



ESCOLA POLITÉCNICA
UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Departamento de Engenharia **Hidráulica** e **Ambiental**

PHA3556 - Tecnologias de Tratamento de Resíduos Sólidos

Aula 7: Digestão Anaeróbia da Matéria Orgânica

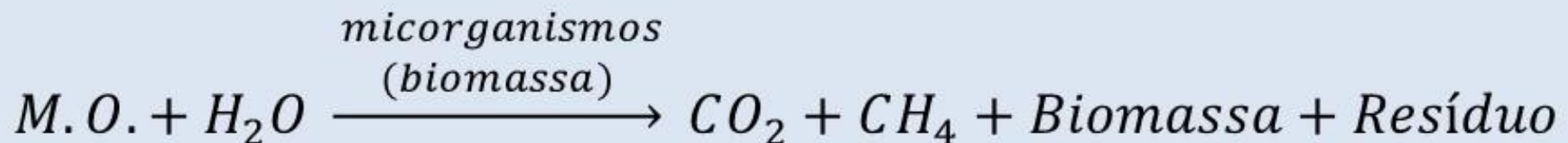
Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Definição:**

- A digestão anaeróbia é um processo biológico que transforma a matéria orgânica solubilizada ou semissólida (lodo) em biogás constituído principalmente de gás metano (CH₄) e gás carbônico (CO₂).



- Este processo engloba múltiplas etapas na **ausência de oxigênio** e sob ação de microrganismos (biomassa). Os mecanismos bioquímicos e as atividades microbiológicas são complexas e não são totalmente conhecidas. Estas dependem da natureza do substrato a digerir e das condições físico-químicas do meio.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Vantagens:**

- Promove a reciclagem da matéria orgânica e nutrientes;
- Baixa produção de lodo/sólidos;
- Baixa demanda de área;
- O lodo (resíduo) produzido é bem estabilizado;
- Baixo consumo de nutrientes;
- Baixo consumo de energia (não há necessidade de aeração);
- Produz metano (CH_4), que pode ser uma fonte de energia;
- Suporta elevadas cargas orgânicas;
- O lodo anaeróbio (biomassa) pode ser preservado por longos períodos de tempo, mesmo sem alimentação do reator;
- Baixo risco de poluição ambiental, por ser realizado em sistema fechado (desde que adequadamente executado);
- Tecnologia que apresenta elevado potencial para países de clima quente ou tropical.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Desvantagens:**

- Dependendo do efluente/resíduo a ser tratado, ou se o sistema for mau operado, pode gerar maus odores (formação de H_2S e outros);
- A partida do sistema pode ser lenta na ausência de lodo de inóculo adaptado (biomassa anaeróbia);
- A bioquímica e a microbiologia da digestão anaeróbia são complexas e ainda necessitam ser mais compreendidas;
- Tempos de reação ou detenção relativamente elevados;
- Fatores ambientais podem afetar sensivelmente o processo;
- Processo sensível a alguns compostos químicos;
- Baixa remoção de patogênicos;
- Necessidade de compostagem para completa estabilização da matéria orgânica digerida.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

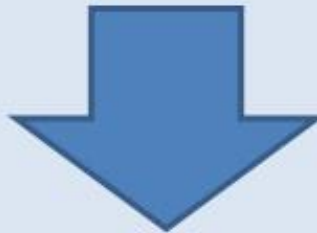
- **Viabilidade:**
 - Depende da quantidade de gás gerada, da existência de demanda por gás metano e da distância até aos potenciais consumidores.
 - Depende da aceitação e da existência de mercado para o composto produzido a partir do lodo/resíduo gerado ao final.
 - Depende das distâncias de transporte do composto final.
 - Por ser uma forma de tratamento de resíduos, legalmente (PNRS), tem prioridade em relação à disposição em aterro sanitário independente dos custos envolvidos.
 - Se operado adequadamente, o sistema de digestão anaeróbia não se torna um passivo ambiental e não vai gerar elevados custos pós desinstalação, ao contrário dos aterros sanitários, que no final de suas vidas úteis **sempre se tornam passivos ambientais** gerando despesas para os municípios (cuidados, monitoramentos, investigações, recuperação ambiental da área, etc.).

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Principais Aplicações:**

- Tratamento de esgotos, efluentes e resíduos industriais ricos em matéria orgânica;
- Tratamento de lodos de sistemas de tratamento de esgotos;
- Tratamento de dejetos da criação de animais;
- Tratamento da fração orgânica de resíduos sólidos;
- etc..



- Tratamento de praticamente qualquer resíduo orgânico.
(puro ou misturado)

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**

- Etapas e Mecanismos da Digestão Anaeróbia:

- A digestão anaeróbia pode ser comparada a um ecossistema onde diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas. Os microrganismos que participam do processo de decomposição anaeróbia podem ser divididos em três importantes grupos:

- **Bactérias fermentativas** (primeiro grupo), transformam, por hidrólise, os polímeros em monômeros, e estes em acetato, hidrogênio, dióxido de carbono, ácidos orgânicos de cadeia curta, aminoácidos e outros produtos;

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**

- Etapas e Mecanismos da Digestão Anaeróbia:

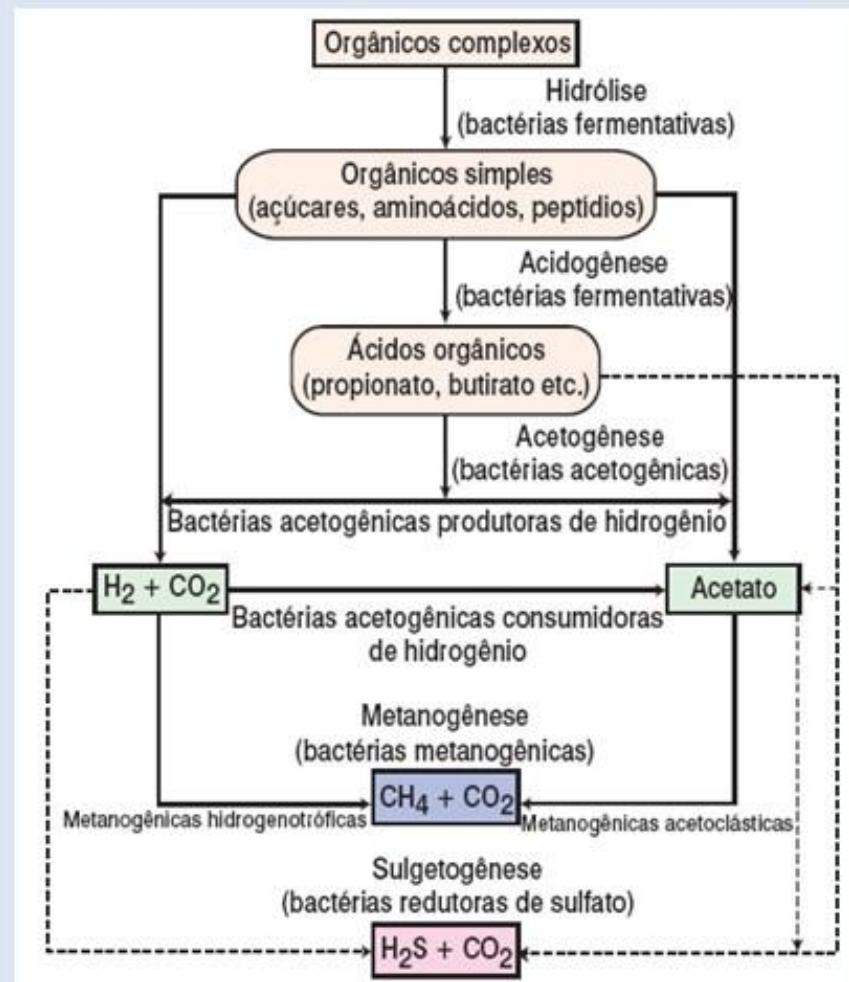
- **Bactérias acetogênicas** produtoras de hidrogênio (segundo grupo), convertem os produtos gerados pelo primeiro grupo (aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e álcoois) em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- Os produtos finais do segundo grupo são os substratos essenciais para o terceiro grupo, que por sua vez constitui-se de dois diferentes grupos de **arqueas metanogênicas**. Um grupo usa o acetato transformando-o em metano e dióxido de carbono, enquanto o outro produz metano, através da redução de dióxido de carbono em conjunto com hidrogênio.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cieber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cieber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cieber Contrera

- **Conceitos:**

- Etapas e Mecanismos da Digestão Anaeróbia:



Fonte: Chernicharo (1997)

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**
 - Etapas e Mecanismos da Digestão Anaeróbia:
 - **Hidrólise Enzimática** – Esta primeira etapa do processo de degradação anaeróbia consiste na hidrólise de materiais particulados complexos (polímeros), em materiais dissolvidos mais simples (moléculas menores) e como as bactérias não são capazes de assimilar a matéria orgânica particulada, essa conversão é conseguida através da ação de enzimas excretadas pelas bactérias hidrolíticas fermentativas.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**
 - Etapas e Mecanismos da Digestão Anaeróbia:
 - **Acidogênese** – Os produtos solúveis oriundos da fase de hidrólise são metabolizados no interior das células das bactérias fermentativas, sendo convertidos em diversos compostos mais simples, os quais são excretados pelas células. Os compostos produzidos incluem ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido lático, gás carbônico, hidrogênio, amônia, sulfeto de hidrogênio, além de novas células bacterianas. Como os ácidos voláteis são o principal produto dos organismos fermentativos, estes são usualmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**

- Etapas e Mecanismos da Digestão Anaeróbia:

- **Acetogênese** – As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substratos apropriados para as arqueas metanogênicas. Os produtos gerados pelas bactérias acetogênicas são o hidrogênio, o dióxido de carbono e o acetato. De todos os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas metanogênicas. Porém pelo menos 50% da DQO biodegradável é convertida em propionato e butirato, os quais são posteriormente decompostos em acetato e hidrogênio pela ação das bactérias acetogênicas.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**
 - Etapas e Mecanismos da Digestão Anaeróbia:
 - **Metanogênese** – A etapa final do processo de degradação anaeróbia de compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono é efetuada pelas arqueas metanogênicas. As metanogênicas utilizam somente um limitado número de substratos, compreendendo ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono. Em função de sua afinidade por substrato e magnitude de produção de metano, as metanogênicas são divididas em dois grupos principais, um que forma metano a partir de ácido acético ou metanol (**metanogênicas acetoclásticas**), e o segundo que produz metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (**metanogênicas hidrogenotróficas**).

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**
 - Etapas e Mecanismos da Digestão Anaeróbia:
 - **Metanogênese** (continuação) – Embora apenas poucas espécies de metanogênicas são capazes de formar metano a partir do acetato, estas são normalmente os microrganismos predominantes na digestão anaeróbia e são responsáveis por cerca de 60 a 70% de toda produção de metano, a partir do grupo metil do ácido acético. E ao contrário das acetoclásticas, praticamente todas as espécies conhecidas de arqueas metanogênicas são capazes de produzir metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**

- Etapas e Mecanismos da Digestão Anaeróbia:

- Caso o substrato contenha sulfatos ou compostos de enxofre ocorrerá a sulfetogênese. A produção de sulfetos é um processo no qual o sulfato e outros compostos à base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. Durante esse processo, sulfato, sulfito, e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, através da ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas, denominadas **bactérias redutoras de sulfato** (ou bactérias sulforredutoras). As bactérias sulforredutoras dividem-se em dois grandes grupos:

- 1) **Bactérias sulforredutoras** que oxidam seus substratos de forma **incompleta** até o acetato.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**

- Etapas e Mecanismos da Digestão Anaeróbia:

- 2) **Bactérias sulforredutoras** que oxidam seus substratos **completamente** até o gás carbônico. As possíveis rotas para redução de sulfatos foram apresentadas na figura anterior pelas linhas tracejadas.
- Na ausência de sulfato, o processo de digestão anaeróbia ocorre de acordo com as seqüências metabólicas representadas por linhas contínuas na figura anterior, e com a presença de sulfato na água residuária, muitos dos compostos intermediários formados através dessas rotas metabólicas passam a ser utilizados pelas bactérias sulforredutoras, provocando uma alteração das rotas metabólicas (linhas tracejadas). Dessa forma, as bactérias sulforredutoras passam a **competir** com as bactérias fermentativas, acetogênicas e com as arqueas metanogênicas pelos substratos disponíveis.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Conceitos:**
- Microrganismos participantes:
 - Anaeróbios
 - Facultativos
- Temperatura de atuação dos microrganismos:
 - 4 a 20 °C → **Psicrófilos**
 - 20 a 40 °C → **Mesófilos**
 - 40 a 65 °C → **Termófilos**
- Processo:
 - Exotérmico: Libera energia na forma de calor, porém muito menos que na digestão aeróbia (pouco perceptível).

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Biológicos:
 - Bactérias;
 - Arqueas metanogênicas;
 - Físicos:
 - Umidade;
 - Tamanho das partículas;
 - Compacidade;
 - Temperatura;
 - Agitação/Mistura;
 - Químicos:
 - pH;
 - Necessidade e disponibilidade de nutrientes;
 - Presença de compostos inibidores ou tóxicos (xenobióticos);
 - Potencial redox.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**

- Bactérias:

- As bactérias hidrolíticas desempenham importante papel na fase de hidrólise da matéria orgânica complexa (polímeros e lipídios) convertendo-a em compostos solúveis de menor peso molecular.
- As bactérias acidogênicas fermentativas convertem os produtos hidrolisados em compostos orgânicos mais simples, tais como álcoois, aldeídos, acetonas, ácidos graxos voláteis, CO_2 e H_2O .
- As bactérias acetogênicas convertem os produtos da acidogênese em ácido acético, CO_2 e H_2 .
- Na presença de substâncias contendo enxofre (sulfato) as bactérias redutoras de sulfato competem pelo substrato com as metanogênicas, gerando **indesejavelmente** H_2S que possui mau odor, é corrosivo e necessita ser tratado.

Digestão Anaeróbica

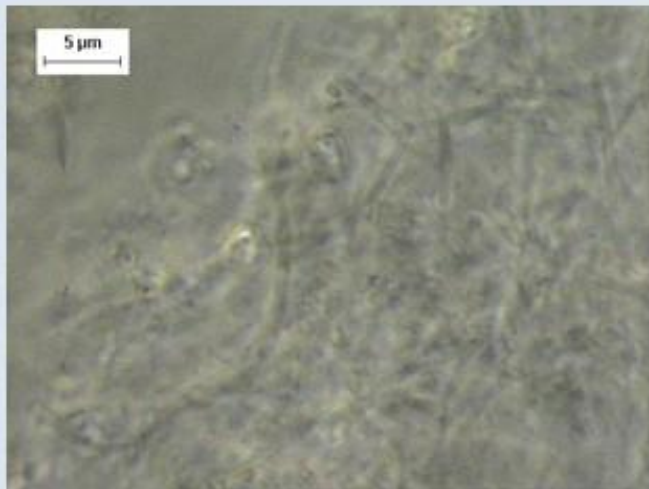
Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Arqueas Metanogênicas:
 - Atuam somente na etapa final do processo convertendo $\text{CO}_2 + \text{H}_2$, formiato, acetato, metanol, metilaminas e monóxido de carbono em metano, CO_2 e H_2O .
 - São muito sensíveis a variações de pH e temperatura.
 - Como apresentam baixo crescimento celular, e nem sempre estão presentes em concentração adequada no substrato, no início da operação é conveniente a inoculação do reator com biomassa anaeróbica proveniente de outro sistema de tratamento, com a finalidade de se acelerar o processo de partida e estabilização do sistema.
 - As morfologias mais comuns encontradas nos sistemas de tratamento são as metanosaetas, metanosarcinas e metanococos.

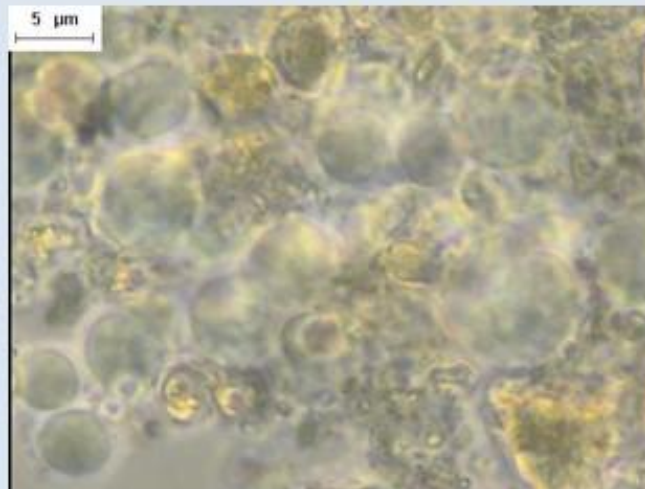
Digestão Anaeróbica

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

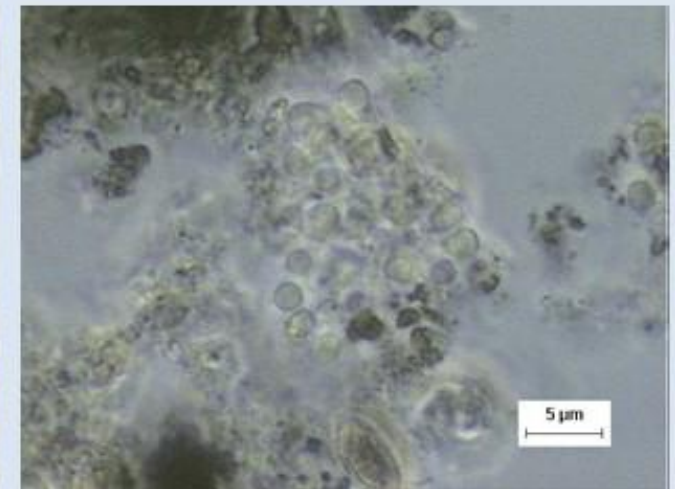
- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Arqueas Metanogênicas:
 - As morfologias mais comuns encontradas nos sistemas de tratamento são as metanosaetas, metanosarcinas e metanococos.



- metanosaetas



metanosarcinas



metanococos

Digestão Anaeróbica

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**

- Umidade:

- Quanto maior a umidade, maior e mais rápida é a produção de gás.

- Tamanho das partículas:

- Quanto menor o tamanho das partículas, maior é área superficial para atuação dos microrganismos e mais rápidos são os processos de hidrólise, fermentação e conseqüentemente a metanogênese.

- Compacidade:

- O aumento da compacidade diminui a área superficial efetivamente exposta para hidrólise enzimática, reduzindo conseqüentemente a velocidade de produção de gás.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Temperatura:
 - A temperatura é um parâmetro muito importante para o processo de digestão anaeróbia.
 - As reações químicas ocorrem mais rapidamente com o aumento da temperatura e de forma mais lenta com a diminuição da temperatura.
 - Cada aumento de temperatura de 10 °C provoca um aumento na taxa de reação de 2 a 3 vezes.
 - O aumento é limitado, porque as propriedades de alguns compostos mudam com o aumento da temperatura, mas grandes aumentos da taxa podem ser obtidos antes dos processos serem interrompidos.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Temperatura:
 - Esta relação entre a temperatura e a taxa de reação também é válida para os processos biológicos, porque são de fato processos químicos que ocorrem dentro de organismos vivos (ou "controlados" por esses organismos).
 - Mas como os próprios microrganismos também são sensíveis à temperatura, as possibilidades de aumento das taxas de reação com aumento da temperatura são limitadas, muito mais do que no caso de reações puramente químicas.
 - Diferentes grupos de microrganismos se adaptam a diferentes faixas de temperatura para crescer, e **cada grupo tem a sua própria temperatura ótima**. Dentro da faixa de um determinado grupo cada reação tem a sua temperatura ótima de velocidade máxima.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**

- Temperatura:

- Acima ou abaixo da temperatura ótima a velocidade da reação diminui. Em temperaturas mais baixas, normalmente, a atividade cai, mas os organismos não morrem. Para os microrganismos da digestão anaeróbia, pode-se dividir em três grupos distintos, cada um com sua temperatura ideal de atuação:

- 4 a 20 °C: microrganismos psicrófilos
- 20 a 40 °C: microrganismos mesófilos
- Acima de 40 °C: microrganismos termófilos.

- A digestão termofílica ocorre em um máximo de 55 a 60 °C. No entanto, existem bactérias que podem crescer à temperaturas de 120 °C.

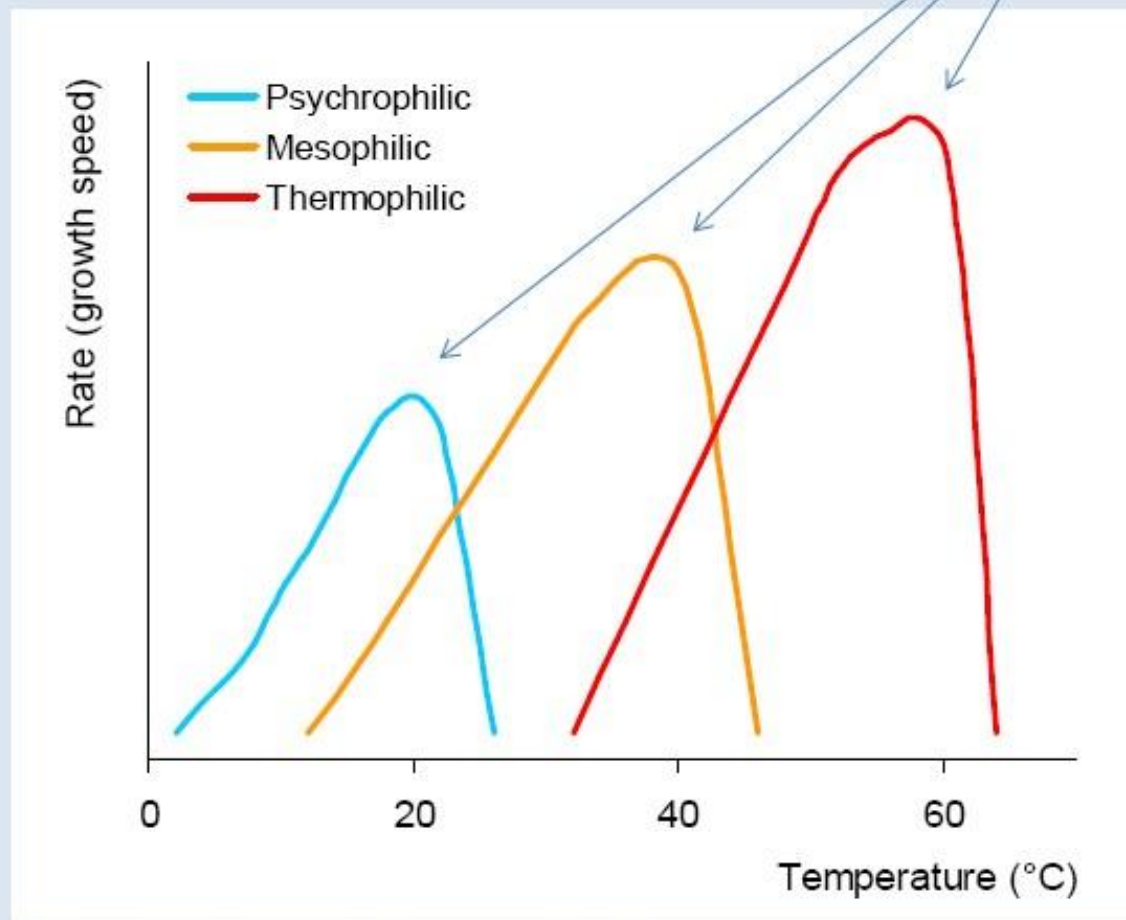
Digestão Anaeróbica

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**

- Temperatura:

- Grupos diferentes de microrganismos



Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Temperatura:
 - Dentro de cada faixa de temperatura, pode-se notar que a velocidade aumenta com o aumento da temperatura, e quando passa do ponto de máximo há um rápido declínio.
 - A temperaturas pouco acima do seu ponto ótimo os microrganismos tendem a morrer rapidamente.
 - Em geral, as velocidades máximas de reação para organismos psicrófilos são menores do que as velocidades máximas para os organismos mesófilos, que são geralmente mais baixas do que para os organismos termofílicos.
 - Os grupos de microrganismos são muito diferentes para cada faixa. Portanto, um digestor não pode ser mudado alterando-se a faixa de temperatura operacional para o outra, sem perda de atividade.
 - Quando ocorre uma alteração drástica da temperatura, outros microrganismos começam a crescer para assumir o processo (e isso é normalmente demorado → baixa taxa de crescimento).

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Agitação (Mistura) ou Recirculação:
 - A presença de agitação normalmente melhora a eficiência do sistema pois homogeniza a mistura microrganismo-substrato aumentando o contato do microrganismo com o substrato, uma vez que os microrganismos anaeróbios não possuem mecanismos de locomoção.
 - A agitação possui efeito benéfico até um certo ponto, a partir deste não se nota melhora e agitação em excesso pode atrapalhar o processo.
 - Uma alternativa à agitação é a recirculação de sólidos, líquidos, ou biogás no sistema.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**

- pH:

- Todos os organismos são mais ou menos sensíveis a alterações de pH e possuem um pH ótimo em que eles trabalham melhor.
- O pH afeta diretamente as reações enzimáticas.
- Em geral, pode-se notar três faixas de pH para a atividade microbiana:
 - pH < 5,5 a 6,0: **faixa acidófila**. Muitas bactérias acidificantes pertencem a este grupo e pode funcionar em ambientes muito ácidos.
 - pH de 5,5 ou 6,0 a pH 8,0 ou 8,5: **faixa neutrófila**. A maioria dos microrganismos metanogênicos são ativos nessas condições.
 - pH > 8,5: **faixa alcalifila**. Não se encontram nos digestores microrganismos que trabalham nesta faixa de pH.
- A faixa de pH ideal para o desenvolvimento da digestão anaeróbia se compreende entre **6,5 e 8,0**.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**

- pH:

- Os microrganismos influenciam o pH do meio ambiente interno e externo através da produção e/ou do consumo de ácidos orgânicos e compostos tamponantes.
- No entanto, apesar de poderem controlar o seu pH intracelular até um certo ponto, eles não podem regular o pH externo.
- Dos grupos de microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia, as arqueas metanogênicas são as mais sensíveis ao pH do seu ambiente. Preferem um pH de 6,5 a 8,0 e com pH abaixo de 6,0 a produção de metano é sensivelmente afetada, reduzindo-se bastante.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - pH:
 - As bactérias que são responsáveis pela hidrólise suportam uma ampla faixa de pH, e as acidificantes preferem pH abaixo de 8 e podem produzir ácidos até pH inferior a 5,0.
 - Quando as acidificantes produzem mais ácido do que as metanogênicas conseguem consumir, ocorre acúmulo de ácidos, o pH cai e o sistema entra em desequilíbrio, **acidificando-se** o reator.
 - Uma forma de se corrigir este problema é através da introdução de um alcalinizante no meio, preferencialmente com elevada capacidade de tamponamento.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Necessidade e Disponibilidade de Nutrientes:
 - As necessidades de nutrientes são usualmente estabelecidas a partir da composição química das células microbianas.
 - Geralmente o nitrogênio é o nutriente requerido em maiores concentrações para o crescimento dos microrganismos, que os utilizam na forma orgânica ou amoniacal.
 - Assumindo-se que os nutrientes estejam em uma forma biodisponível, os requisitos dependem do coeficiente de produção celular:
 - Para biomassa com baixo coeficiente de produção celular:
DQO : N : P : S = 1000 : 5 : 1 : 1 ou **C : N : P : S = 330 : 5 : 1 : 1**
 - Para biomassa com elevado coeficiente de produção celular:
DQO : N : P : S = 350 : 5 : 1 : 1 ou **C : N : P : S = 130 : 5 : 1 : 1**

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Necessidade e Disponibilidade de Nutrientes:
 - Composição química dos microrganismos metanogênicos.

Macronutrientes		Micronutrientes	
Elemento	Conc. (g/kgSST)	Elemento	Conc. (mg/kgSST)
Nitrogênio	65	Ferro	1800
Fósforo	15	Níquel	100
Potássio	10	Cobalto	75
Enxofre	10	Molibdênio	60
Cálcio	4	Zinco	60
Magnésio	3	Manganês	20
		Cobre	10

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Presença de compostos inibidores ou tóxicos:
 - A presença de compostos orgânicos tóxicos (pesticidas organoclorados ou organofosforados) podem inviabilizar a operação do sistema.
 - Metais pesados em excesso também podem inibir ou até cessar as atividades microbianas causando a intoxicação do sistema.
 - Sais em excesso também podem inibir a produção de metano e dependendo da concentração, a produção pode ser totalmente interrompida.
 - A presença de amônia em concentrações elevadas também pode inibir e até intoxicar o sistema. A forma tóxica da amônia é a **amônia livre** (NH_3 não dissociado) cuja concentração depende da concentração de amônia total, pH e temperatura.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Presença de compostos inibidores ou tóxicos:
 - Sais são formados por íons que dependendo da concentração podem estimular ou inibir o processo de digestão anaeróbia.

Ions	estimulante	Concentração em mg.l ⁻¹	
		inibidora	
		fracamente	fortemente
Na ⁺	100 à 200	3 500 à 5 500	8 000
K ⁺	200 à 400	2 500 à 4 500	12 000
Ca ²⁺	100 à 200	2 500 à 4 500	8 000
Mg ²⁺	75 à 150	1 000 à 1 500	3 000
NH ₄ ⁺	50 à 200	1 500 à 3 000	3 000 toxique
S ²⁻		< 200	200

Digestão Anaeróbica

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Presença de compostos inibidores ou tóxicos:
 - Alguns metais até certas concentrações podem ser considerados nutrientes e a partir de um certo limite começam a inibir o processo até intoxicar completamente o sistema.

Alimentação por etapa		
Metal	Concentração inibitória (mgL ⁻¹)	Limite tóxico (mgL ⁻¹)
Cr ³⁺	130	260
Cr ⁶⁺	110	420
Cu	40	70
Ni	10	30
Cd	-	> 20
Pb	340	> 340
Zn	400	600

Fonte: Belli (?)

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Fatores Intervenientes no Processo:**
 - Potencial Redox:
 - Oxigênio e outras substâncias oxidantes ou contendo oxigênio molecular (Ex: nitrato, nitrito, sulfato, etc.) podem paralisar o metabolismo e alterar o equilíbrio do sistema.
 - É recomendado para as acidogênicas e metanogênicas que o potencial redox (Eh) seja inferior a -300 mV.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Aspectos Epidemiológicos e Parasitológicos:**
 - Os sistemas anaeróbios não removem efetivamente microrganismos patogênicos como ocorre no processo de compostagem.
 - Dependendo da origem da matéria orgânica, do seu grau de contaminação com microrganismos e do uso que se deseja fazer dela, é recomendável sua desinfecção.
 - Caso se pretenda fazer uso agrícola do composto uma alternativa é a utilização de **cal hidratada** para desinfecção do composto.
 - Outra alternativa seria a sua **posterior compostagem** aeróbia com elevação natural da temperatura.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Aspectos Operacionais:**

- Tempo de Detenção ou Tempo de Reação:

- Quando o sistema é operado de forma contínua, utiliza-se o termo “tempo de detenção” e quando o sistema é operado de forma intermitente utiliza-se o termo “tempo de reação”.
- Os tempos de detenção e reação são os tempos em que em média os substratos permanecem no sistema.
- Caso o substrato seja líquido este tempo pode ser denominado “tempo de detenção hidráulica” (TDH ou θ_h).
- O tempo de detenção celular (θ_c) ou idade do lodo é o tempo médio que os microrganismos permanecem no sistema, e este tempo pode ser maior que o tempo de detenção do substrato, pois podem-se criar mecanismos para manter os microrganismos no sistema por muito mais tempo que os substratos.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Aspectos Operacionais:**

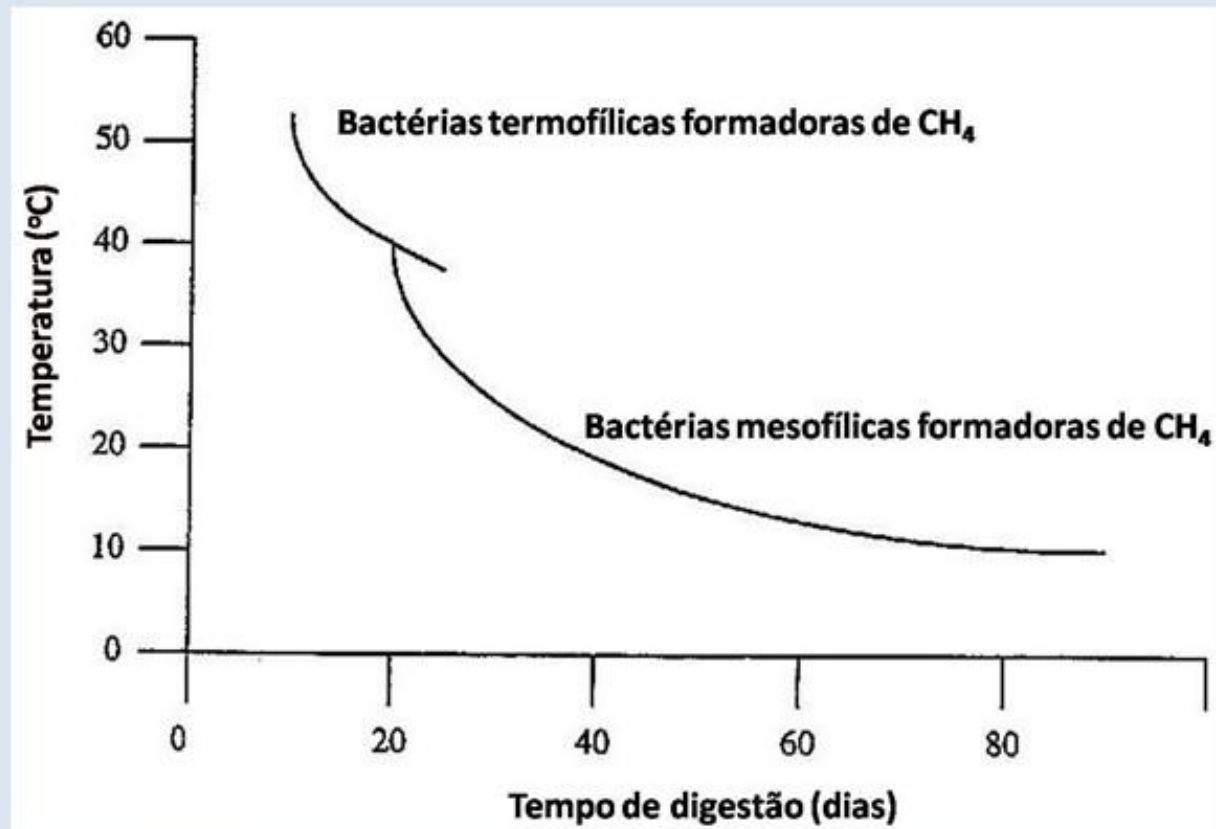
- Tempo de Detenção ou Tempo de Reação:

- O TDH adequado é uma consideração importante, porque ele estabelece uma relação direta entre o volume do digestor e da quantidade de substrato que necessita ser processada.
- Por exemplo: para digerir uma quantidade de 1 m^3 por dia, de um substrato que necessita de um tempo de detenção de 20 dias, é necessário um digestor com volume de 20 m^3 .
- O tempo de detenção/reação pode variar muito dependendo das características do substrato a ser tratado, da temperatura ambiente ou de operação do digestor e do tipo de digestor a ser utilizado.

Digestão Anaeróbica

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Aspectos Operacionais:**
 - Tempo de Detenção ou Tempo de Reação:

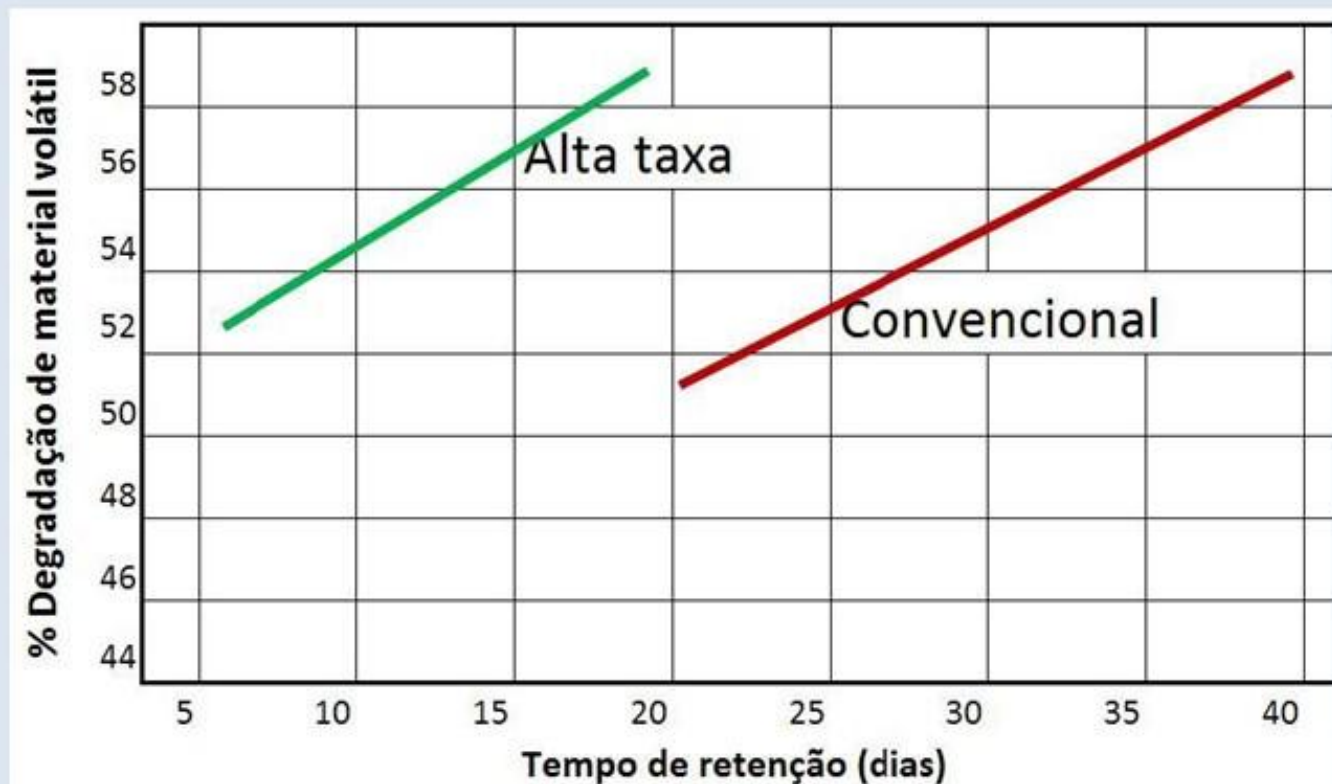


Fonte: Belli (?)

Digestão Anaeróbica

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- Aspectos Operacionais:
 - Tempo de Detenção ou Tempo de Reação:



Fonte: Belli (?)

Digestão Anaeróbia

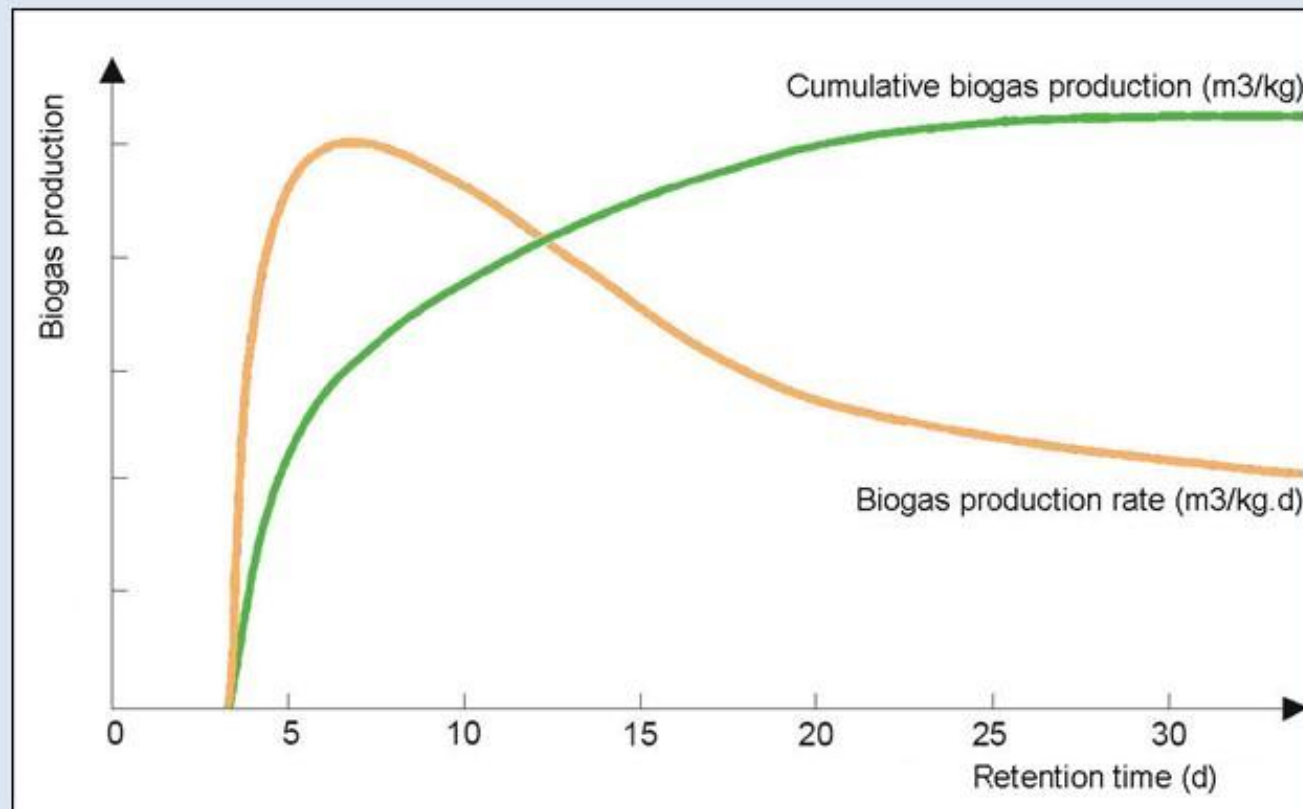
Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Aspectos Operacionais:**
 - Tempo de Detenção ou Tempo de Reação:
 - A produção de gás está intimamente ligada ao tempo de detenção do substrato (resíduo orgânico) no sistema e pode ser um indicativo de que a atividade biológica está se reduzindo por falta de substrato a ser digerido e assim indicando que a matéria orgânica no reator já se encontra estabilizada.

Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Aspectos Operacionais:**
 - Tempo de Detenção ou Tempo de Reação:



Fonte: Lettinga Associates Foundation (2009)

Sistemas de Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Tipos de Sistemas:**

- De acordo com a umidade do substrato:

- Digestão via úmida
- Digestão via seca

- De acordo com a faixa de temperatura:

- Psicrófilos
- Mesófilos
- Termófilos

- De acordo com o número de estágios:

- Estágio único
- Múltiplos estágios

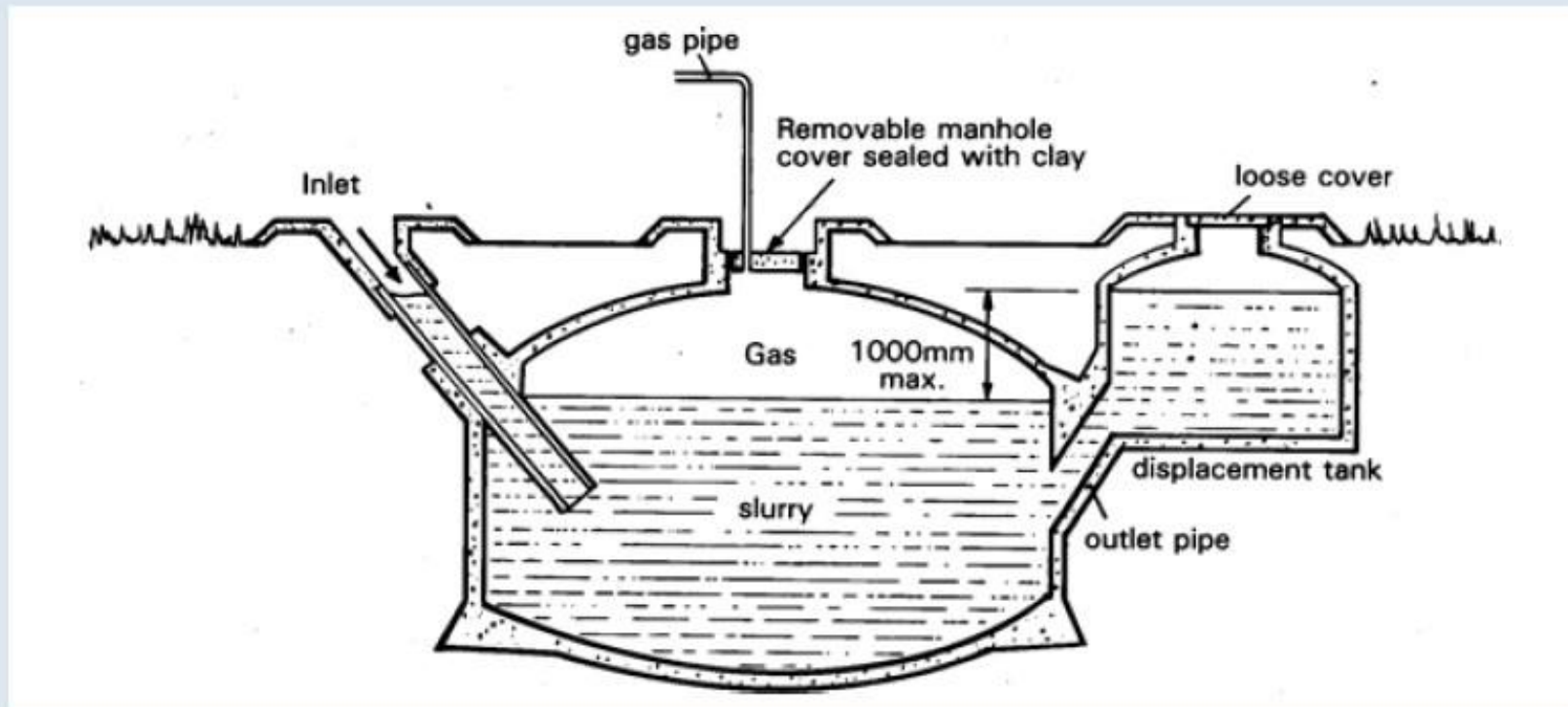
- De acordo com a alimentação do sistema:

- Alimentação contínua
- Alimentação descontínua (operação em bateladas sequenciais)

Sistemas de Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Digestores de Pequena Escala:**
 - Digestor chinês de paredes verticais e cúpula fixa.



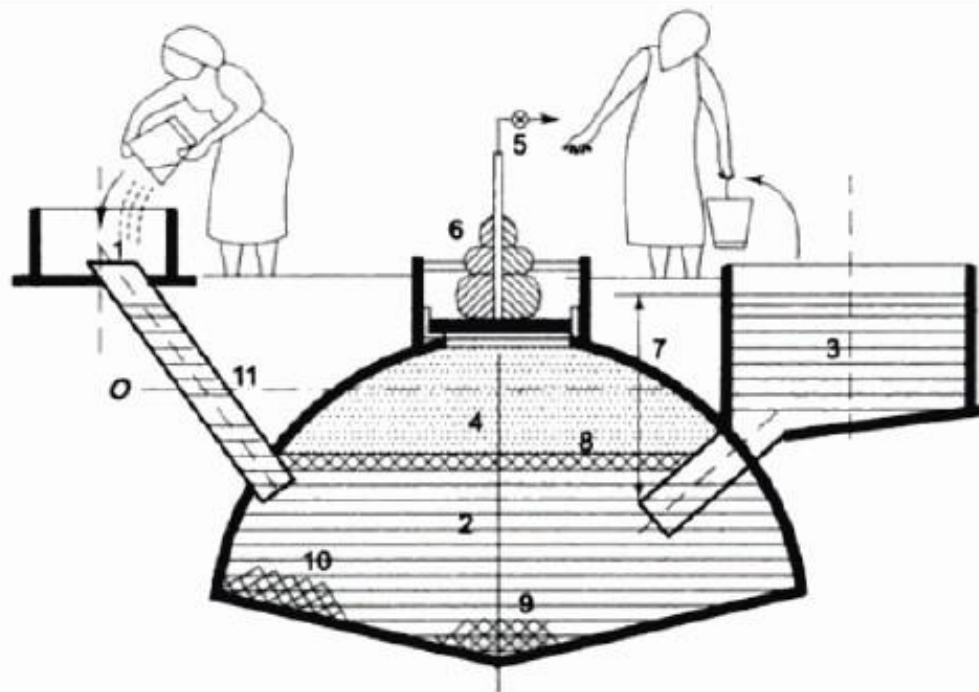
Fonte: Lettinga Associates Foundation (2009)

Sistemas de Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Digestores de Pequena Escala:**

- Digestor chinês de cúpula fixa e paredes em forma de cúpula.



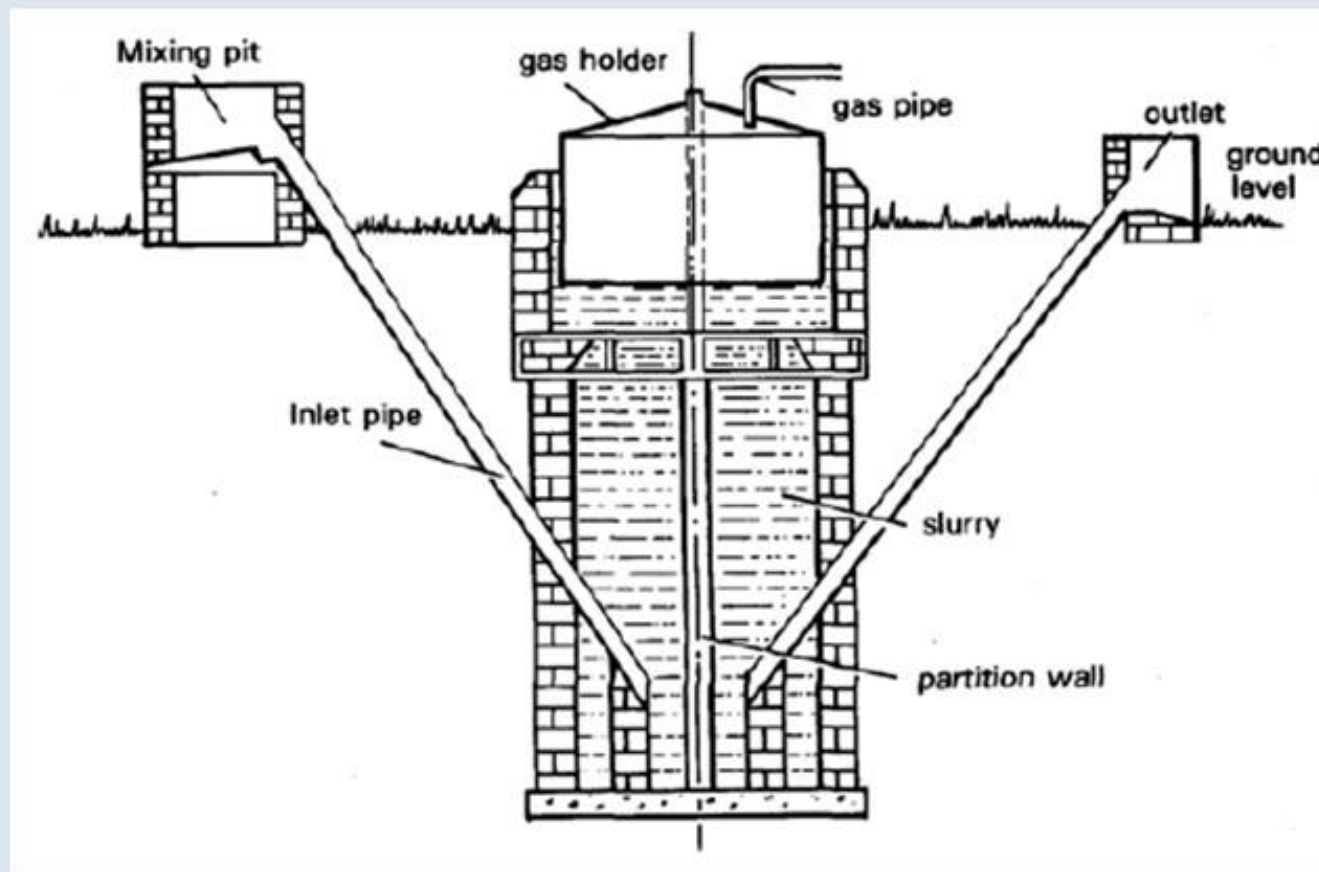
1. mixing tank with inlet pipe,
2. digester,
3. compensating and removal tank,
4. gas holder,
5. gas pipe,
6. weighted entry hatch with gas tight seal,
7. difference in level = gas pressure in cm water column,
8. supernatant scum layer,
9. accumulation of thick sludge,
10. accumulation of grit and stones,
11. zero line filling height without gas pressure.

Fonte: Lettinga Associates Foundation (2009)

Sistemas de Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Digestores de Pequena Escala:**
 - Digestor indiano de cúpula flutuante.

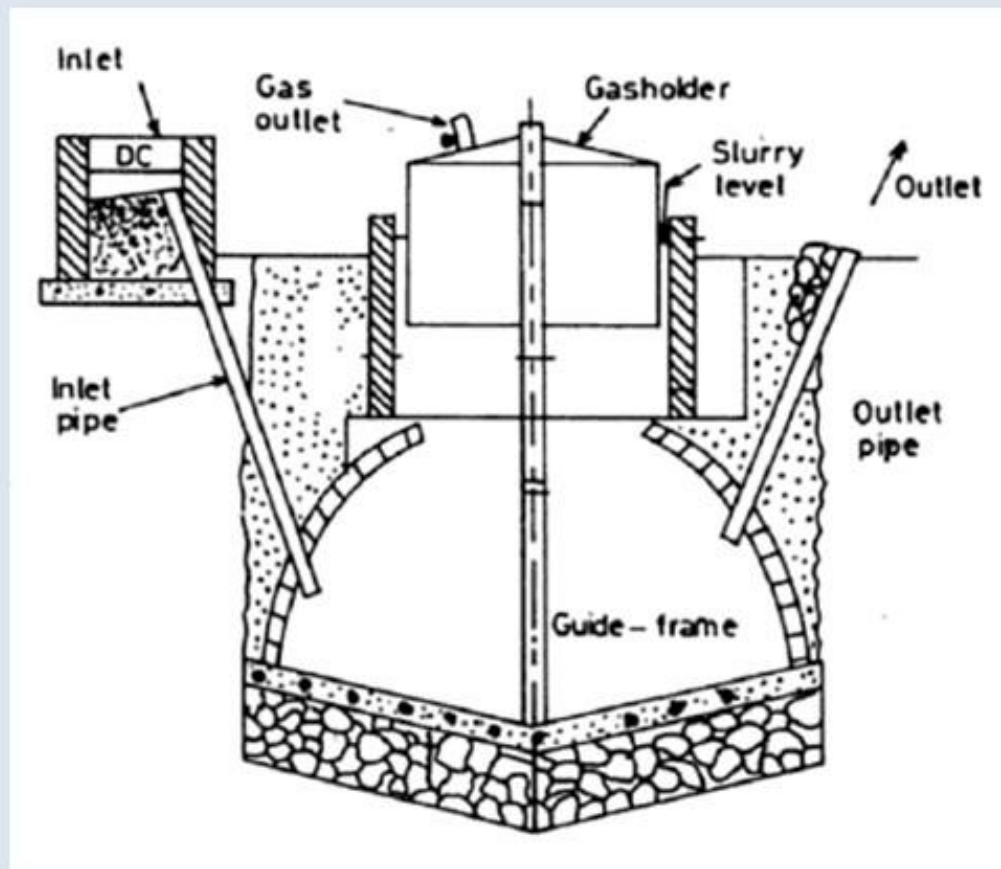


Fonte: Lettinga Associates Foundation (2009)

Sistemas de Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Digestores de Pequena Escala:**
 - Digestor indiano de cúpula flutuante.



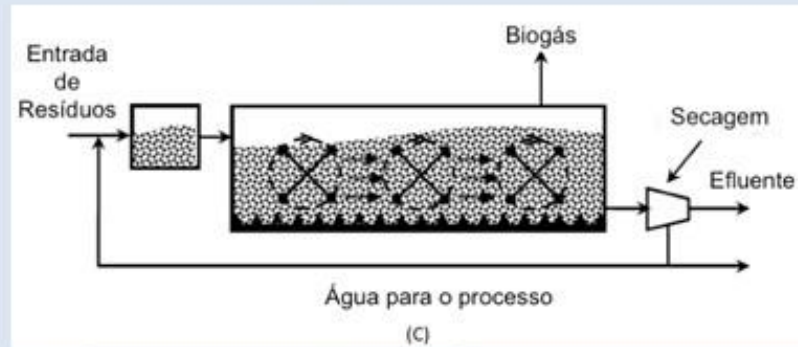
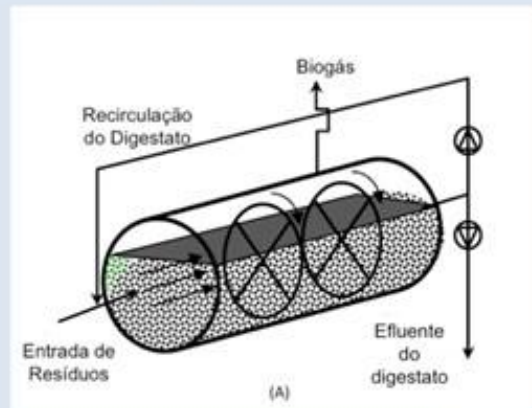
Fonte: Lettinga Associates Foundation (2009)

Sistemas de Digestão Anaeróbia

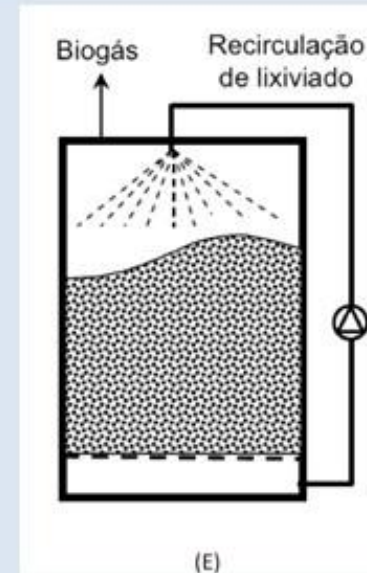
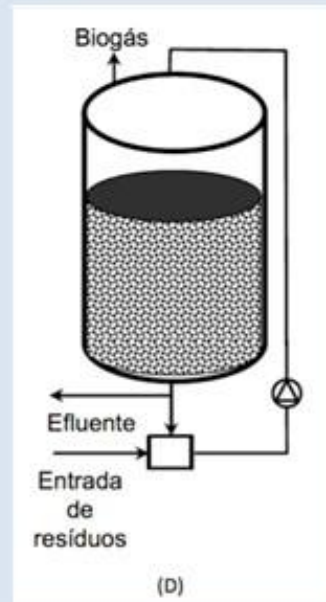
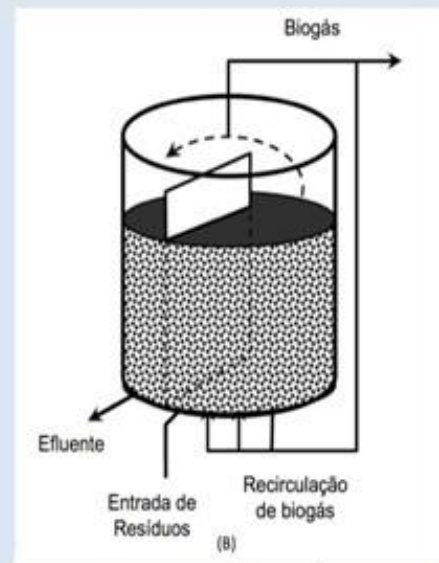
Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Digestores em Escala Industrial:**

- Diagramas simplificados de alguns processos:



(A) *Kompogas*
(B) *Valorga*
(C) *Linde- BRV*
(D) *Dranco*
(E) *Biocel*

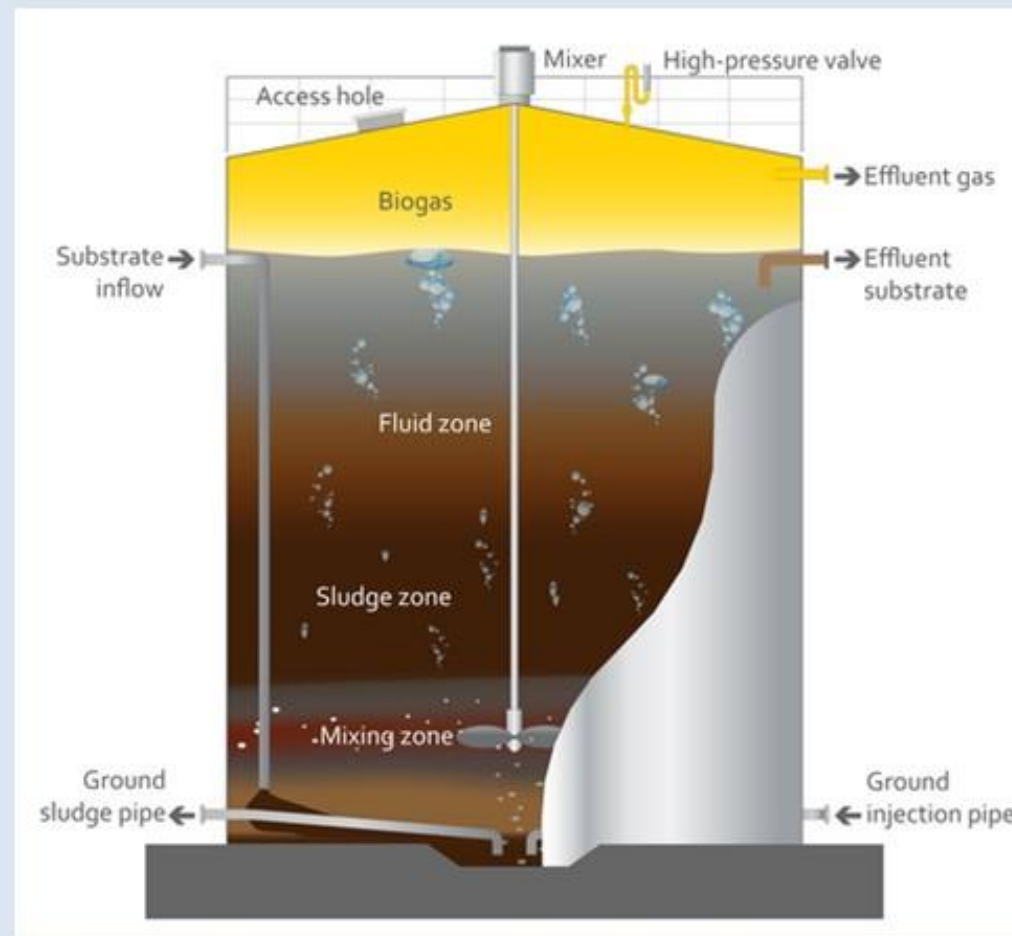


Fonte: Nayono (2010).

Sistemas de Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

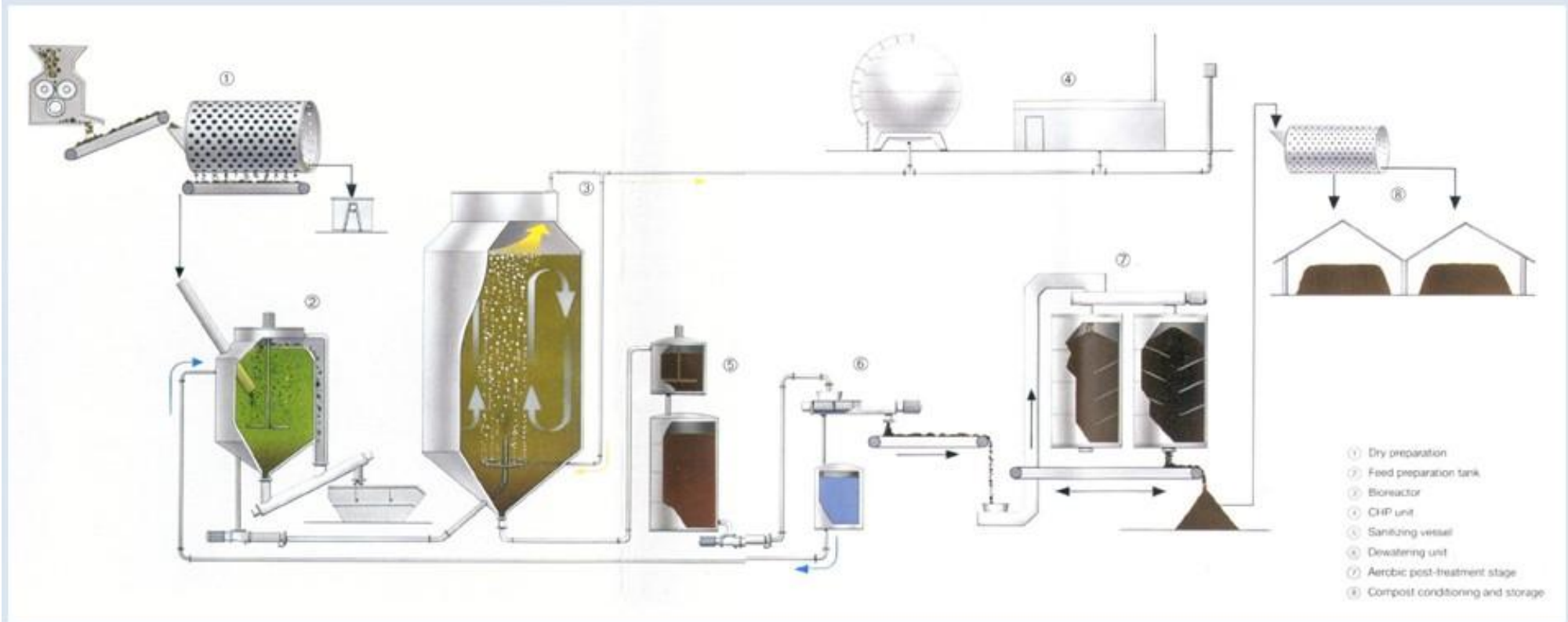
- **Digestores de Escala Industrial:**
 - Tanque digestor anaeróbico convencional.



Sistemas de Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Digestores de Escala Industrial:**
 - Processo Wabio.

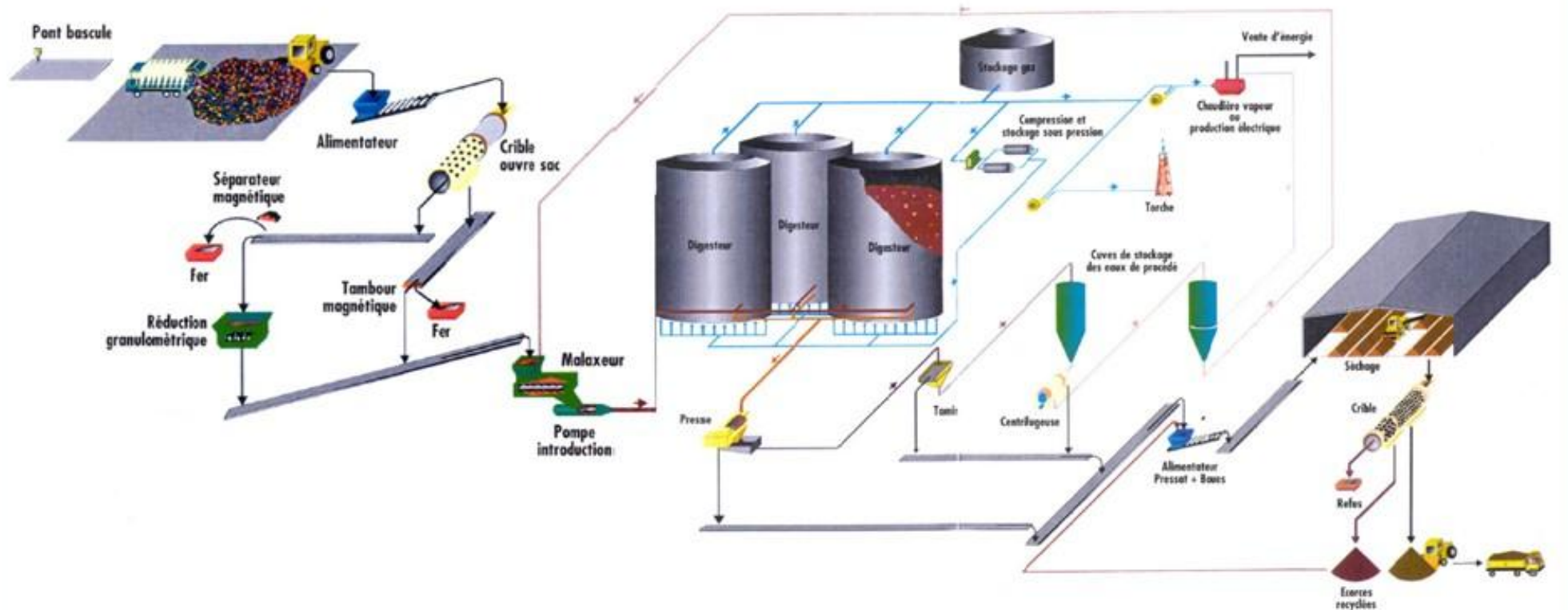


Fonte: Antunes Pereira (?)

Sistemas de Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Digestores de Escala Industrial:**
 - Processo Valorga.



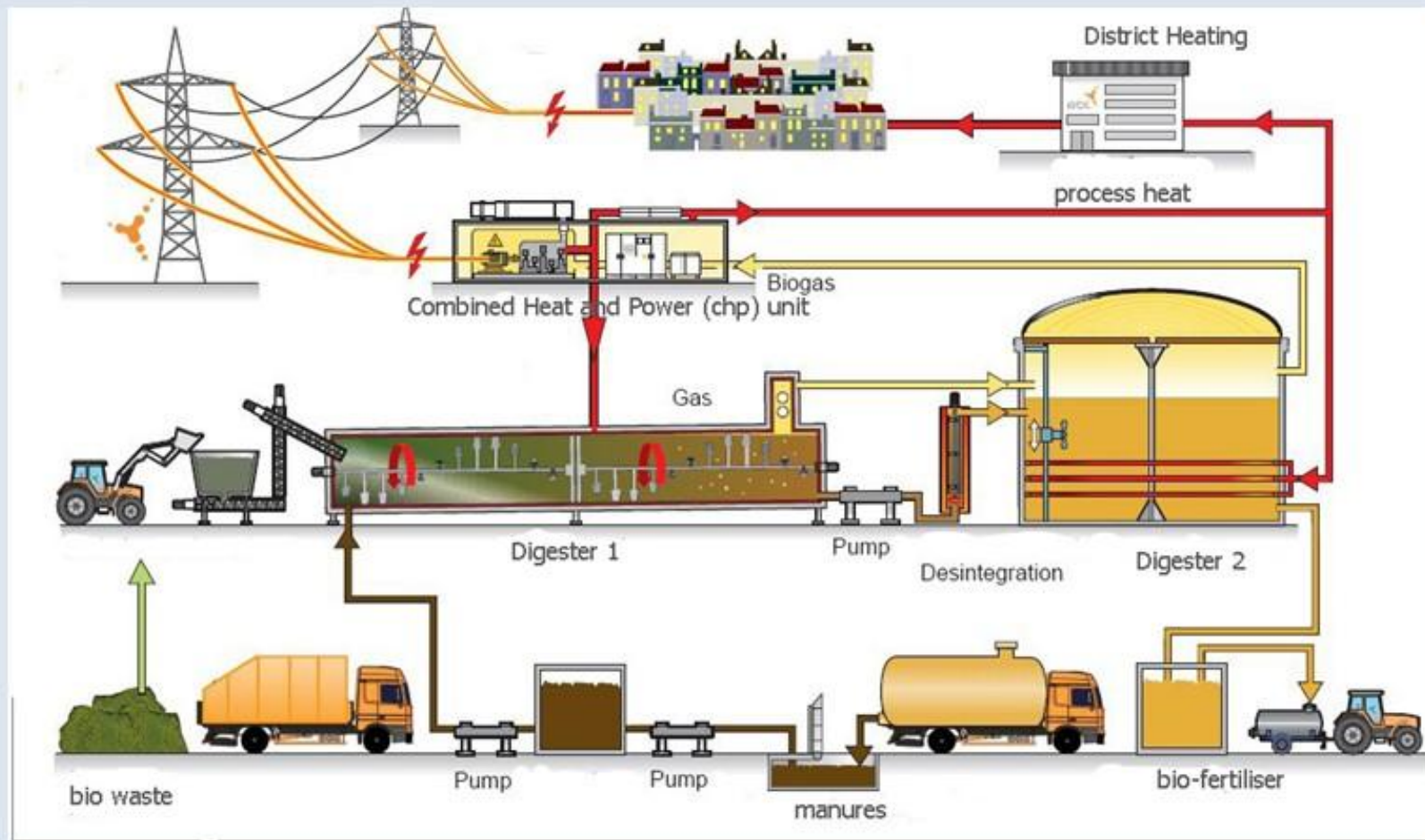
Fonte: Antunes Pereira (?)

Sistemas de Digestão Anaeróbia

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

- **Produtos:**

- Biogás (eletricidade e/ou calor) e bio sólidos.



Bibliografia e Leitura Recomendada

Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera — Resíduos Sólidos — Prof. Dr. Ronan Cleber Contrera

Bibliografia e Leitura Recomendada:

- Chernicharo, C. A. L. (1997), Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Reatores anaeróbios. Volume 5. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG. **Capítulos 1 e 2.**
http://www.sswm.info/sites/default/files/reference_attachments/LEMOS%20CHERNICHARO%202007%20Anaerobic%20Reactors.pdf
- Lettinga Associates Foundation (2009), Development of decentralized anaerobic digestion systems for application in the UK. Phase 1 – Final report. In:
http://www.communitycompost.org/CCN_documents/Small_scale_AD_for_CCN_Phase1_report.pdf
- Rapport, J.; Zhang R.; Jenkins, B. M.; Williams, R. B. - California Environmental Protection Agency (2008), Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste. In:
http://www.resol.com.br/textos/anaerobic_digestion_review_by_california.pdf
- Cassini, S. T. (coordenador) (2003), Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos e Aproveitamento do Biogás. PROSAB - Edital 3. In:
<http://www.finep.gov.br/prosab/livros/ProsabStulio.pdf>