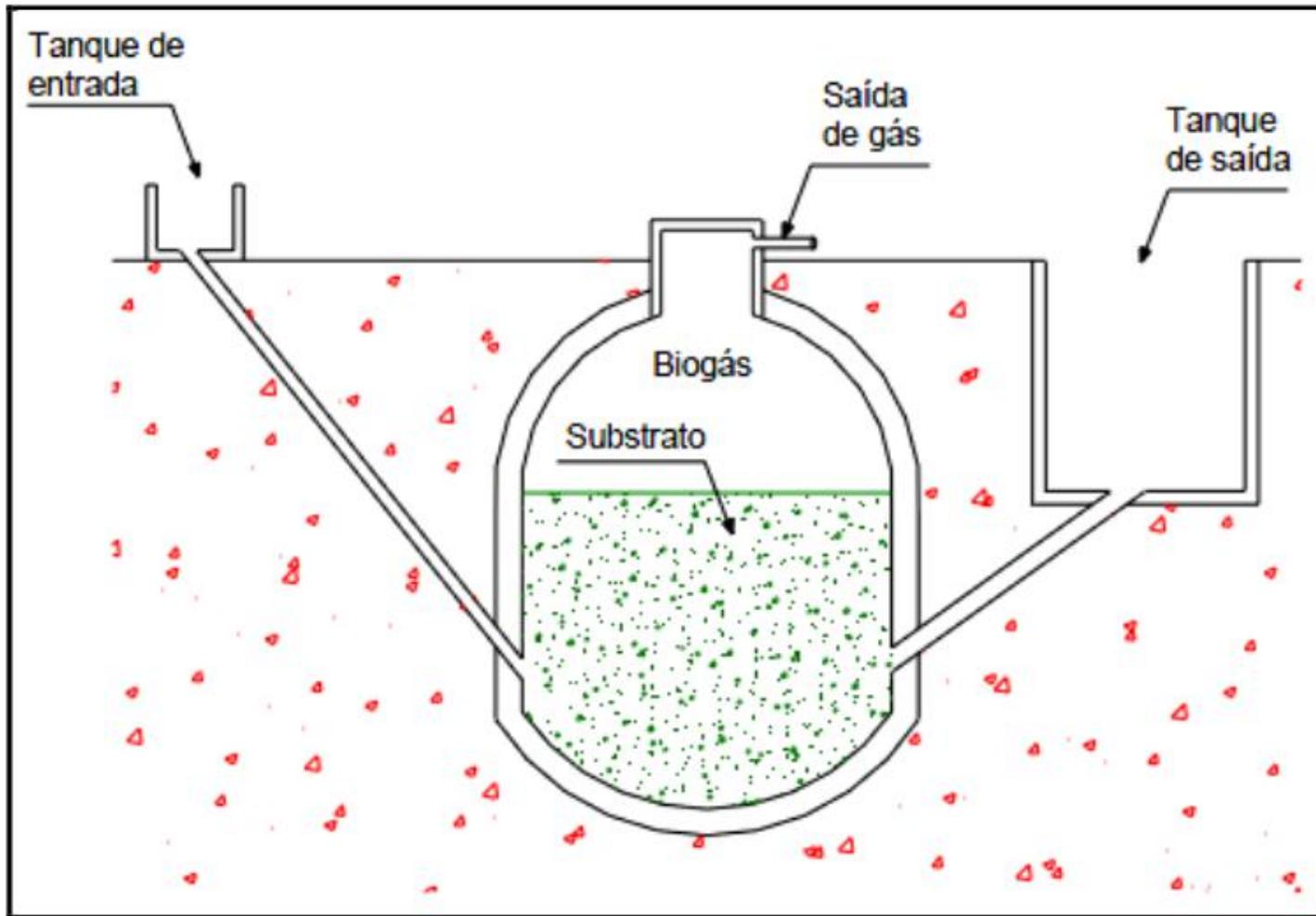
- **Modelo Chinês**
- Difere do indiano por não dispor de um gasômetro;
- Gás é produzido a uma pressão variável;
- O gás é armazenado no corpo do reator;
- Enterrado no solo com teto em forma de abóboda.

Produção de biogás – Biodigestores



Biodigestor modelo indiano.

Produção de biogás – Biodigestores

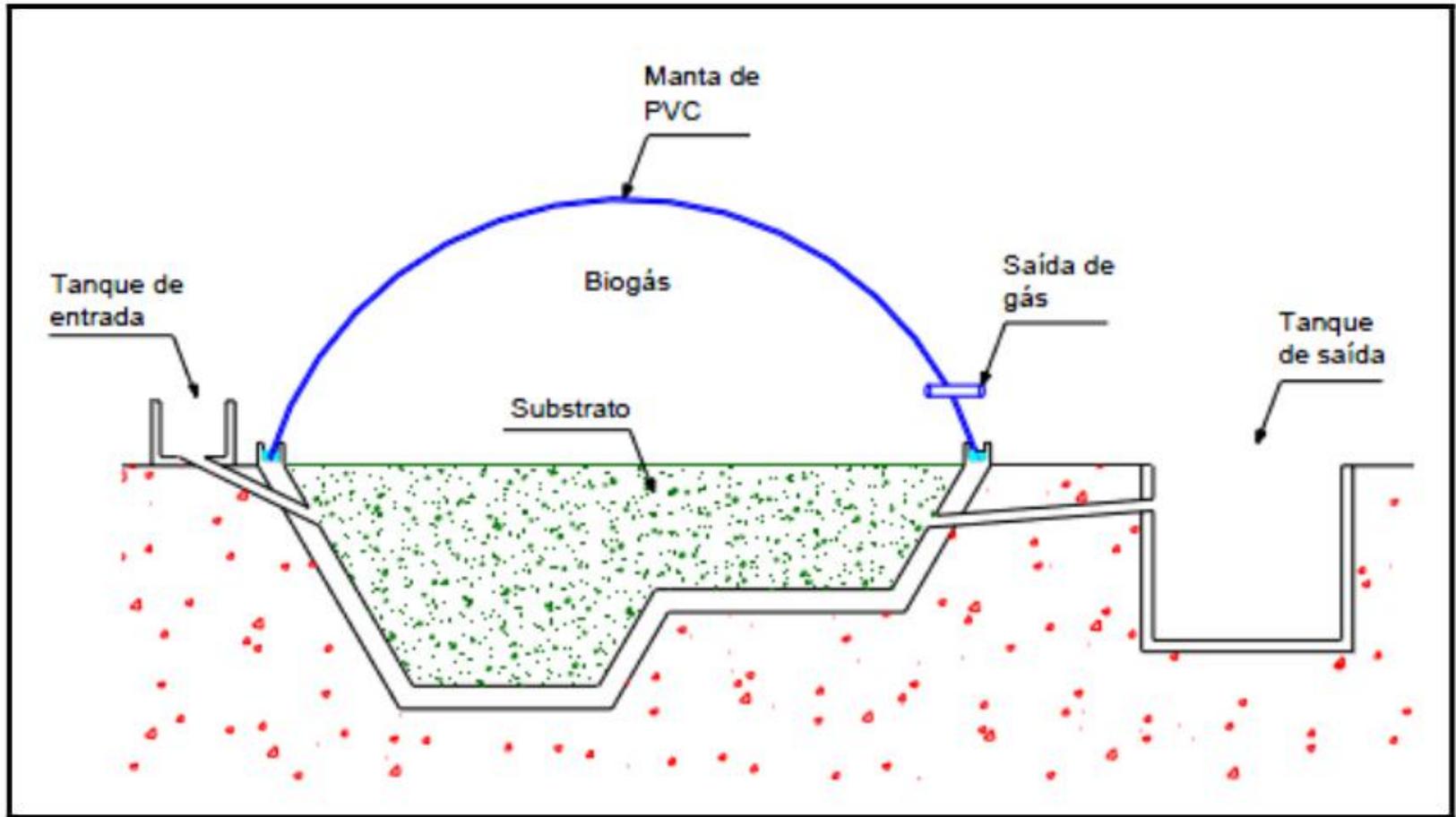


Biodigestor modelo chinês.

Produção de biogás – Biodigestores

- **Modelo Tubular, Canadense, lagoa anaeróbia coberta ou plug-flow ;**
- A biomassa tem entrada contínua em uma das extremidades do biodigestor, passa através do mesmo e é descarregada na outra extremidade, na mesma sequência em que entrou;
- As partículas mantêm sua identidade e permanecem no tanque por um período igual ao **tempo de retenção/detenção hidráulica;**
- Elevada relação comprimento-largura, na qual a dispersão longitudinal é mínima - possuem uma relação largura:comprimento igual ou superior a 1:5;
- operam com tempos de retenção de mais de 15 dias;
- teores de sólidos entre 11 e 13%;
- São reatores de baixa carga orgânica volumétrica (COV);
- O mais difundido no Brasil.

Produção de biogás – Biodigestores



Biodigestor modelo canadense.

Produção de biogás – Biodigestores



Produção de biogás – reatores anaeróbios de Alta Taxa

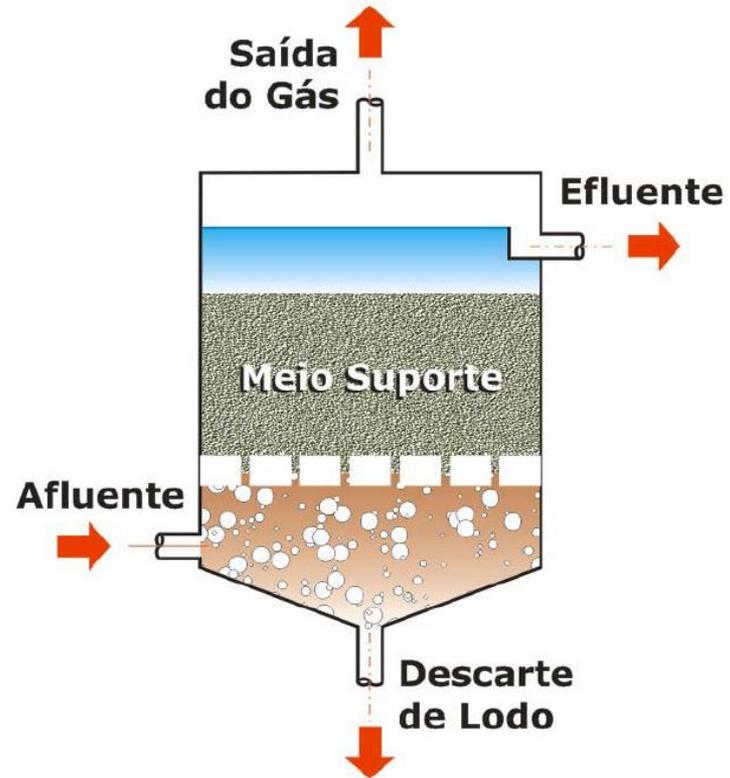
- **Reatores de alta taxa:**
- caracterizam pela capacidade em reter grandes quantidades de biomassa, de elevada atividade, mesmo com a aplicação de baixos tempos de detenção hidráulica;
- elevado tempo de detenção celular;
- reatores compactos, com volumes bastante inferiores aos digestores anaeróbios convencionais (biodigestores);
- dois tipos de crescimento da biomassa: aderido ou crescimento disperso;

- **Aderido:** biomassa cresce aderida a um meio de suporte, formando um biofilme;
- **Reatores/Aderido são:** reatores de leito fixo, reatores de leito expandido e fluidificado, e outros;

- **Disperso:** depende em grande parte, da capacidade da biomassa em formar flocos e sedimentar;
- **Reatores/Disperso:** reatores de dois estágios, os reatores de chicanas, os reatores de leito granular expandido, os reatores com recirculação interna e os reatores de manta de lodo.

Produção de biogás – Alta Taxa - Aderidos

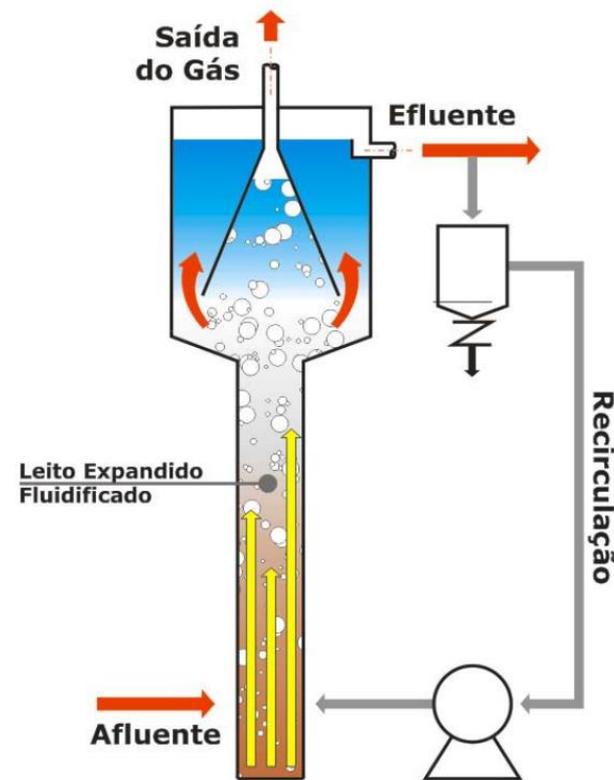
- Leito fixo/filtro anaeróbio:
- possuem um meio de suporte onde os sólidos se aderem criando uma massa de micro-organismos que degrada o material orgânico existente no afluente;
- tratamento biológico/importância: são o tempo de residência de sólidos e as concentrações de micro-organismos;



Reatores de Leito Fixo (adaptado de CHERNICHARO, 2008)

Produção de biogás – Alta Taxa - Aderidos

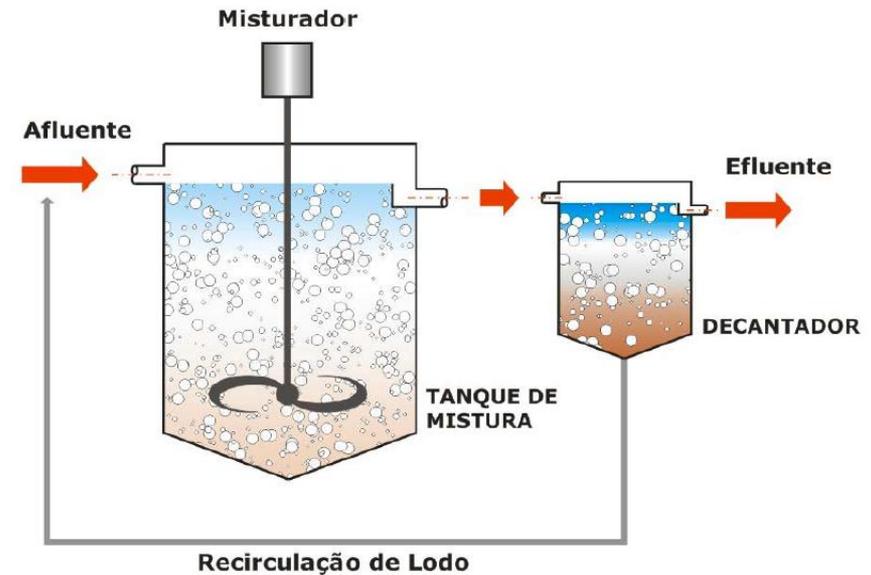
- Leito expandido e fluidificado:
- biomassa se desenvolve em filmes de fina espessura que são juntados a partículas de tamanho bastante reduzido, ao contrário dos processos de leito estacionário (onde ocorre um biofilme e meio de suporte de dimensões superiores);
- Aumento do tempo de retenção da biomassa e diminuição do tempo de detenção hidráulica;



Reatores de Leito Expandido e Fluidificado (adaptado de CHERNICHARO, 2008)

Produção de biogás – Alta Taxa - Dispersos

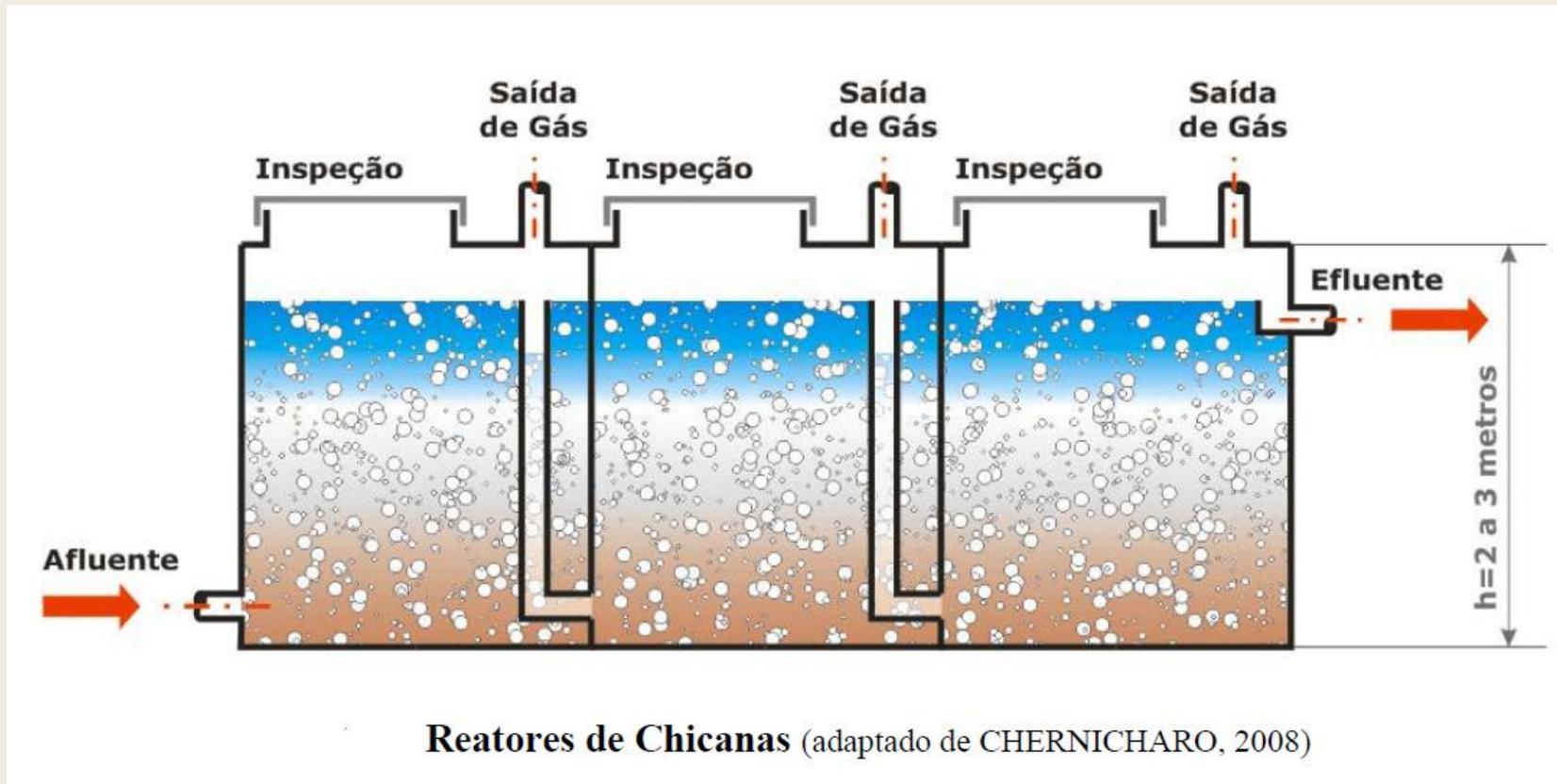
- Dois estágios:
- tanque de mistura completa somado a um dispositivo de segregação e retorno de sólidos;
- a biomassa floculada no reator, agregada aos sólidos afluentes não digeridos, tenha retenção em um dispositivo de segregação de sólidos para ser reencaminhada ao reator de primeiro estágio, onde receberá o esgoto afluente para mistura.



Reatores de Dois Estágios (adaptado de CHERNICHARO, 2008)

Produção de biogás – Alta Taxa - Dispersos

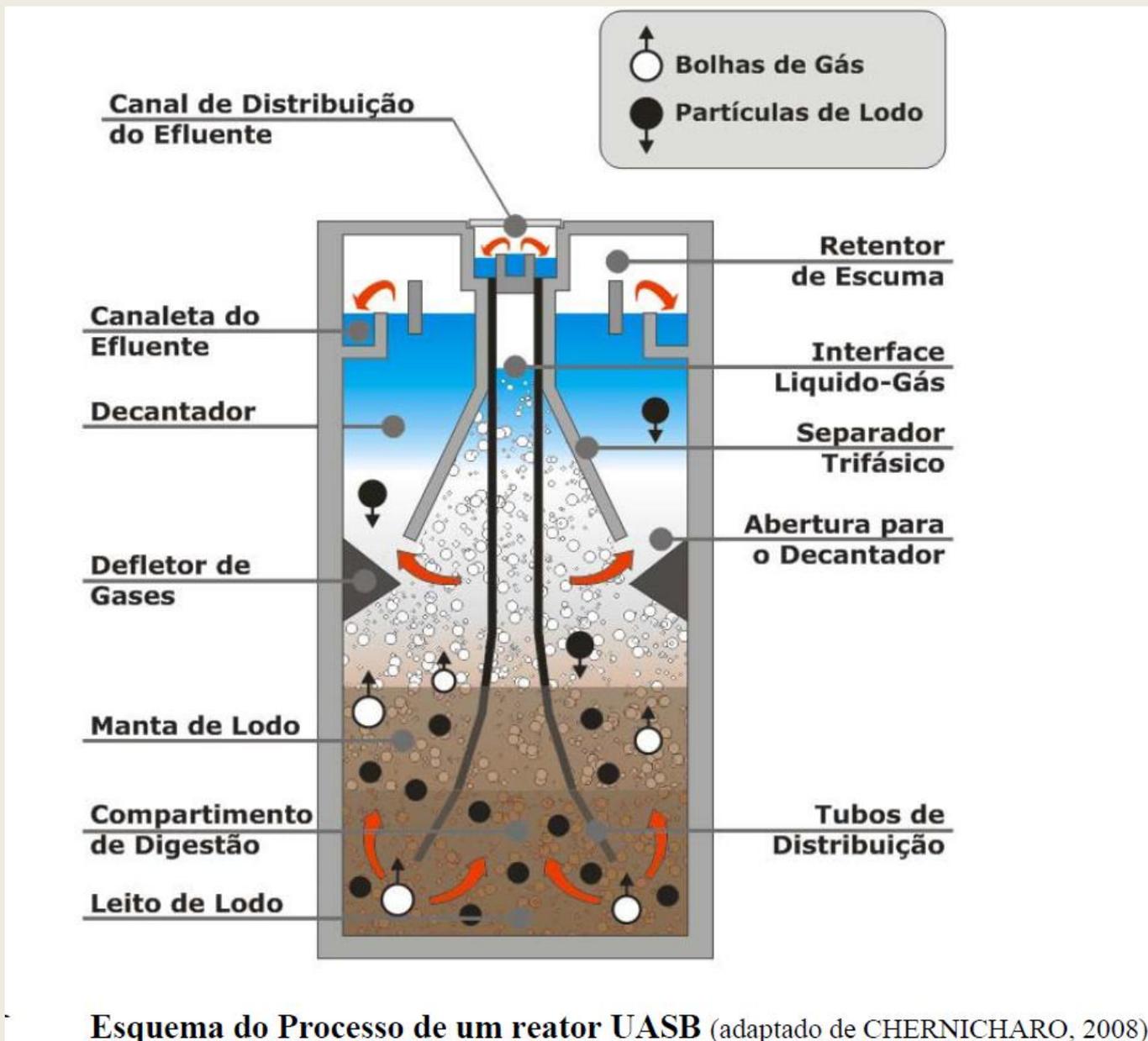
- Chicanas:
- Dotados de chicanas verticais que promovem um movimento ascensional e descensional que garante um melhor contato do afluente com a biomassa existente no fundo dos tanques.



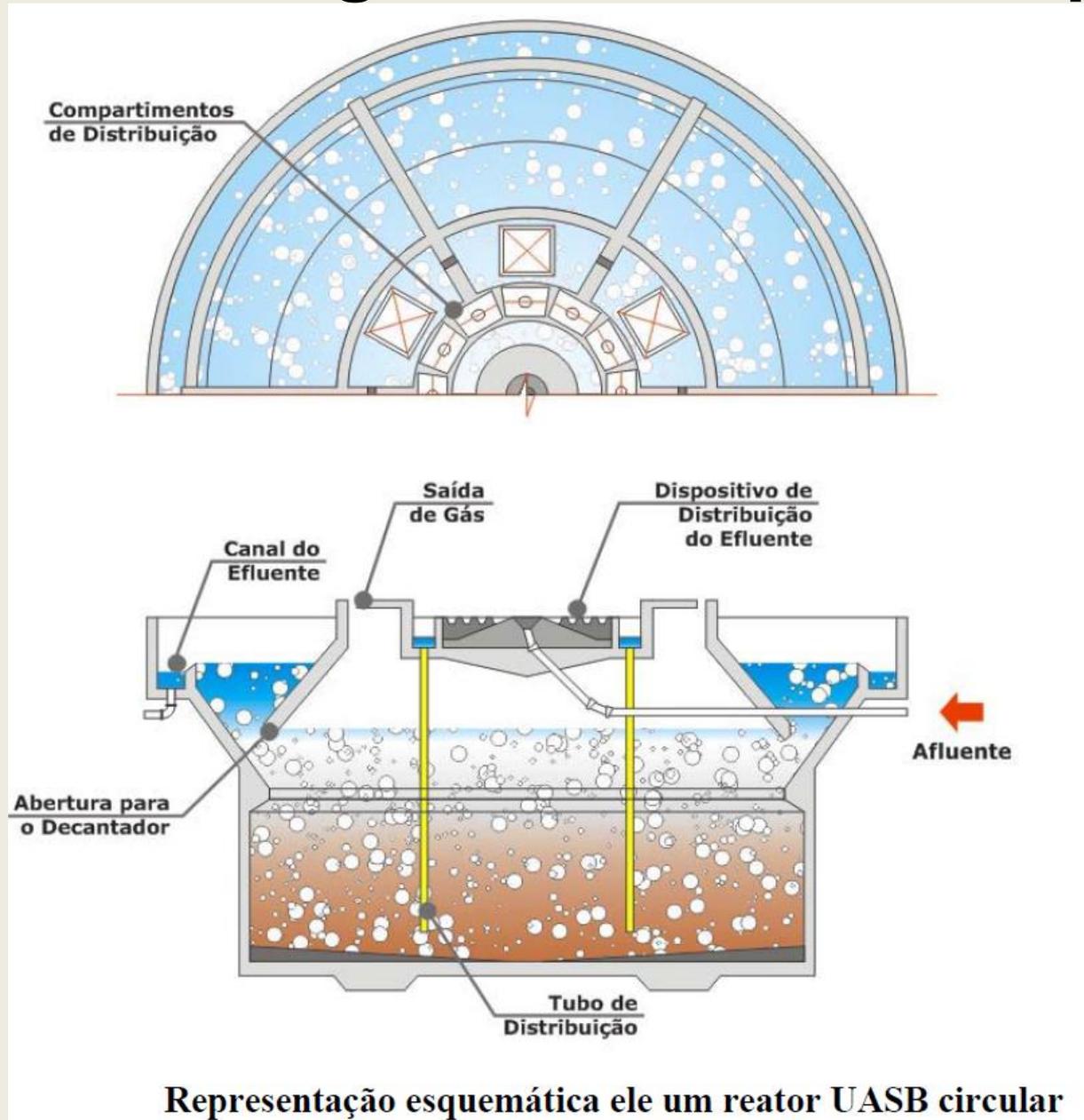
Produção de biogás – Alta Taxa - Dispersos

- **Manta de lodo (UASB):**
- O processo utilizado visa a segregação dos gases, sólidos e líquidos;
- têm como principais parâmetros o controle dos tempos de detenção de sólidos e hidráulico, as cargas volumétricas orgânicas e hidráulicas, bem como a velocidade ascensional;
- lodo formado é sedimentado e fica concentrado na parte inferior do reator, sendo mantido em suspensão pela ação ascendente dos efluentes sanitários;
- ação dos micro-organismos anaeróbios da “Manta de Lodo” sobre a matéria orgânica nos efluentes;
- Após esta passagem pela manta de lodo, o líquido se direciona para uma zona de decantação existente na parte superior do reator;

Produção de biogás – Alta Taxa - Dispersos



Produção de biogás – Alta Taxa - Dispersos



Produção de biogás – Carga orgânica volumétrica no reator

- Carga orgânica volumétrica:
- É a quantidade de matéria orgânica (massa) aplicada diariamente ao reator, por unidade de seu volume.
- cargas orgânicas inferiores a 15 kgDQO/m³.d para projeto de volume de reatores UASB;
- **Dimensionamento do volume do reator** pela carga orgânica.

$$V = \frac{Q \times S}{COV}$$

$$COV = \frac{Q \times S}{V} \quad (1)$$

onde:

COV = carga orgânica volumétrica (kgDQO/m³.d);

Q = vazão (m³/d);

S = concentração de substrato afluente (kgDQO/m³);

V = volume total do reator (m³).

Produção de biogás – Carga hidráulica no reator

- **Carga hidráulica volumétrica:**
- volume de efluente introduzido diariamente no reator por unidade de seu volume.

- **Dimensionamento do volume do reator** pelo tempo de detenção hidráulica.

$$V = Q \times TDH$$

$$TDH = \frac{V}{Q}$$

onde:

TDH = tempo de detenção hidráulica (d);

V = volume total do reator (m³)

Q = vazão (m³/d).

$$CHV = \frac{Q}{V}$$

Onde:

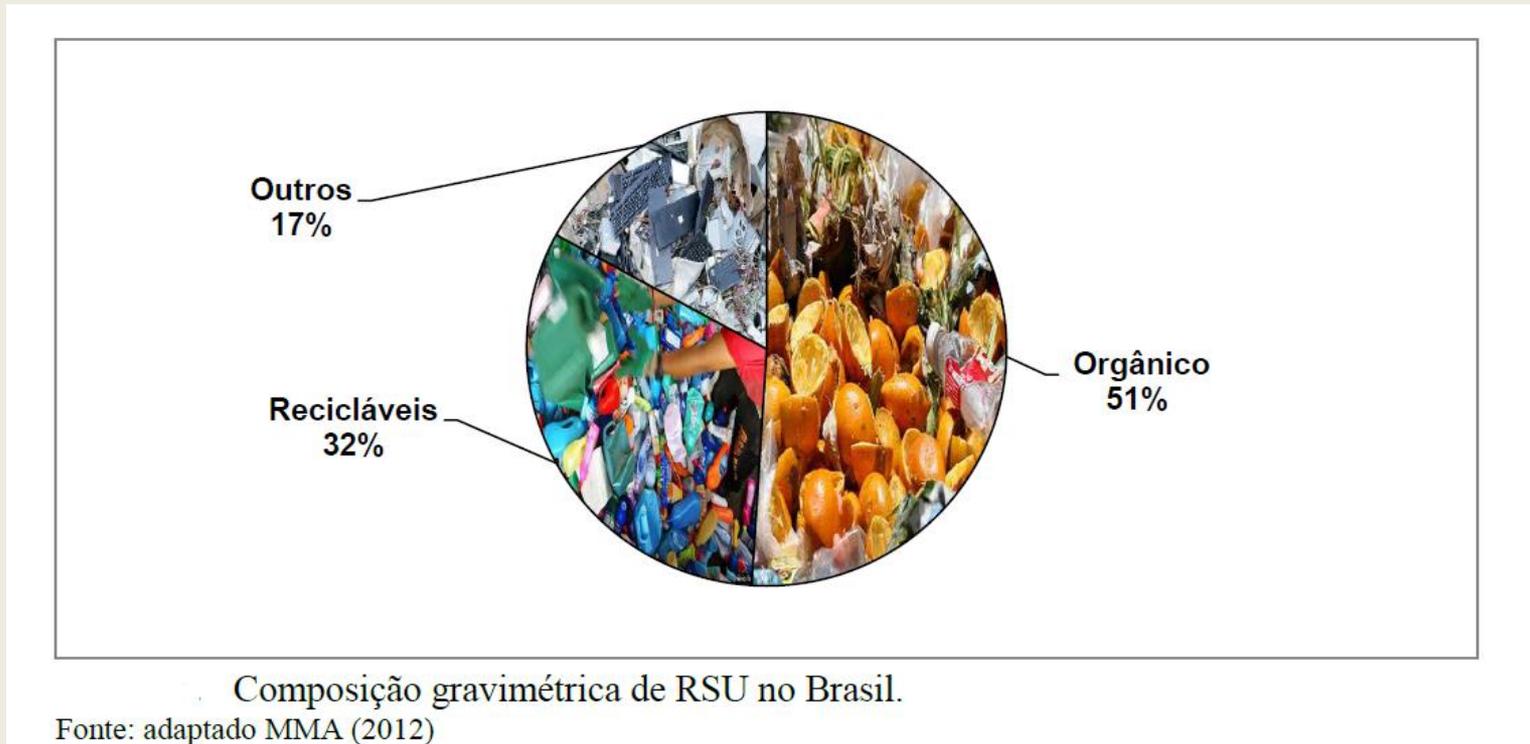
CHV = carga hidráulica volumétrica (m³/m³.d).

ou

$$CHV = \frac{1}{TDH}$$

Produção de biogás – Aterro Sanitário

- Composição do lixo:
- O lixo no Brasil é composto com 51% de matéria orgânica, a qual pode ser degradada no aterro sanitário para produção de gás de aterro ou em reatores para produção de biogás.



Produção de biogás – Aterro Sanitário

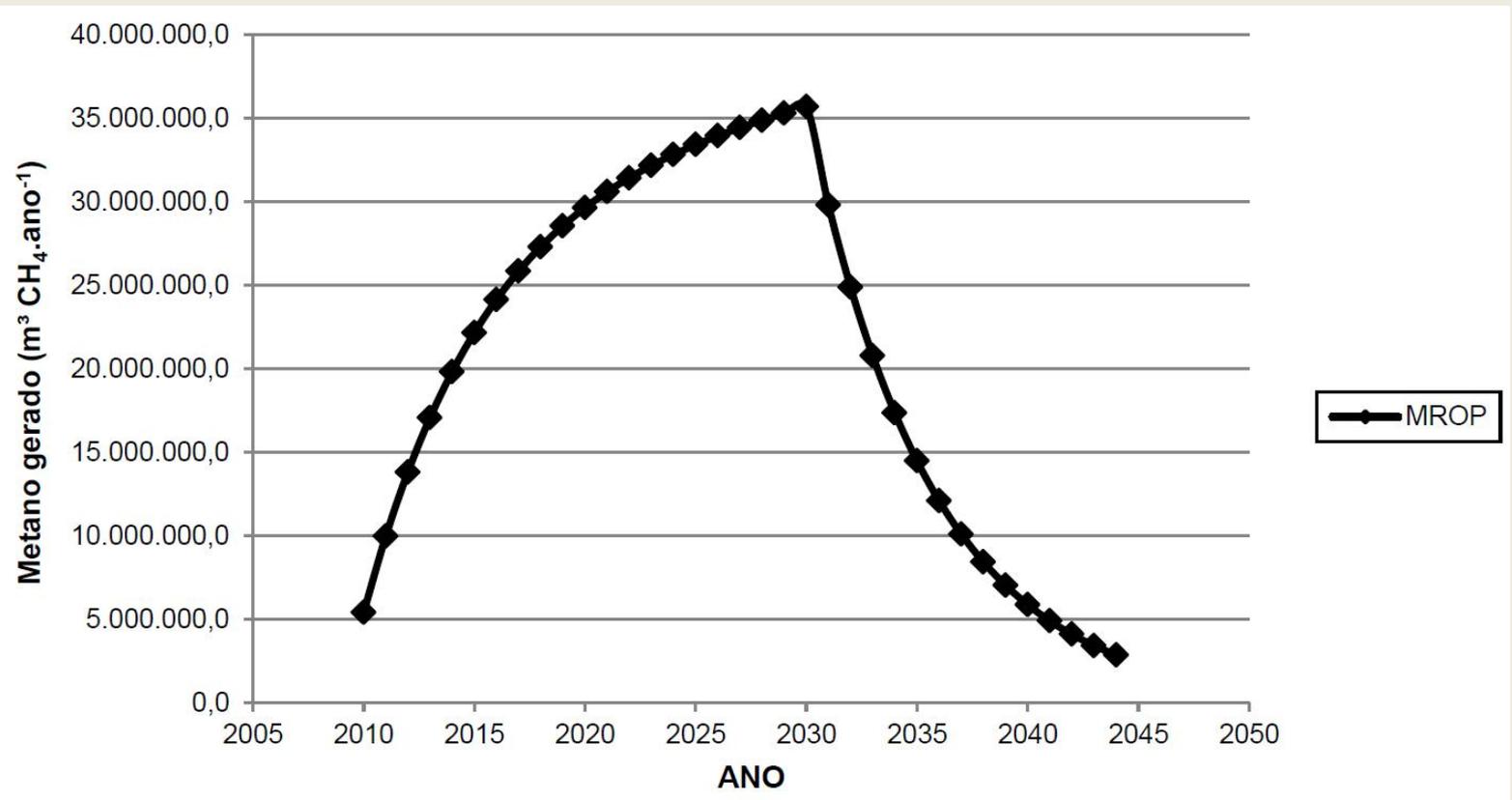
- Digestão anaeróbia no aterro:
- A formação e a taxa de geração dos gases constituintes do biogás de aterro são variáveis ao longo do tempo.

Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário

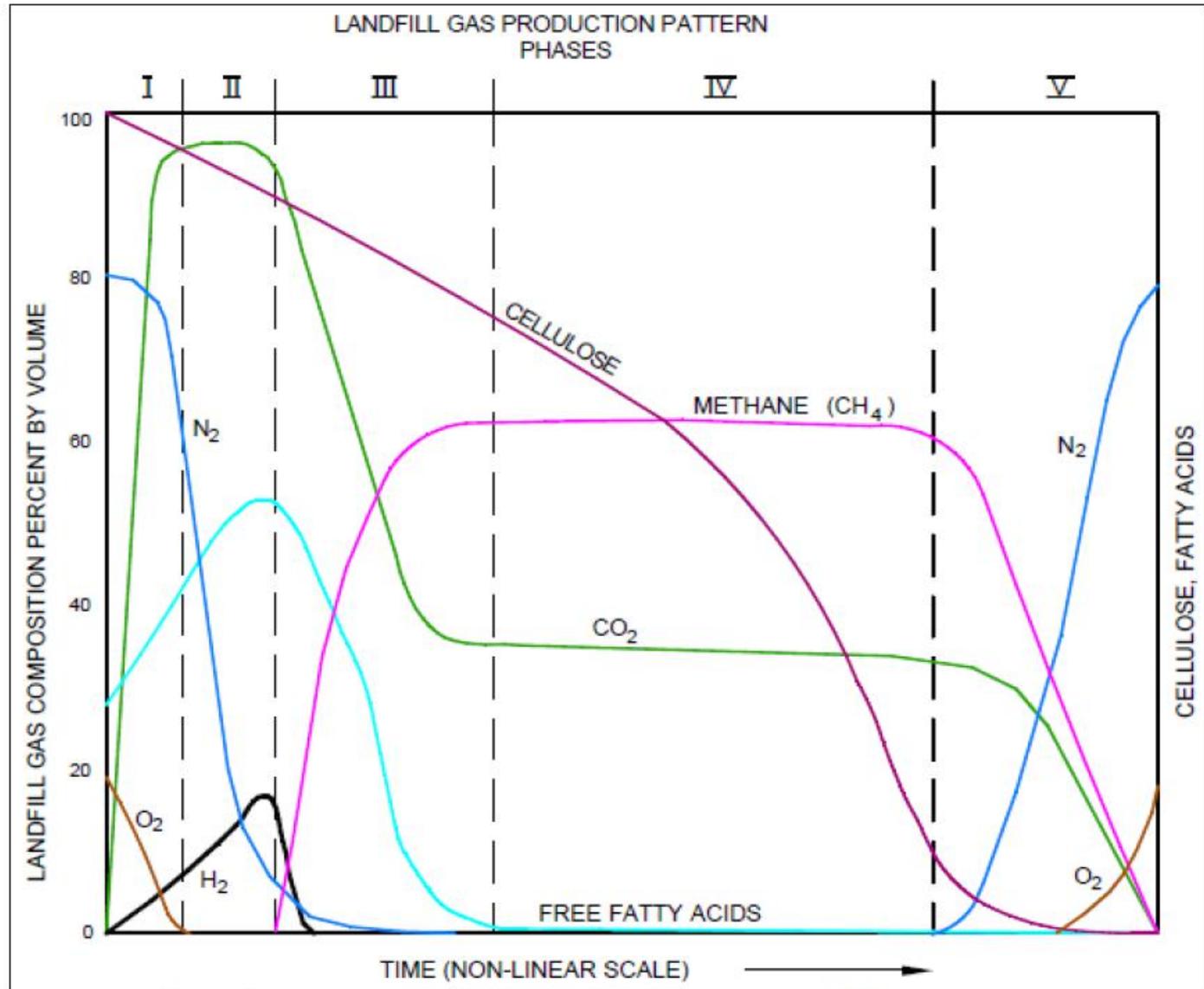
Fases	Condição	Período típico
I	Aeróbia	Horas a 1 semana
II	Anóxica	3 meses a 3 anos
III	Anaeróbia, metanogênica, instável	8 a 40 anos
IV	Anaeróbia, metanogênica, estável	1 a 40 anos
V	Anaeróbia, metanogênica, declinante	10 a 80 anos

Fonte: ESMAP (2004)

Produção de biogás – Aterro Sanitário



Produção de biogás – Aterro Sanitário



Fases típicas de produção do biogás em um aterro sanitário.

Fonte: ESMAP (2004).

Produção de biogás – Aterro Sanitário

- **Fase I**
- presença de ar no interior do aterro, decomposição biológica em condições aeróbias;

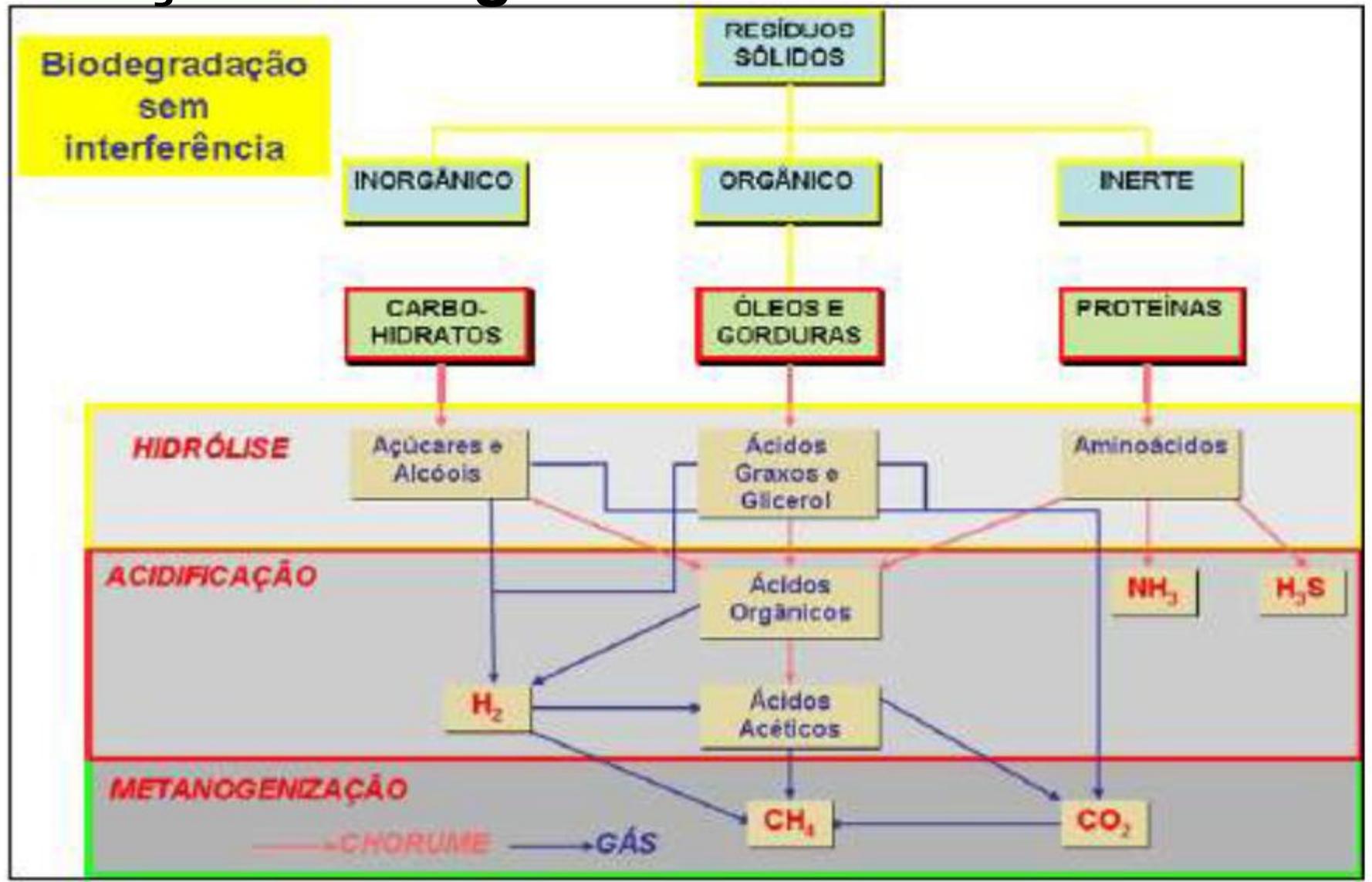
- **Fase II**
- decaimento do oxigênio e inicia a reação anaeróbia;
- conversão do material orgânico complexo em compostos orgânicos simples e produtos intermediários.

- **Fase III (ácida)**
- Essa etapa é denominada hidrólise, a qual se inicia com a transformação enzimática dos constituintes de maior massa molecular;
- A etapa seguinte é a acidogênese, em que ocorre a transformação microbiológica dos constituintes resultantes da hidrólise em compostos intermediários com massa molecular menor ;
- O principal gás gerado durante essa fase é o dióxido de carbono.

Produção de biogás – Aterro Sanitário

- **Fase IV (metanogênica)**
- produção do metano predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH₄ e CO₂.
- **Fase V (maturação)**
- A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta.

Produção de biogás – Aterro Sanitário



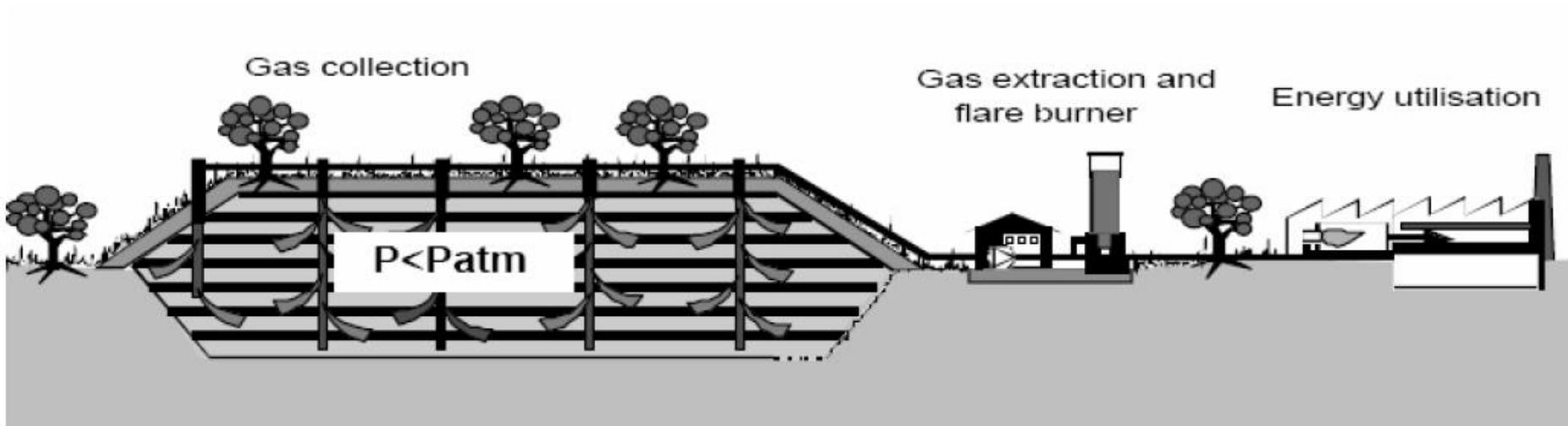
Produção de biogás – Aterro Sanitário

- Produção de biogás por tonelada de resíduo (lixo) ano segundo referências



Produção de Biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{Gg}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$)	Referência
0 a 240	Maciel (2003)
0,8 a 20	Willumsfn e Bach (1991)
1 a 14	El- Fadel et al. (1997)

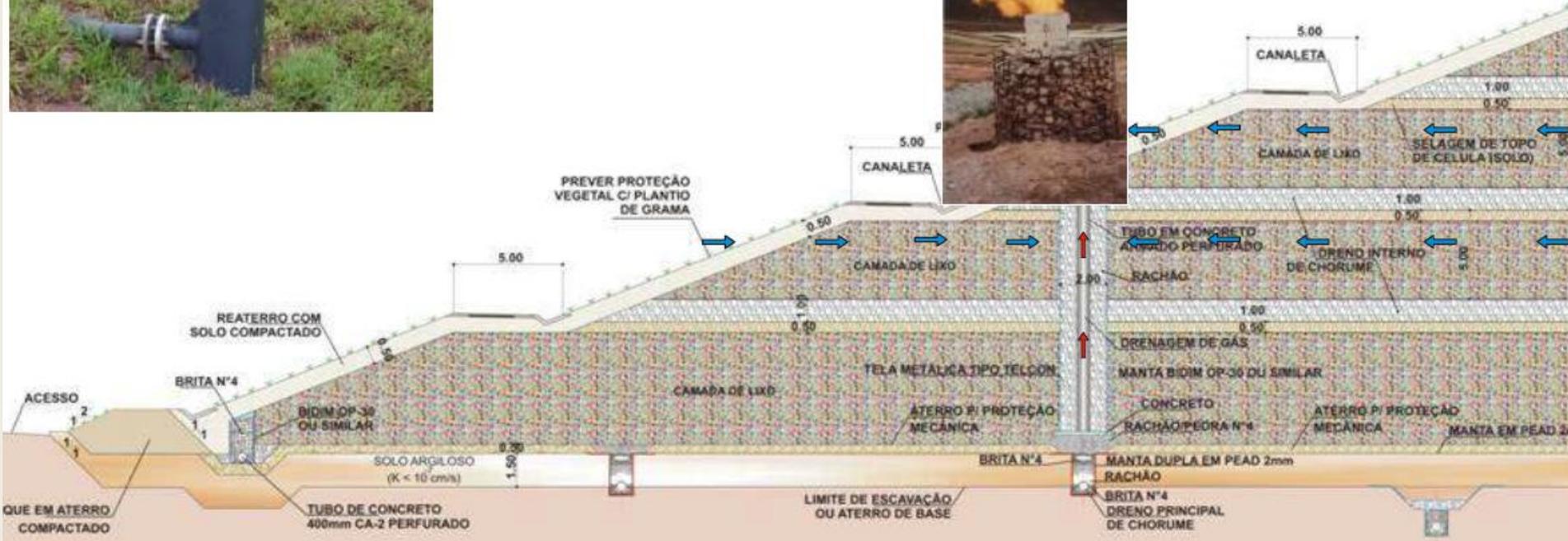
Produção de biogás – Aterro Sanitário



Degasifying and energy utilization scheme for a landfill gas to energy project.

- 80% do biogás produzido é gerado nos primeiros 10 anos;
- 125 m³ de CH₄ por tonelada de lixo (40 anos);

Produção de biogás – Aterro Sanitário



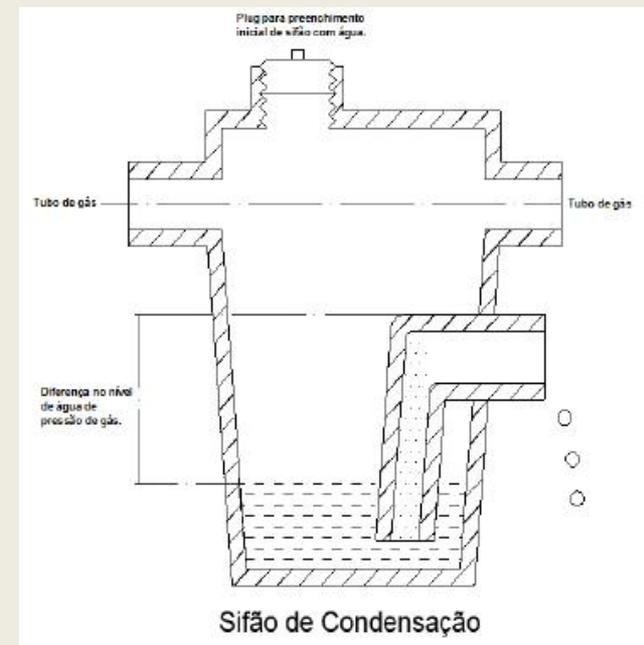
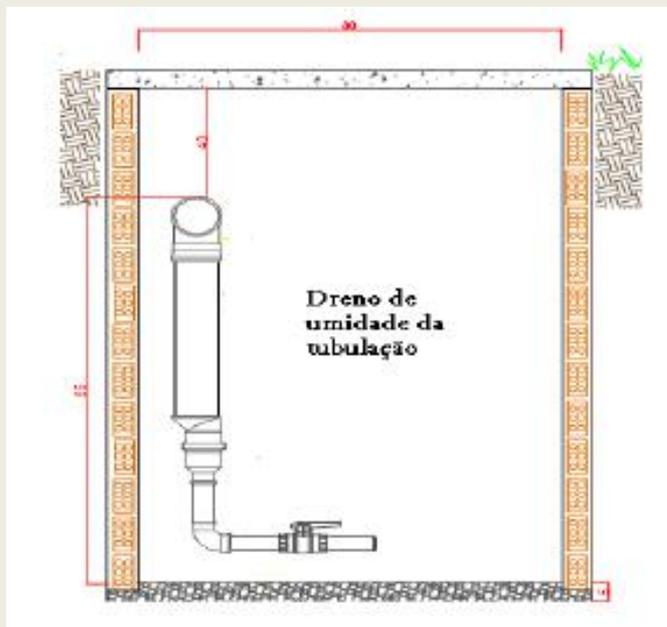
Purificação do biogás

- A purificação do biogás provindo dos biodigestores consiste, normalmente, na remoção de componentes que comprometam sua utilização;
- Remoção de H_2S , CO_2 e Umidade;
- combustível em motores geradores, os principais componentes a serem removidos são aqueles corrosivos, em especial o ácido sulfídrico e a umidade;
- Para utilização veicular tem-se que remover o CO_2 e o H_2S ;

Aplicação	H_2S	CO_2	H_2O
Caldeira	<1000 ppm	não	Não
Fogão	sim	não	Não
Motor estacionário	<1000 ppm	não	evitar condensação
Combustível veicular	sim	sim	Sim
Rede de gás	sim	sim	Sim

Purificação do biogás - Umidade

- O biogás ao sair do biodigestor contém em sua composição água na forma de vapor;
- Ao ser transportado em tubulações (superfícies mais frias) até o uso final, o vapor condensa e pode bloquear a canalização;
- a presença de umidade pode alterar certas características do biogás como: o poder calorífico, os limites de inflamabilidade e a razão ar/combustível;
- favorecer o processo de corrosão dos equipamentos;
- o processo de remoção da água presente no biogás baseia-se normalmente na condensação e/ou secagem do gás .



Purificação do biogás – H₂S

- O sulfeto de hidrogênio é formado durante a redução microbiológica dos compostos sulfurosos (sulfatos, peptídeos e aminoácidos);
- sua remoção faz-se necessária para evitar que seu alto poder de corrosão danifique os equipamentos de compressão, armazenamento e utilização do biogás;
- Os métodos mais conhecidos de redução do sulfeto de hidrogênio no biogás são: dessulfurização biológica, adição de cloreto de ferro ao biodigestor, remoção por óxidos de ferro, remoção com carvão ativado e absorção em solução de hidróxido de sódio com água.

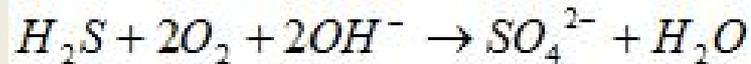
Purificação do biogás – H₂S

- Dessulfurização biológica

- sulfeto de hidrogênio pode ser oxidado por micro-organismos (bactérias) da espécie Thiobacillus e Sulfolobus
- As bactérias utilizam o dióxido de carbono para sua demanda de carbono e obtém energia para o crescimento, por meio da oxidação inorgânica de substratos de enxofre



-



- adição de quantidades estequiométricas de oxigênio ao biogás, de 2 a 6 %;
- O método acima pode ser executado por meio do uso de um filtro de gotejamento onde os micro-organismos (Thiobacillus) crescem no leito filtrante.

Purificação do biogás – H₂S

- **Adição de cloreto de ferro ao biodigestor**
- Esta adição faz com que o H₂S reaja e forme sais insolúveis de sulfureto de ferro;
- sua utilização é mais aconselhada num processo de pré-tratamento do biogás;
- este sistema possui fácil instalação, operação e manutenção;
- os custos de investimento são reduzidos enquanto o custo de operação se torna alto pela aquisição do cloreto de ferro;

- **Absorção em solução de hidróxido de sódio com água**
- adição de hidróxido de sódio (NaOH) na água, forma uma solução capaz de absorver o sulfeto de hidrogênio
- O hidróxido de sódio reage com o sulfeto de hidrogênio para formar o **sulfureto de sódio ou o hidrogênio sulfureto de sódio**. Ambos os sais são insolúveis e o método não é regenerativo, fazendo com que haja a produção de água residuária.

Purificação do biogás – H₂S

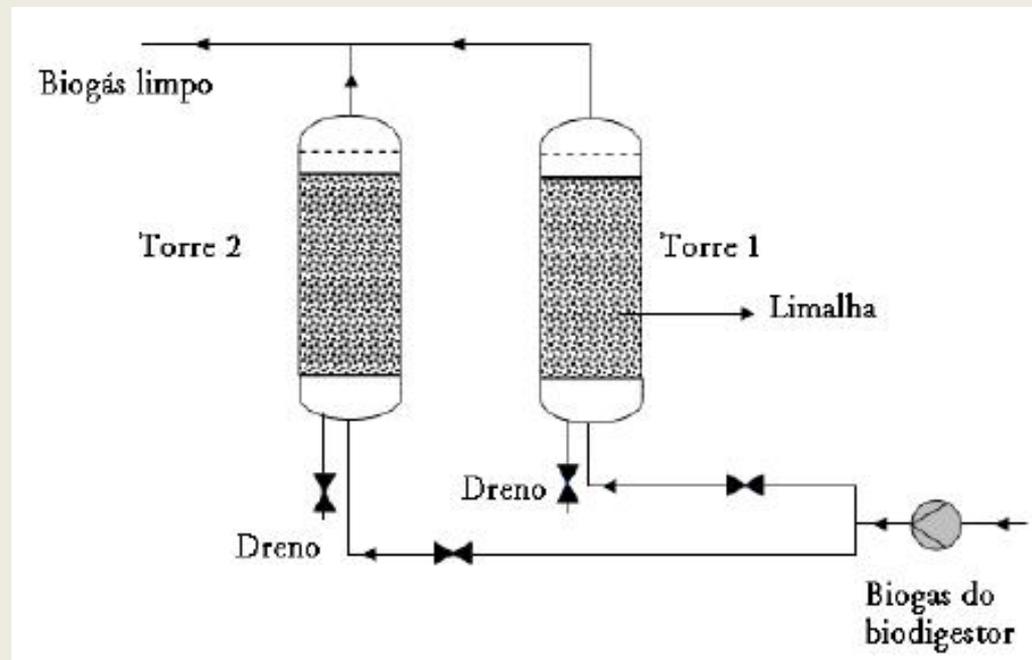
- Remoção por óxidos de ferro
- Este processo é o mais utilizado em plantas de pequeno e médio porte devido a seu custo e simplicidade;
- O sulfeto de hidrogênio reage facilmente com o óxido de ferro, formando sulfetos de ferro;



- 1,66 g de Fe₂O₃ absorve 1,0 g de enxofre;
- Uma amostra de biogás com 3000 ppm (0,30 vol.%), 60 % de metano e densidade de 1214 g.m⁻³ tem em sua composição 3,6 g de H₂S m⁻³ de biogás. Logo, um biodigestor pequeno produzindo 4 m³.h⁻¹ de biogás, necessita de um reator contendo 17,2 kg de limalha de ferro, a qual deve ser trocada ou regenerada a cada trinta dias (um mês).

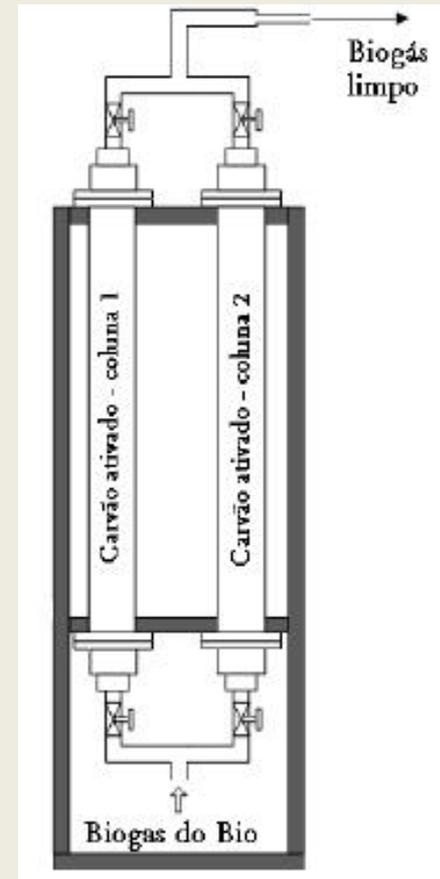
Purificação do biogás – H₂S

- Remoção por óxidos de ferro
- Os sulfetos de ferro formados na limalha podem ser regenerados com ar e permitir a recuperação do óxido de ferro, paralelamente com o enxofre elementar;



Purificação do biogás – H₂S

- Remoção com carvão ativado
- consiste de dois vasos contendo em seu interior o carvão ativado impregnado de um catalizador, geralmente o iodeto de potássio numa proporção de 2 %;
- O sulfeto de hidrogênio é cataliticamente convertido em enxofre elementar e água e adsorvido pelo carvão ativado;
- A reação ocorre a uma pressão de 7 a 8 bar e temperatura entre 50 e 70 °C. A taxa de absorção é de 0,062 kg de H₂S.kg⁻¹ de adsorvente



Purificação do biogás – CO₂

- O dióxido de carbono é um gás inerte e quanto maior a sua concentração no biogás menor seu poder calorífico;
- A aplicação que exige menor concentração de dióxido de carbono é o uso veicular, onde é interessante um biogás com 95 % de metano;
- No uso do biogás em motores geradores não é necessária a retirada do dióxido de carbono quando o biogás apresenta concentrações de metano acima de 60 %;
- Dentre os métodos químicos estão: absorção em carbonato de potássio, hidróxido de cálcio, hidróxido de sódio, entre outros;
- Dentre os métodos físicos destacam-se: os crivos moleculares, a separação por membranas e em colunas de absorção com água.

Purificação do biogás – CO₂

- Crivos moleculares em carbono
- produtos eficientes para a separação de componentes específicos do biogás;
- As moléculas são adsorvidas livremente nas cavidades do crivo de carbono, mas não ficam ligadas a ele de forma irreversível;
- A regeneração do crivo molecular é feita colocando a cama de carbono sob vácuo, liberando o dióxido de carbono;
- Esse processo também chamado de “*pressure swing adsorption*” (PSA), possui alta eficiência (98 %), mas também é oneroso devido ao sistema de controle.

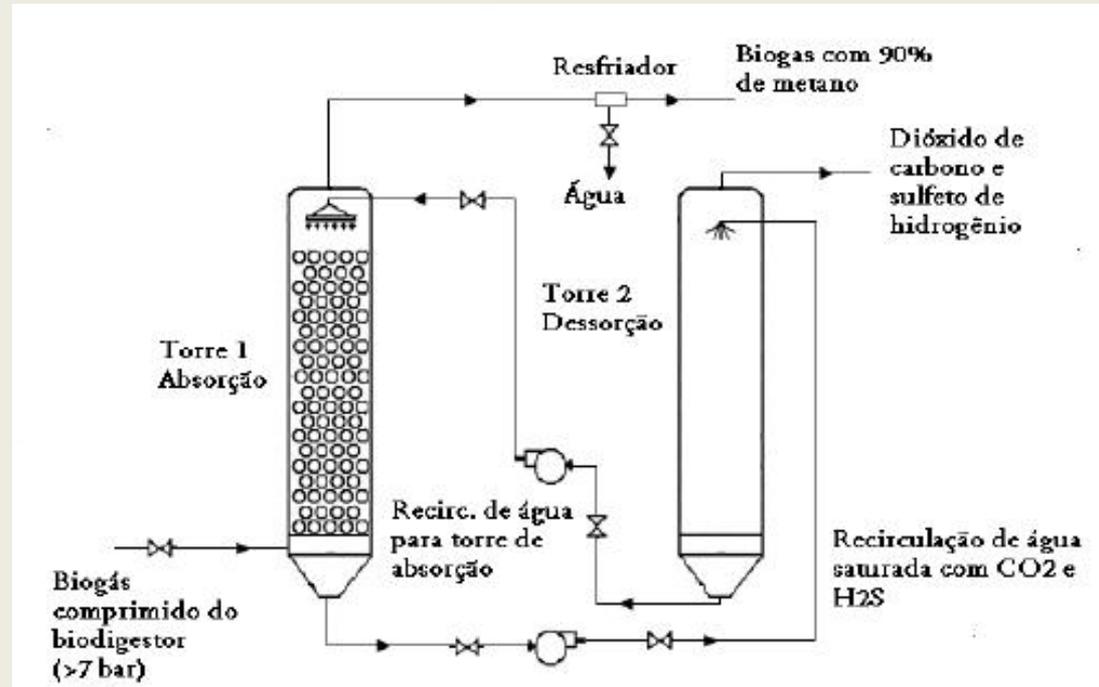
Purificação do biogás – CO₂

- Separação por membranas

- membranas de separação são barreiras finas que permitem a permeabilidade seletiva de determinados gases;
- confeccionadas predominantemente de materiais polímeros.

- Separação por membranas

- coluna de absorção é um equipamento bastante utilizado no processo de absorção de gases, pois permite um contato íntimo entre o soluto (gás) e o solvente
- As colunas que utilizam água como solvente, removem o dióxido de carbono e também o sulfeto de hidrogênio, pois estes gases tem uma solubilidade maior na água que o metano

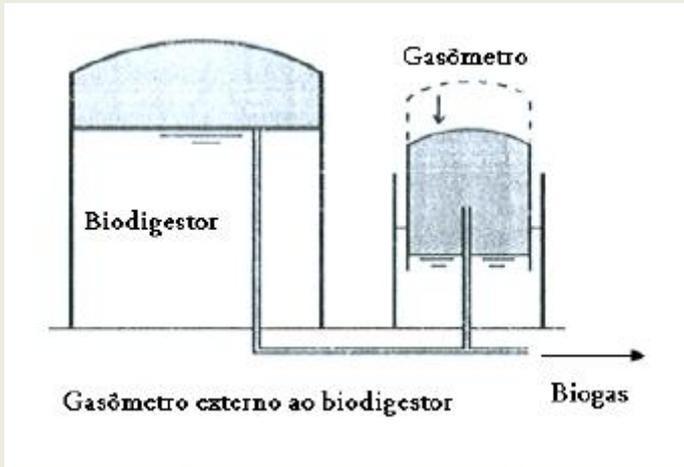
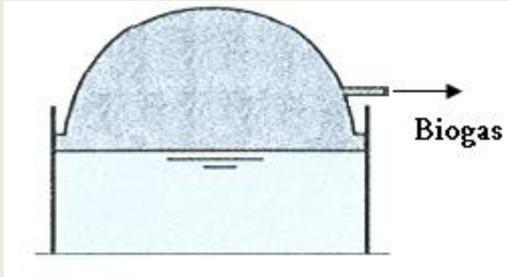
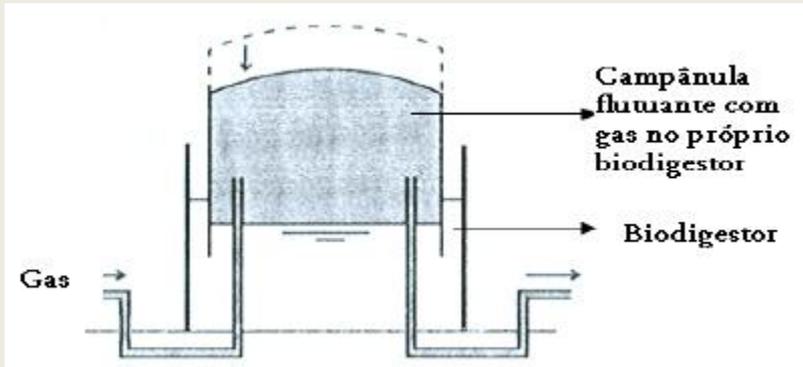


Biogás – Armazenamento e transporte

- Sistemas de armazenamento
- são classificados conforme a pressão de operação: baixa pressão, média pressão e alta pressão;
- A escolha do tipo de sistema de armazenamento depende da pressão de operação de cada uso final do biogás;

<i>Pressão</i>	<i>Sistema de armazenamento</i>	<i>Material</i>
<i>Baixa pressão (13.8 – 41.4 kPa)</i>	<i>Gasômetro selado com água, biodigestor.</i>	<i>Aço, PEAD, outros</i>
<i>Baixa</i>	<i>Balão e bolsas com gás</i>	<i>Borracha, plástico, vinil, outros</i>
<i>Média (105 – 197 kPa)</i>	<i>Tanques de GLP ou gás natural</i>	<i>Aço</i>
<i>Alta (20.106 kPa)</i>	<i>Tanque de gás natural veicular (GNV)</i>	<i>Aço</i>

Biogás – Armazenamento e transporte



Biogás – Armazenamento e transporte

- **Transporte de biogás**
- Nos sistemas de biodigestão, onde o biogás é estocado entre o nível de líquido do biodigestor e a membrana de cobertura, pressão interna inferior a 30 mm de H₂O;
- o biogás acumulado deve ser transportado ao uso final por meio de uma tubulação (canalização) de captação e recalque do biogás;
- A norma recomendada no dimensionamento de tubulações de biogás é a ABNT NBR 15526:2007: “Redes de distribuição interna para gases combustíveis em instalações residenciais e comerciais – Projeto e Execução”.
- No sistema de transporte do biogás devem ser introduzidos dispositivos como manômetros, medidores de vazão, ventiladores, desumidificadores, válvulas corta-chama e outros componentes por questões de operação, monitoramento e segurança de todo o sistema.

Biogás – Armazenamento e transporte

- Transporte de biogás
- O dimensionamento da tubulação de biogás consiste principalmente na determinação do diâmetro da tubulação em função da queda de pressão (perda de carga) ao longo do trecho de tubulação;
- O diâmetro da tubulação é calculado por:

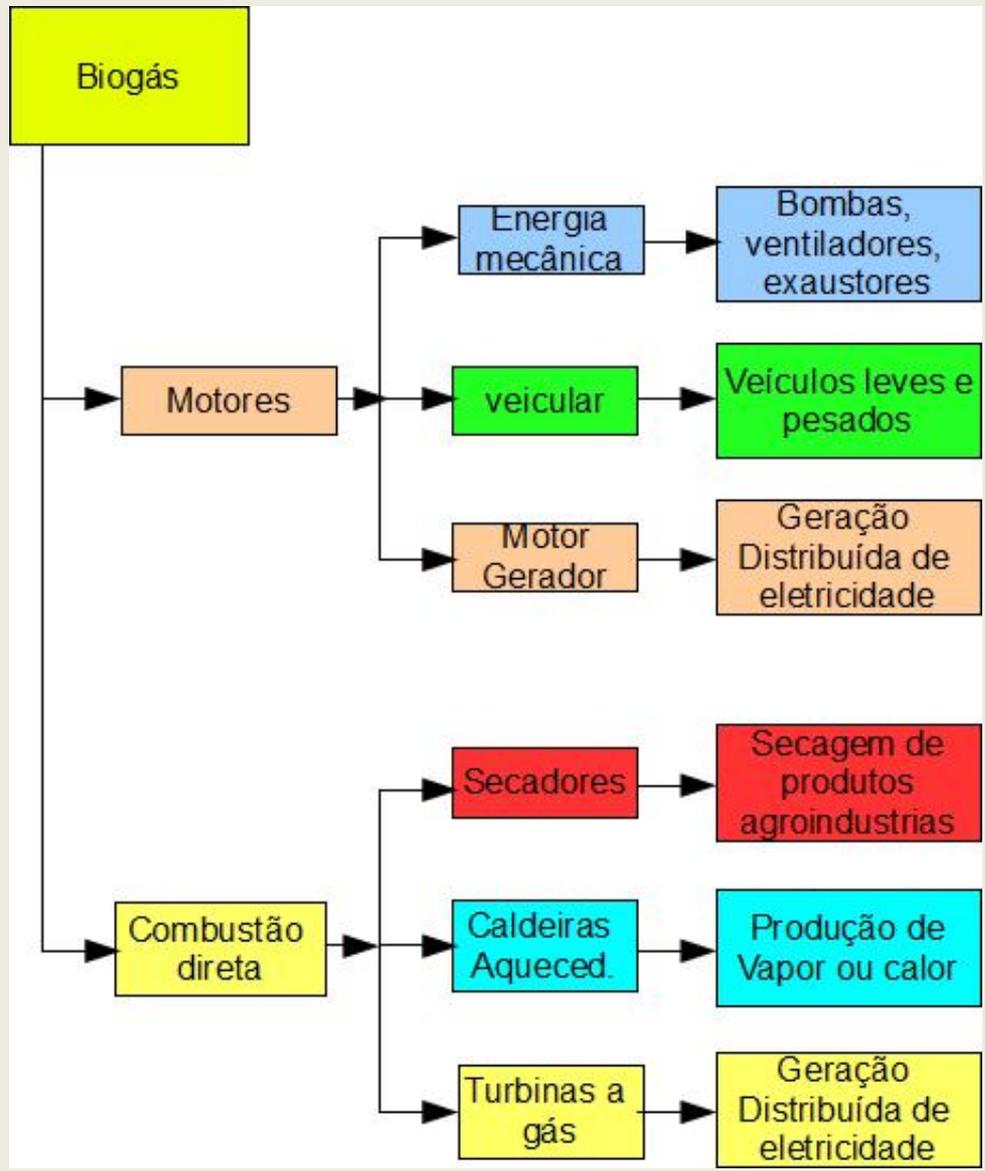
$$D = 2,4 \sqrt{\frac{(S^{0,8} L)^{0,5} Q^{0,9}}{2,22 \cdot 10^{-2} H^{0,5}}}$$

- Onde H é a perda de carga máxima admitida (kPa), L é o comprimento da tubulação, S é a densidade relativa (adimensional); ρ_{ar} é a densidade do ar (1,2 kg/m³) e ρ_{gas} é a densidade do gás; Q é a vazão do biogás (m³/h).

Biogás – Armazenamento e transporte

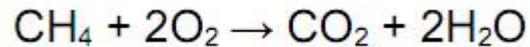
- Transporte de biogás
- tubulações de polietileno PE 80, termossoldável e com proteção anti-UV.
- Os diâmetros externos na classe SDR17 e pressão nominal $2,4 \text{ kgf.cm}^{-2}$ disponíveis são:
- DE110 (diâmetro externo 110 mm, espessura 6,3 mm, diâmetro útil 124 mm);
- DE160 (diâmetro externo 160 mm, espessura 9,1 mm, diâmetro útil 141,8 mm);
- DE 180 (diâmetro externo 180 mm, espessura 10,6 mm, diâmetro útil 159,4 mm);
- DE200 (diâmetro externo 200 mm, espessura 11,4 mm, diâmetro útil 177,2 mm).
- São adaptados para biogás tendo como bases a norma ABNT NBR 5590:2007. Tubulações de PVC podem ser utilizadas somente se o custo da tubulação de polietileno for muito alto.
- .

Biogás – Utilização



Biogás – Utilização

- Combustão do biogás
- Reação de combustão completa do metano:



- A razão estequiométrica para combustão do biogás e de 15,3% de biogás no ar, onde nesta proporção a combustão é completa;
- Fator lambda:

$$\lambda = \frac{A / C_{real}}{A / C_{estequiométrica}}$$

Onde conclui-se que:

$\lambda < 1 \rightarrow$ mistura rica (deficiência de ar);

$\lambda > 1 \rightarrow$ mistura pobre (excesso de ar);

$\lambda = 1 \rightarrow$ mistura estequiométrica.

Biogás – Utilização

Peso específico e poder calorífico inferior do biogás em função da composição química

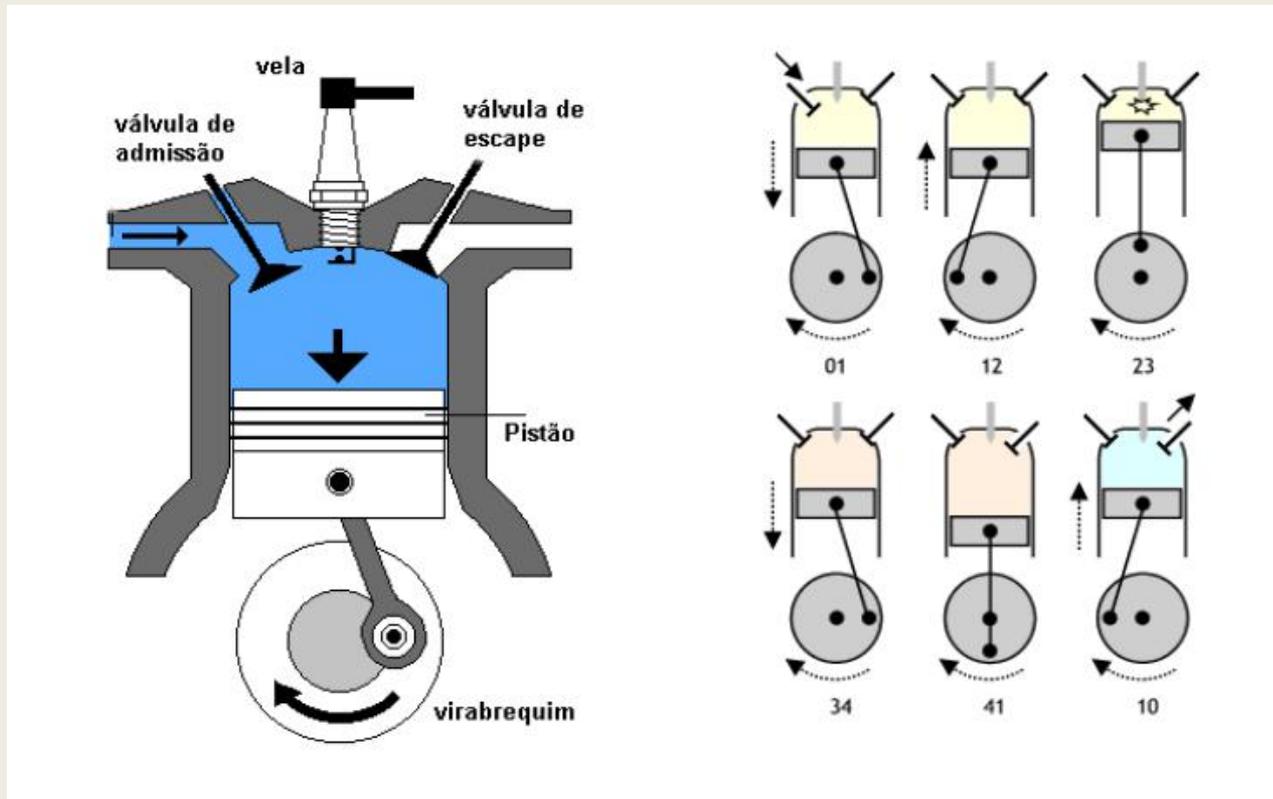
Composição química do biogás	Peso específico (kg/m ³)	PCI (kcal/kg)
10 % CH ₄ e 90 % CO ₂	1,8393	465,43
40 % CH ₄ e 60 % CO ₂	1,46	2333,85
60 % CH ₄ e 40 % CO ₂	1,2143	4229,98
65 % CH ₄ e 35 % CO ₂	1,1518	4831,14
75 % CH ₄ e 25 % CO ₂	1,0268	6253,01
95 % CH ₄ e 05 % CO ₂	0,7768	10469,6
99 % CH ₄ e 01 % CO ₂	0,7268	11661,02

Fonte: IANNICELLI (2008).

Biogás – Utilização

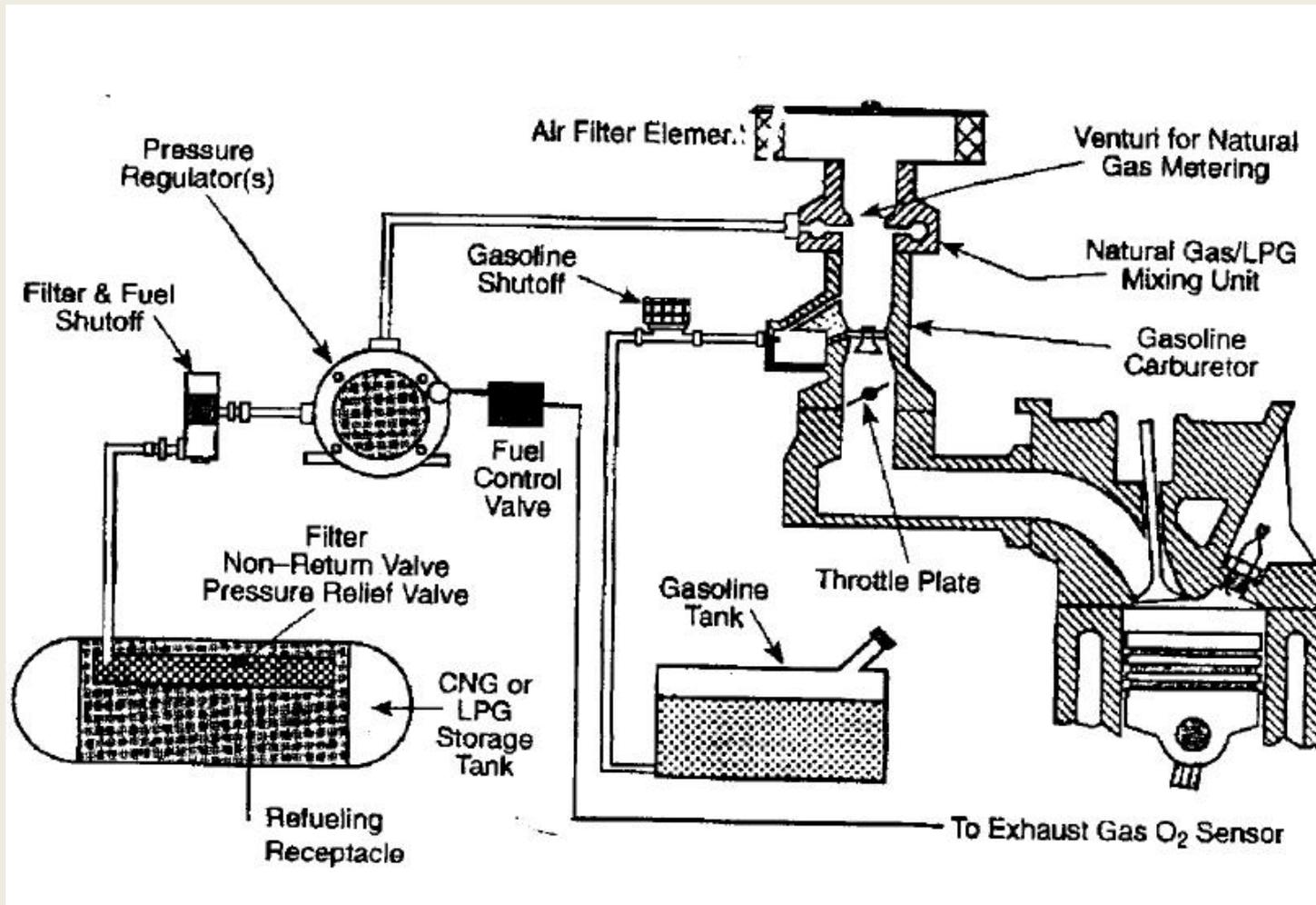
- Motores de Combustão Interna a Biogás/Metano

- Os sistemas de conversão para gás são mecânicos ou de injeção eletrônica;
- Os sistemas mecânicos são semelhantes aos de carburação a gasolina;
- Os sistemas eletrônicos utilizam injetores ou válvulas de controle de fluxo;



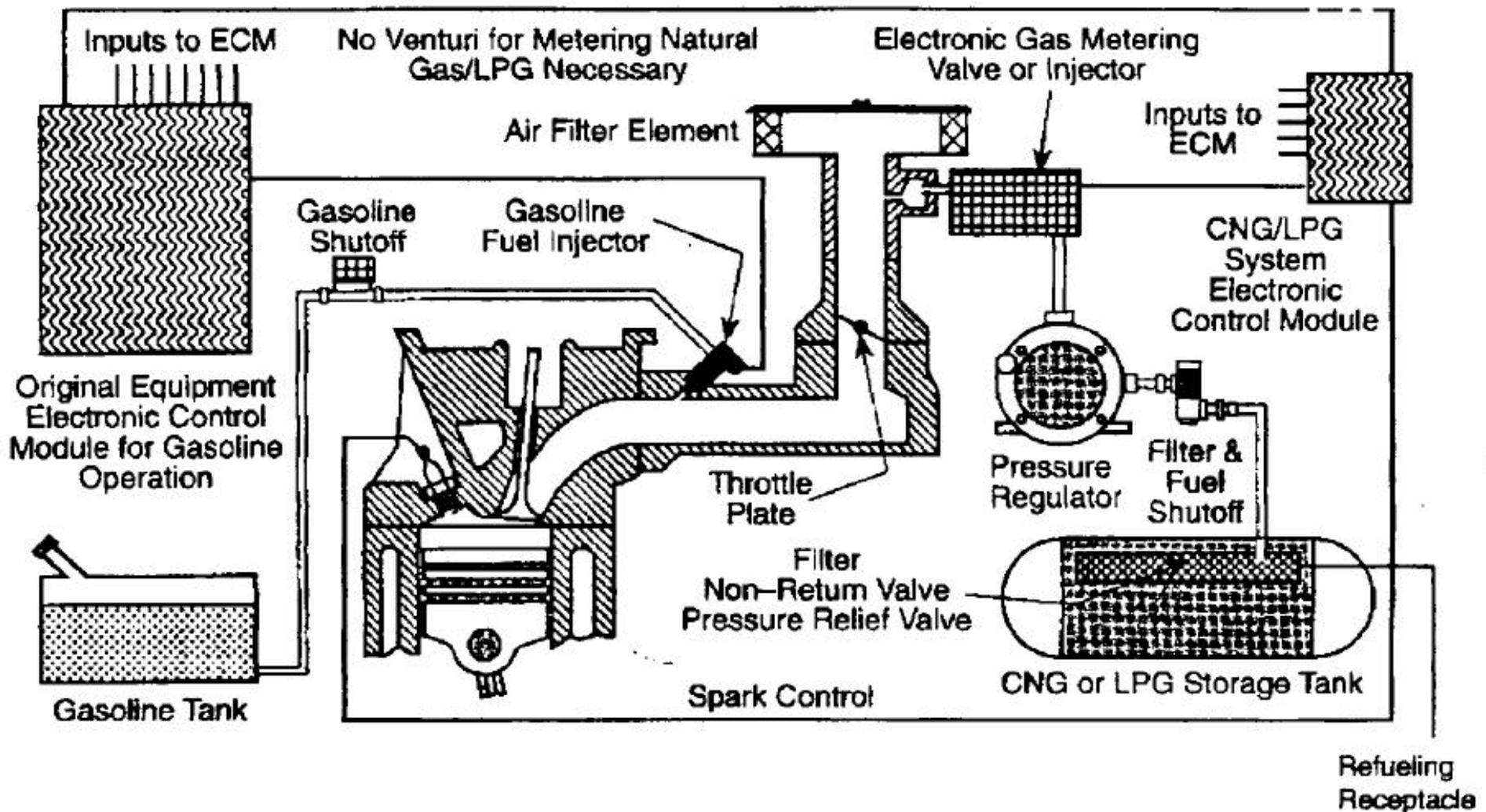
Biogás – Utilização

- Motores de Combustão Interna a Biogás/Metano
- Sistema de alimentação de biogás-metano mecânico;



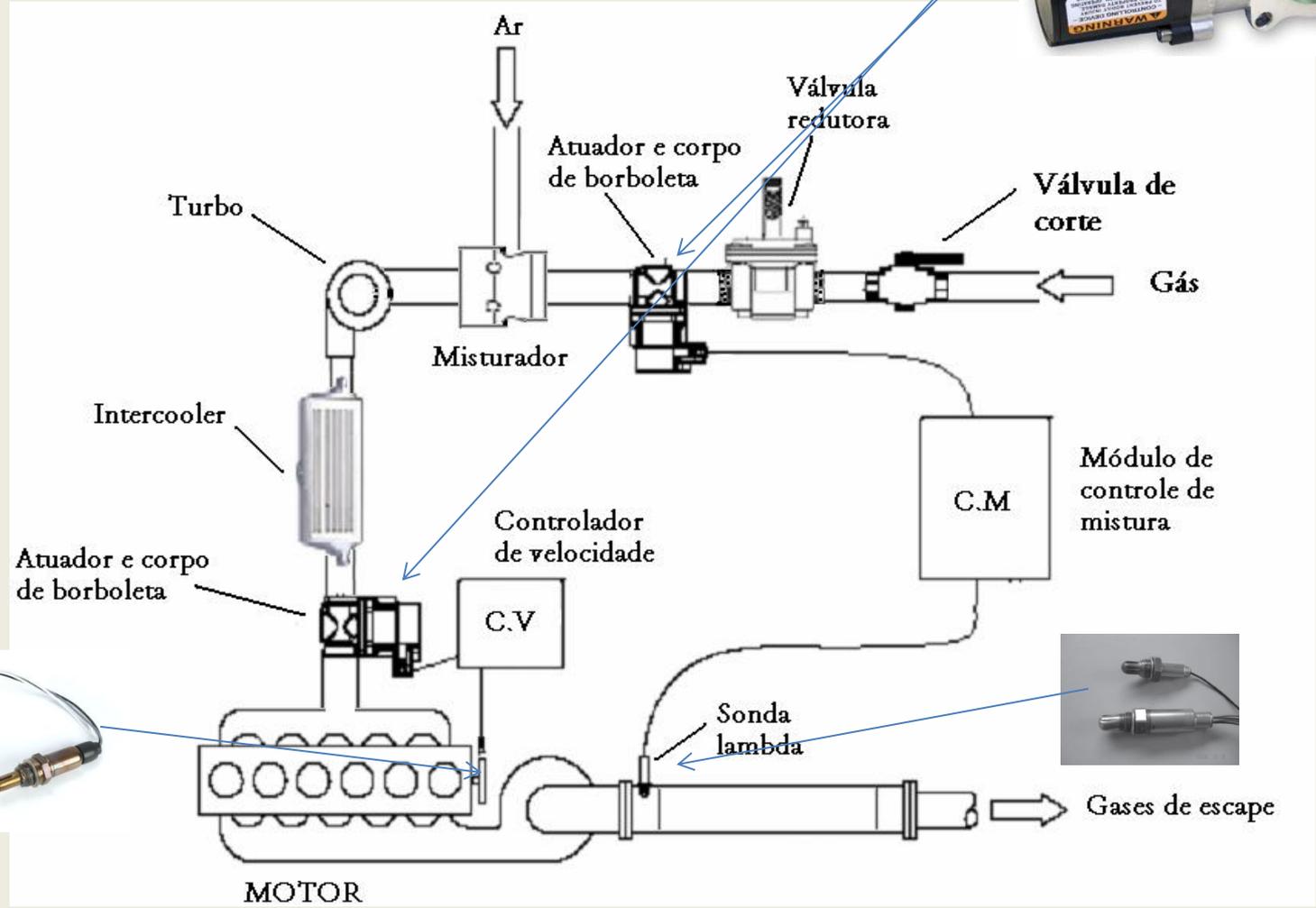
Biogás – Utilização

- Motores de Combustão Interna a Biogás/Metano
- Sistema de alimentação de biogás-metano injeção;



Biogás – Utilização

- Motores de Combustão Interna a Biogás/Metano
- Sistema típico utilizado;



Biogás – Utilização

- Motores de Combustão Interna a Biogás/Metano
- Motor gerador de 100 kVA;



Biogás – Utilização

- Motores de Combustão Interna a Biogás/Metano
- Motor gerador de 100 kVA;

Fabricante	GE – Jenbacher		Caterpillar		Leão Energia		Biogás Motores
Modelo	JMS 208 GS – B.LC	JMC 420 GS-B.L	G3406	G3520 refrigerador a água	LGG70	LGG120	OM 366
Potência (kW)	330	1413	132	1600	50	100	50
Nº de cilindros	8l	20 V70°	6l	20V	4l	6l	6l
Curso (mm)	145	185	164	190	-	-	-
Diâmetro (mm)	135	145	137	170	-	-	-
Consumo de biogás (m³/h)	-	-	62,2 (75 % de carga)	647 (75 % de carga)	30	50	
Gerador	-	-	Auto excitado 4 polos	Permanent magneto 6 polos	Cramacho 4 polos	Cramacho 4 polos	4 polos
Rotação (RPM)	1800	1200	1800	1200	1800	1800	1800
Tensão (V)	-	-	220	480	220/380	220/380	220/380

Fonte: GE-Energy (2011), Caterpillar (2011), Leão (2010), Biogás Motores (2011).

Biogás – Instrumentação

Parâmetro	Função	Medidor / Método	Ilustração
Pressão no (s) biodigestor (es)	Controle da pressão no biodigestor	Transdutor de pressão	
Concentração de metano no biogás	Avaliar a qualidade do biogás (poder calorífico)	Medidor portátil tipo eletroquímico	
Concentração de metano no biogás	Avaliar a qualidade do biogás (poder calorífico)	Medidor fixo tipo infravermelho	
Concentração de sulfeto de hidrogênio	Avaliação da qualidade do biogás (poder de corrosão)	Medidor portátil tipo eletroquímico	
Fluxo de biogás	Produção de biogás no (s) biodigestor (es) e consumo de biogás no (s) motor (es) gerador (es)	Medidor de fluxo termal	

Exercícios

- Uma usina de açúcar e álcool produz 5.000 m³/dia de vinhaça, com uma DQO de 24.000 mg/L. Sabendo-se que a carga orgânica volumétrica de um reator UASB é de 15 kgDQO/m³.d e que o volume de cada módulo deverá ser no máximo de 2500 m³. Dimensionar o volume dos biodigestores para processar a vinhaça. Se o custo do m³ de um reator é de 2000 R\$, qual o custo total do sistema?
- Na usina de álcool mencionada. Qual a relação de produção de biogás (em m³) por vinhaça (em m³), sabendo-se que a eficiência de remoção de DQO do reator é de 75% e que o biogás tem em sua composição 60% de metano. Dado: 0,33 m₃ CH₄/kg DQOr.
- Na usina de álcool mencionada, qual seria a potência de geração de eletricidade, utilizando-se um motor gerador de 22% de eficiência e um motor gerador de 40% de eficiência?