

# **VALORIZAÇÃO ENERGÉTICA DE EFLUENTES PECUÁRIOS: DIGESTÃO ANAERÓBIA E PROCESSAMENTO TÉRMICO**

**José Luís da Silva Pereira, Ph.D.**

Escola Superior Agrária de Viseu

[jlperreira@esav.ipv.pt](mailto:jlperreira@esav.ipv.pt)

**Departamento de Zootecnia, Engenharia Rural e Veterinária**  
**Ano lectivo 2018/2019**

- Bioenergia: todos os tipos de energia derivados de biocombustíveis/ biomassa
- Biocombustíveis: combustíveis derivados de materiais de origem orgânica ou biomassa, usados para obter calor e/ou potencia
- Energias renováveis

## **Bioenergia**

Outras: Eólica, Solar (térmica e fotovoltaica), Hídrica, Geotérmica

# DIGESTÃO ANAERÓBIA

## Digestão anaeróbia

### 1. Introdução

- ❑ Tratamento de efluentes por digestão anaeróbia: sistema biológico que opera na ausência de oxigênio.
- ❑ Tratamento indicado para efluentes carregados (1500 mg L<sup>-1</sup> CBO<sub>5</sub>) e com elevada biodegradação.
- ❑ Grande desenvolvimento nos últimos 25 anos.
- ❑ Digestão anaeróbia: processo natural onde há conversão da matéria orgânica numa mistura gasosa (biogás) constituída por metano e dióxido de carbono

- Biogás - mistura de CH<sub>4</sub> (65%) e CO<sub>2</sub> (35%) com possíveis traços de H<sub>2</sub>S (<1%), com poder calorífico de 25 MJ m<sup>-3</sup>
- 1 m<sup>3</sup> biogás corresponde: 1,5 m<sup>3</sup> gás de cidade = 0,3 m<sup>3</sup> propano = 7 kWh = 0,8 L gasolina = 1,3 L álcool = 0,7 L gasóleo

# Digestão anaeróbia

## Composição típica do Biogás:

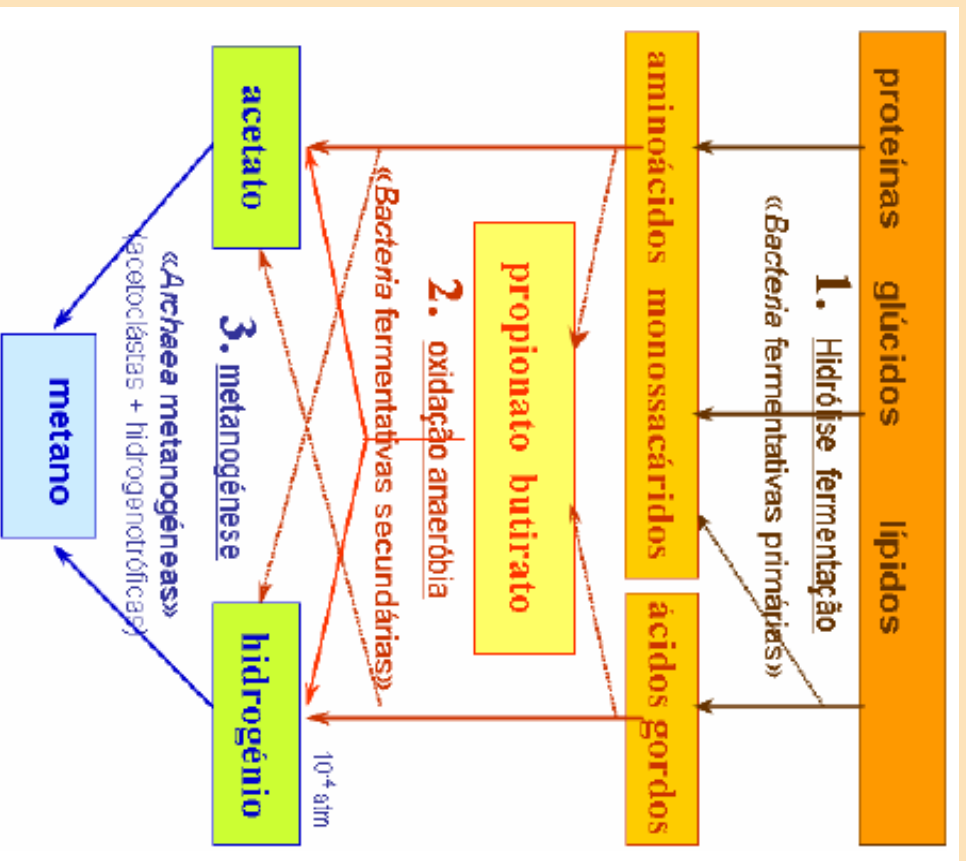
<i>Componente</i>	<i>Composições em % volumica</i>
Metano ( $\text{CH}_4$ )	55 – 80
Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )	50 – 40
Hidrogénio ( $\text{H}_2$ )	1 – 3
Azoto ( $\text{N}_2$ )	0,5 – 2,5
Oxigénio ( $\text{O}_2$ )	0,1 – 1
Sulfureto de Hidrogénio ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0,1 – 0,5
Amoníaco ( $\text{NH}_3$ )	0,1 – 0,5
Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ )	0,0 – 0,1

# Digestão anaeróbia

## 1. Introdução

- ❑ Intervêm diferentes espécies bacterianas que cooperam entre si, auto-regulando o processo de digestão.
- ❑ Entre 30 a 80% dos sólidos digeríveis são convertidos em biogás;
- ❑ O processo ocorre em três etapas:
  1. solubilização dos compostos orgânicos de maior peso molecular,
  2. formação de ácidos gordos voláteis
  3. metanogénese

# Digestão anaeróbica



# Digestão anaeróbica



# Digestão anaeróbia

## 2ª Etapa – Fase Acidogénica

Produtos provenientes da 1ª Etapa:

- formam a dieta alimentar de uma série de estirpes bacterianas anaeróbias



Metabolismo bacteriano

Produção de compostos de baixo peso molecular e gases com teores de  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  reduzidos – responsáveis pelo poder corrosivo e odor do gás

# Digestão anaeróbia

## 3ª Etapa – Fase Metanogénica

Produtos provenientes da 2ª Fase:

- as bactérias metanogénicas entram em actividade, degradando os ácidos voláteis produzidos nas fases anteriores



Degradação metanogénica

Biogás:

- Libertação da mistura gasosa com características de gás combustível

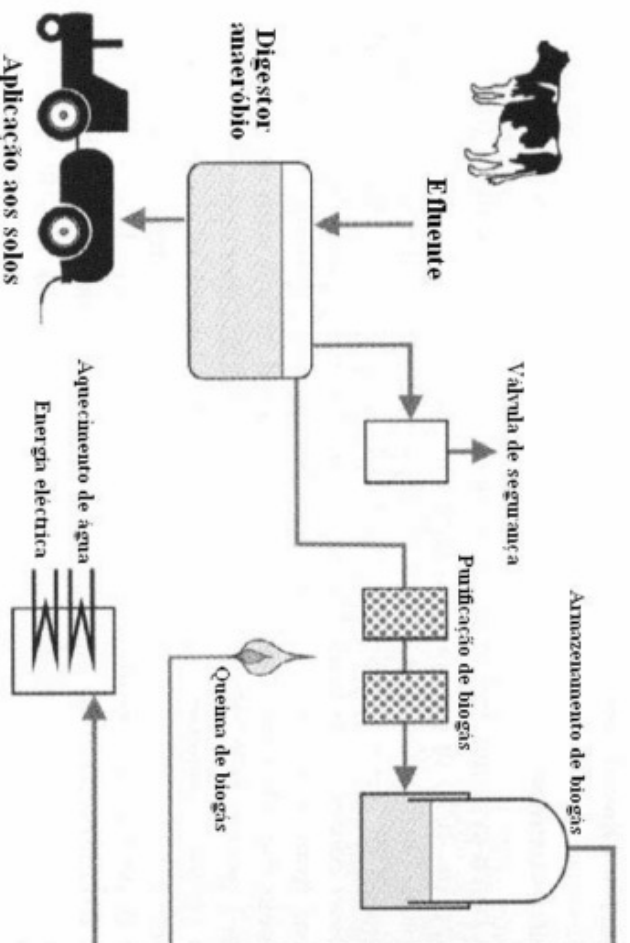
## Digestão anaeróbia

### 2. Integração da digestão anaeróbia na gestão de efluentes pecuários

- ❑ Boa conversão de carbono orgânico em metano, e retenção do azoto e o fósforo no produto final, tornando-o mais apropriado para a aplicação aos solos;
- ❑ Aumento do valor fertilizante dos chorumes após tratamento anaeróbio: conversão dos compostos insolúveis de azoto em sais de amónio (mais fácil e rapidamente assimilados pelas plantas);
- ❑ Um efluente bem digerido apresenta normalmente um odor pouco intenso: reduz problemas durante aplicação ao solo.

## Digestão anaeróbia

### 3. Principais componentes de um sistema de digestão anaeróbia com aproveitamento de biogás para uma exploração de bovinicultura



## Digestão anaeróbia

3. Principais componentes de um sistema de digestão anaeróbia com aproveitamento de biogás para uma exploração de bovinicultura

- ❑ Factor limitante: existência de um efectivo pecuário mínimo, de forma a produzir-se uma quantidade de biogás suficiente para viabilizar economicamente o investimento.
- ❑ Aproveitamento do biogás para aquecimento ou produção de energia eléctrica implica a aquisição e/ou adaptação de equipamentos específicos devido às características do biogás.
- ❑ Produção de energia eléctrica a partir do biogás só em explorações com mais de 500 vacas leiteiras / 525 no EDM, segundo estudo de Soares et al. (2005).

## Digestão anaeróbia

### 4. Factores que influenciam o processo de digestão anaeróbia

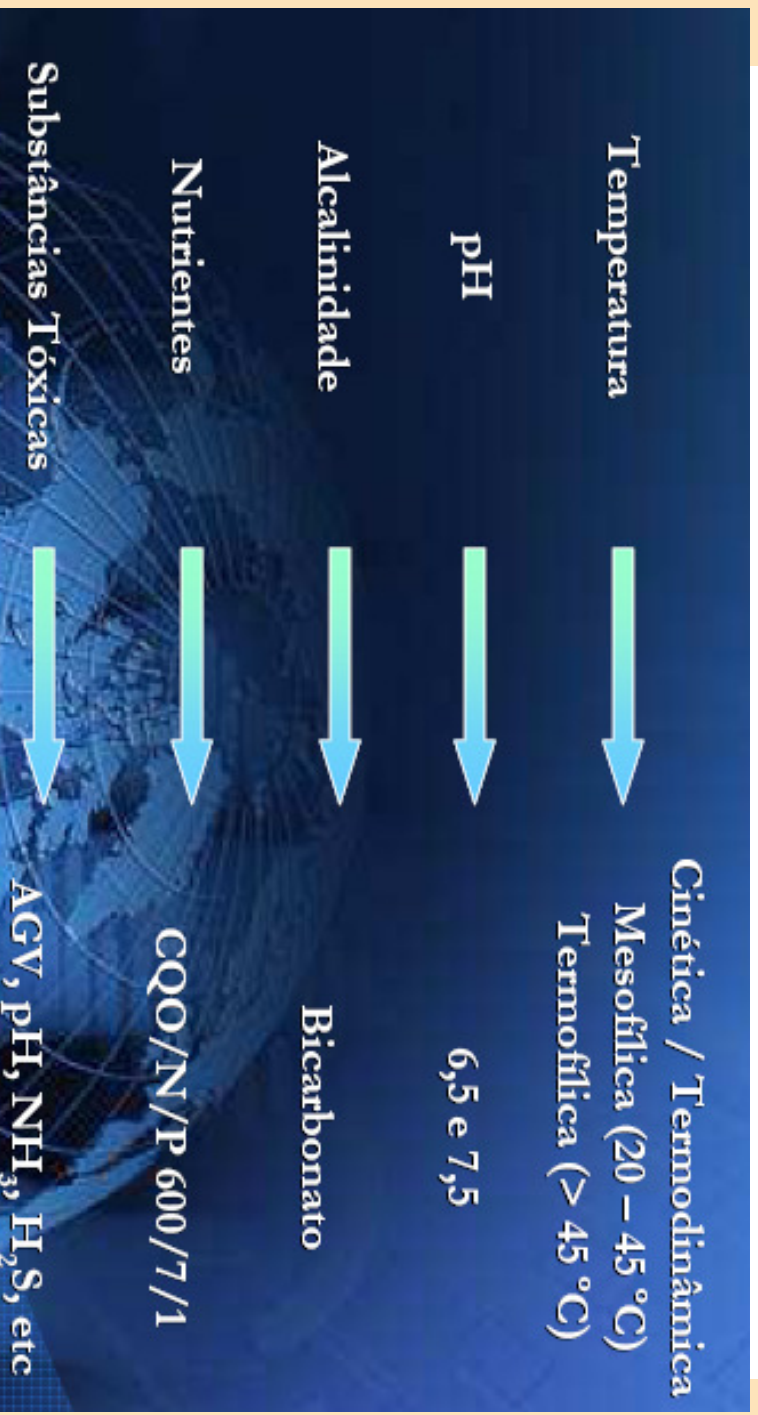
A taxa e a eficiência do processo de digestão anaeróbia são influenciadas pelos seguintes factores:

- ❑ temperatura,
- ❑ carga orgânica,
- ❑ tempo de retenção hidráulica: digestores anaeróbios para o tratamento de efluentes de bovinicultura são geralmente dimensionados para um tempo de retenção hidráulico **entre 15 e 20 dias**. Tempos de retenção hidráulico observados em digestores a operarem à escala real são, em média, **cerca de 30 dias**. Contudo, o tempo necessário à estabilização do processo de digestão anaeróbia pode ser superior a 70 dias

## Digestão anaeróbia

### 4. Factores que influenciam o processo de digestão anaeróbia

#### ☐ tempo de retenção dos sólidos

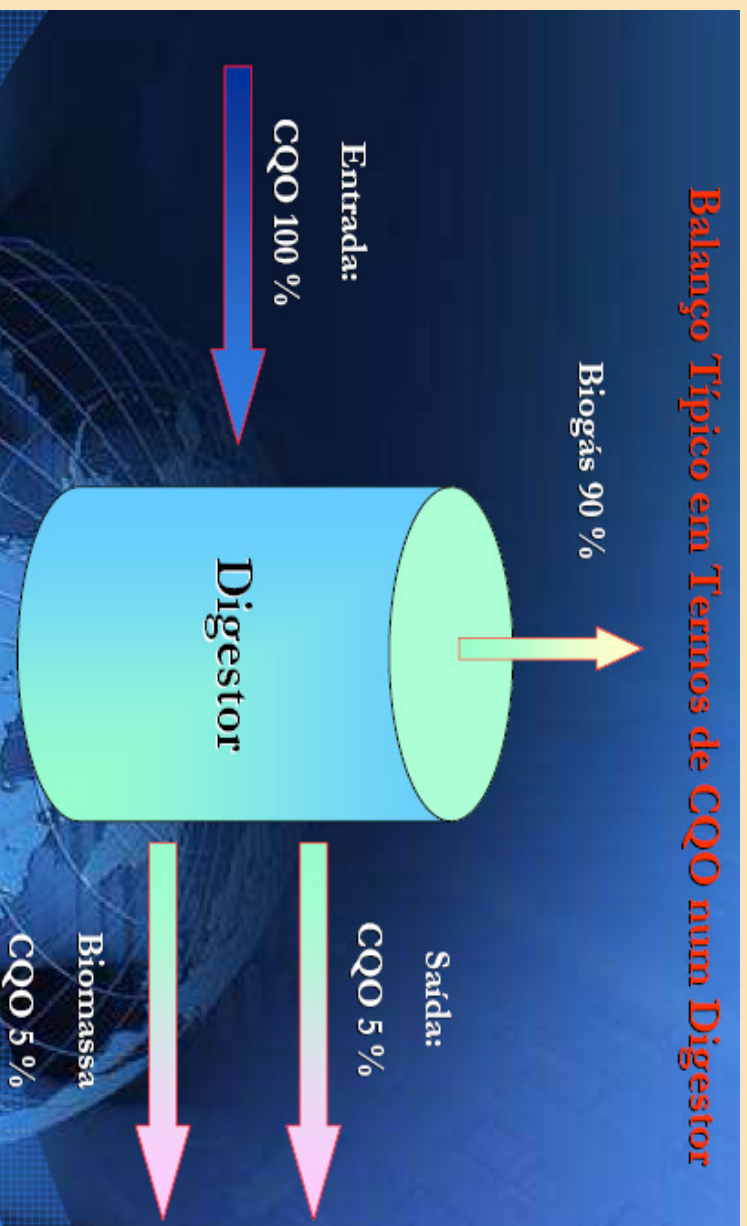


## Digestão anaeróbia

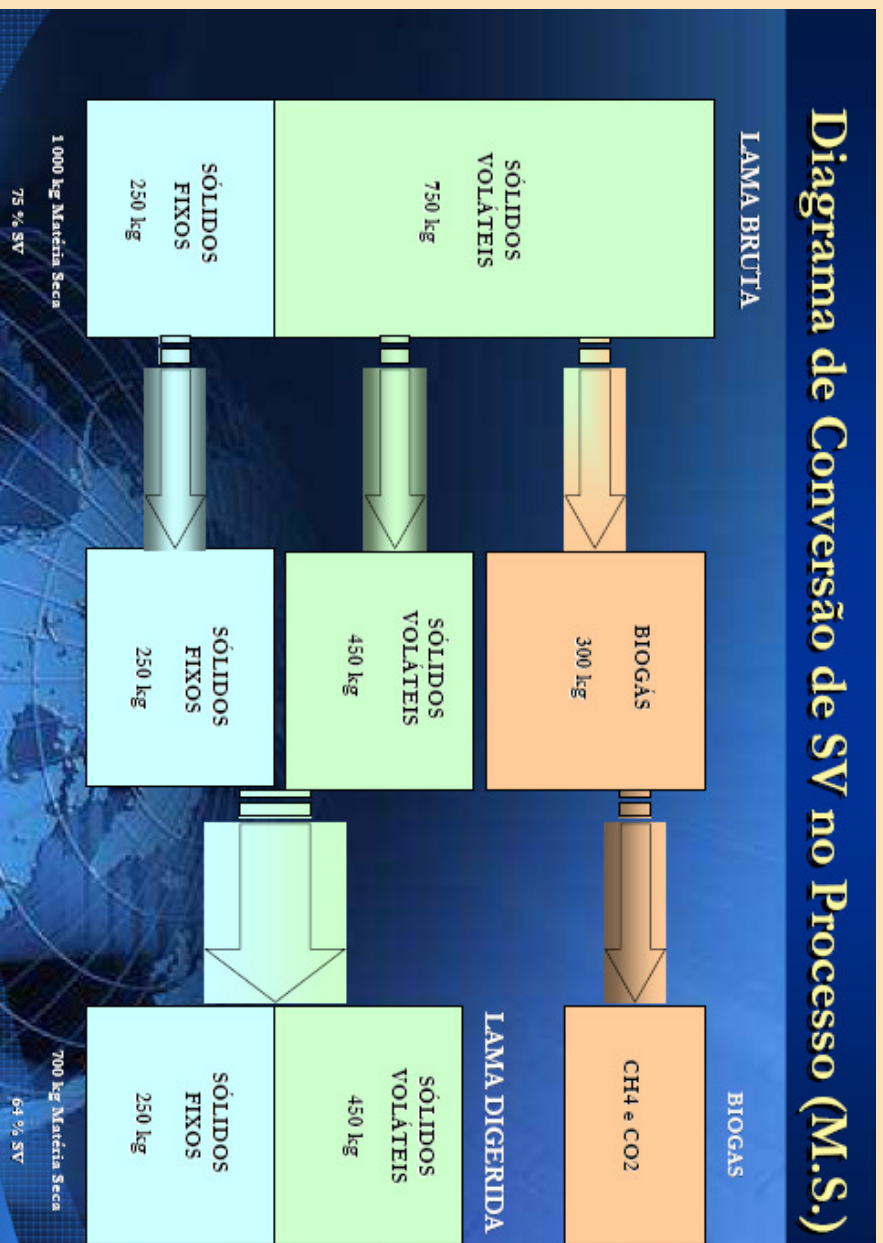
### 5. Eficiência do processo de digestão anaeróbia

- ☐ indicador mais evidente: produção de biogás
- ☐ Carência química de oxigénio (CQO): parâmetro químico indicado para a realização de estimativas sobre a produção de biogás
  - ✓ existe uma relação estequiométrica entre a produção de metano e este parâmetro
  - ✓ São produzidos 0,35 m<sup>3</sup> de metano por cada kg de CQO removido através da digestão anaeróbia.
  - ✓ teores de CQO à entrada e à saída de um digestor + produtividade específica: verificação da estabilidade do processo.
- ☐ Avaliação do potencial metanogénico do substrato orgânico em termos de sólidos voláteis e de produção de biogás.
  - ✓ Efluentes de bovinicultura leiteira: produção de biogás entre 0,2 e 0,3 m<sup>3</sup> por kg de sólidos voláteis (SV) que entram no digestor com um teor de 60% a 65% em metano no biogás

# Digestão anaeróbica



# Digestão anaeróbica



# Digestão anaeróbia

## Comparação Entre Influyente / Lama Bruta e Efluente / Lama Digerida

Influyente / Lama Bruta	Efluente / Lama Digerida
<p>Materia Orgânica Instável</p> <p>Elevada Fracção Biodegradável na Materia Orgânica</p> <p>Alto Potencial para Geração de Odores</p> <p>Elevada Concentração de Microorganismos Patogénicos</p>	<p>Materia Orgânica Estabilizada</p> <p>Baixa Proporção de Fracção Biodegradável</p> <p>Baixo Potencial para Geração de Odores</p> <p>Concentração de Patogénicos Inferior à da Lama Bruta / Influyente</p>

# Digestão anaeróbia

## 7. Purificação do biogás

- ☐ Biogás rico em sulfureto de hidrogénio: odores desagradáveis.
- ☐ Por essa razão, o biogás deve ser tratado antes de ser utilizado.
- ☐ Tratamento:
  - ✓ Eliminação das partículas em suspensão, através da passagem por uma coluna de água, e do vapor de água
  - ✓ Remoção do gás sulfídrico, por filtração a seco com limalha de ferro previamente oxidada.
  - ✓ Mais recentemente, desenvolveu-se um sistema de remoção do sulfureto de hidrogénio através da injeção de ar junto à interface ar/líquido, com um caudal reduzido, promovendo-se assim a oxidação dos sulfuretos no interior do digestor

# Digestão anaeróbia

## 8. Processos de digestão anaeróbia

As configurações de digestores anaeróbios que são utilizados no tratamento de efluentes de bovinicultura podem ser divididos em processos:

- ☐ de baixa carga: lagoas anaeróbias cobertas, digestores de fluxo em pistão, e digestores contínuos de mistura completa que operam na gama mesofílica.
- ☐ de alta carga: reactores contínuos de mistura completa que operam na gama termofílica, digestores anaeróbios de contacto, digestores híbridos e filtro anaeróbio.

# Digestão anaeróbia

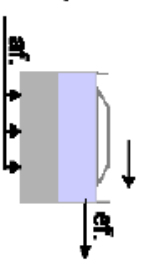
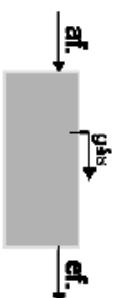
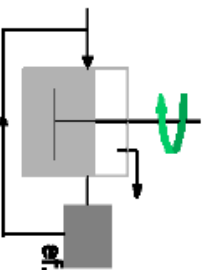
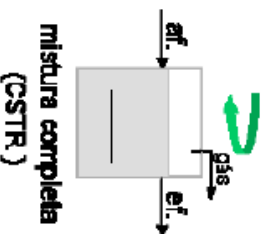
## 8. Processos de digestão anaeróbia

Várias configurações de reactores continuam a ser investigadas em vários países, mas na prática existem basicamente três tipos de digestores à escala real:

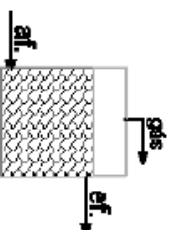
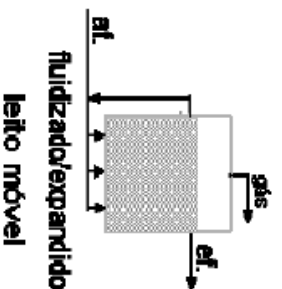
- ☐ lagoas anaeróbias,
- ☐ digestores de fluxo pistão
- ☐ digestores de mistura completa

# Digestão anaeróbia

## ▶ biomassa em suspensão [sem suporte]



## ▶ biomassa imobilizada [com suporte]



# Digestão anaeróbia

## 8. Processos de digestão anaeróbia

Os digestores anaeróbios devem ser configurados de forma a resolverem as seguintes situações:

- ☐ Promover o contacto entre a biomassa e as diferentes fracções da matéria orgânica;
- ☐ Maximizar o potencial metanogénico dos efluentes;
- ☐ Operar o processo em condições óptimas de temperatura, pH e humidade;
- ☐ Digerir os efluentes ao custo mais baixo possível e de modo apropriado relativamente à localização e dimensão da exploração.

# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

- ❑ Para otimizar o investimento: limite mínimo de produção de biogás de 1 m³ por m³ de digestor.
- ❑ Deve ser tido em conta o método de remoção dos efluentes das instalações pecuárias e o grau de diluição.

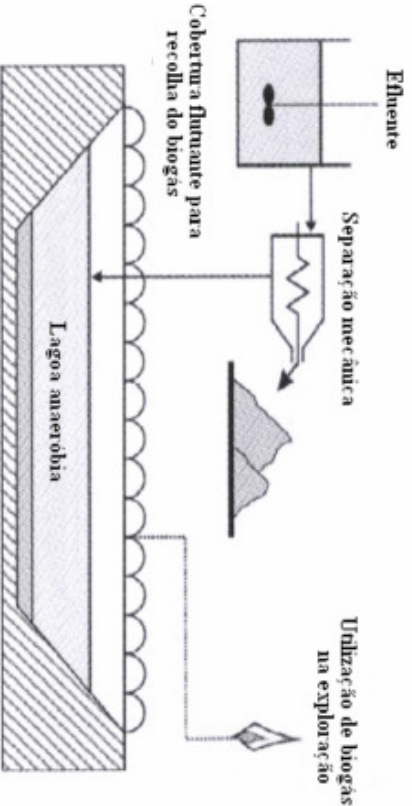
				SOLIDOS TOTAIS(%)						
				0	5	10	15	20	25	30
RESIDUO	ADIÇÃO DE AGUA						ADIÇÃO MATERIAL DE CAMAS			
				TAL COMO PRODUZIDO						
CLASSIFICAÇÃO DO RESIDUO	LÍQUIDO	SEMI-LÍQUIDO	SEMI-SÓLIDO				SÓLIDO			
	BOMBAGEM			ARRASTE			ARRASTES E ARRAZAMENTO			
RECOLHA DO RESIDUO										
PRODUÇÃO DE BIOGAS	RECOMENDADO						NÃO RECOMENDADO			
TIPO DE DIGESTOR	LAGOA COBERTA / FILME FIXO			MISTURA COMPLETA			FLUXO PISTÃO			

# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

### A-Lagoa anaeróbica coberta

- ❑ Utilizam-se telas em HDPE (polietileno de alta densidade) ou Hypalon na cobertura da lagoa anaeróbica para o armazenamento do biogás, e dispositivos de extração do gás.

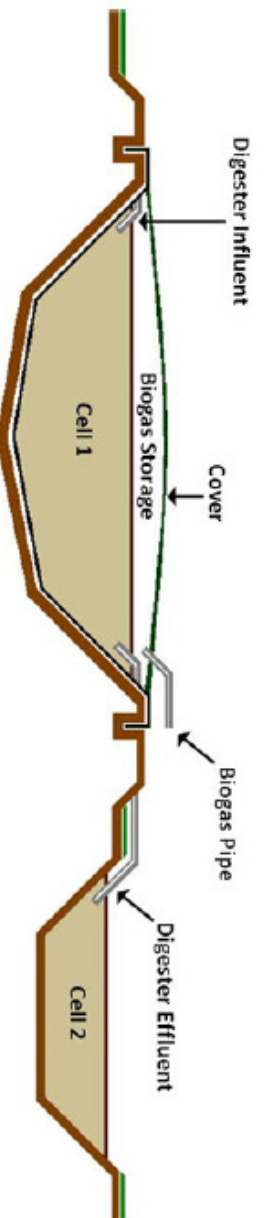


# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

### A-Lagaa anaeróbica coberta

- ❑ O operador não exerce qualquer influência sobre a distribuição de sólidos, taxas de digestão e produção de biogás.
- ❑ Nos meses mais frios, o abaixamento da temperatura pode constituir um problema em termos de produção e valorização do biogás.



# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

### A-Lagaa anaeróbica coberta



<http://www.epa.gov/agstar/anaerobic/ad101/anaerobic-digesters.html>

# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

### A-Lagoa anaeróbica coberta

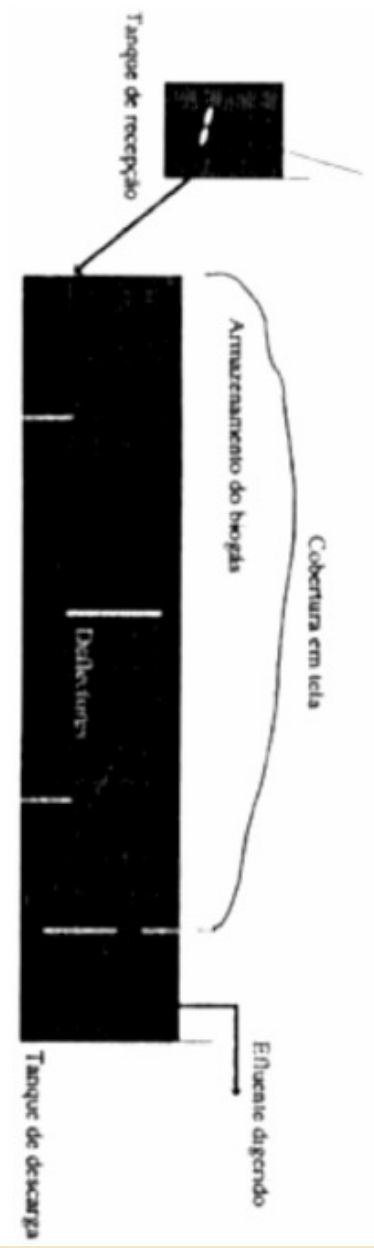


# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

### B-reactor de fluxo pistão (plug flow)

- ❑ Alimentação num dos seus extremos, sendo o efluente depurado removido pelo lado oposto



# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

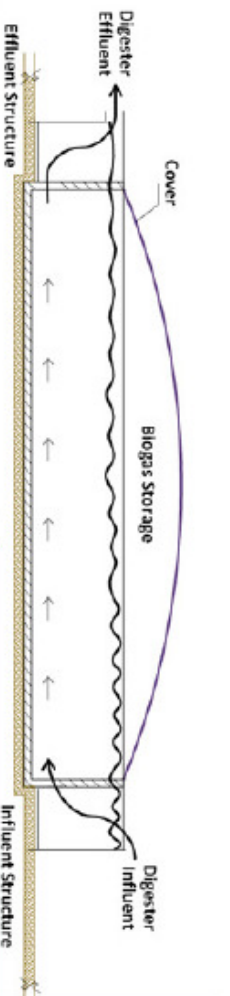
### B-reactor de fluxo pistão (plug flow)

- ❑ O fluxo no interior do reator move-se idealmente como um pistão. Este tipo de digestor encontra-se particularmente bem adaptado ao tratamento de efluentes com elevado teor de sólidos (5-10%)
- ❑ Ausência de órgãos mecânicos e a simplicidade de concepção tornam este tipo de digestor bastante bem adaptado às explorações de bovinicultura

# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

### B-reactor de fluxo pistão (plug flow)



# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

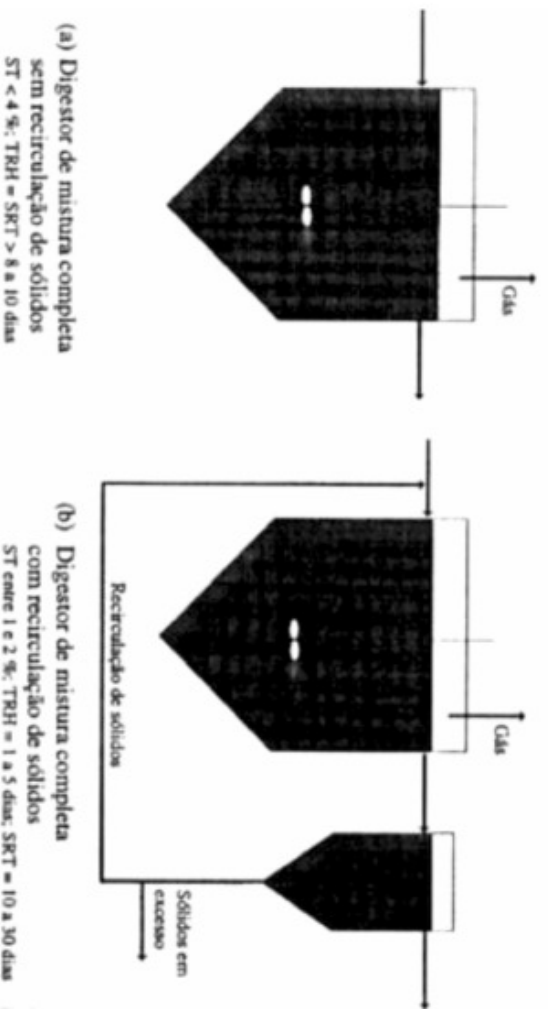
### Limitações das lagoas e digestor tipo pistão

- ❑ digestores sem aquecimento
- ❑ Produção de biogás nos meses de Inverno é bastante reduzida ( $0,1$  a  $0,5 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ dia}^{-1}$ )
- ❑ Mas nos meses de Verão é possível obterem-se produções superiores a  $10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ dia}^{-1}$ .
- ❑ Contudo, a instalação de dispositivos de aquecimento, por exemplo por água quente permite aumentar a eficiência dos digestores em cerca de 50%.

# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

### C-Digestores de mistura completa com ou sem recirculação de sólidos



# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

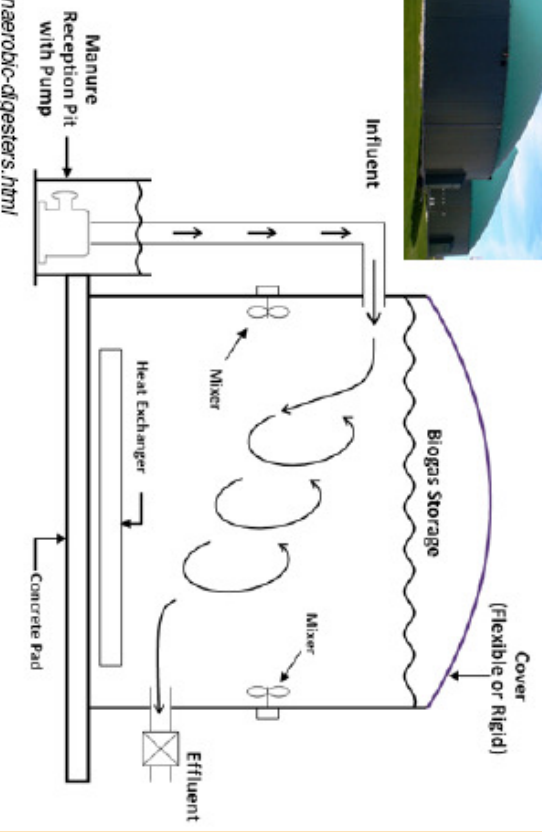
C-Digestores de mistura completa com ou sem recirculação de sólidos

- ❑ Apropriados para o tratamento de efluentes com baixa concentração em sólidos totais (entre 1% e 4%).
- ❑ Com recirculação de sólidos (digestores de contacto): maior eficiência quanto mais diluído for o efluente.
- ❑ MAS têm custos de investimento e de operação mais elevados.

# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

C-Digestores de mistura completa com ou sem recirculação de sólidos



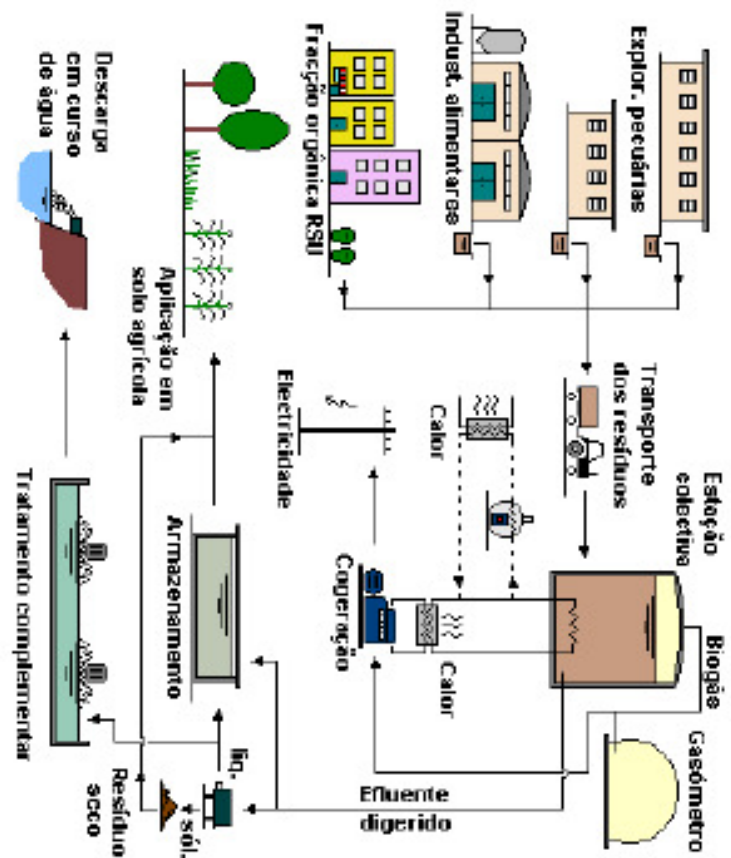
# Digestão anaeróbica

## 8. Processos de digestão anaeróbica

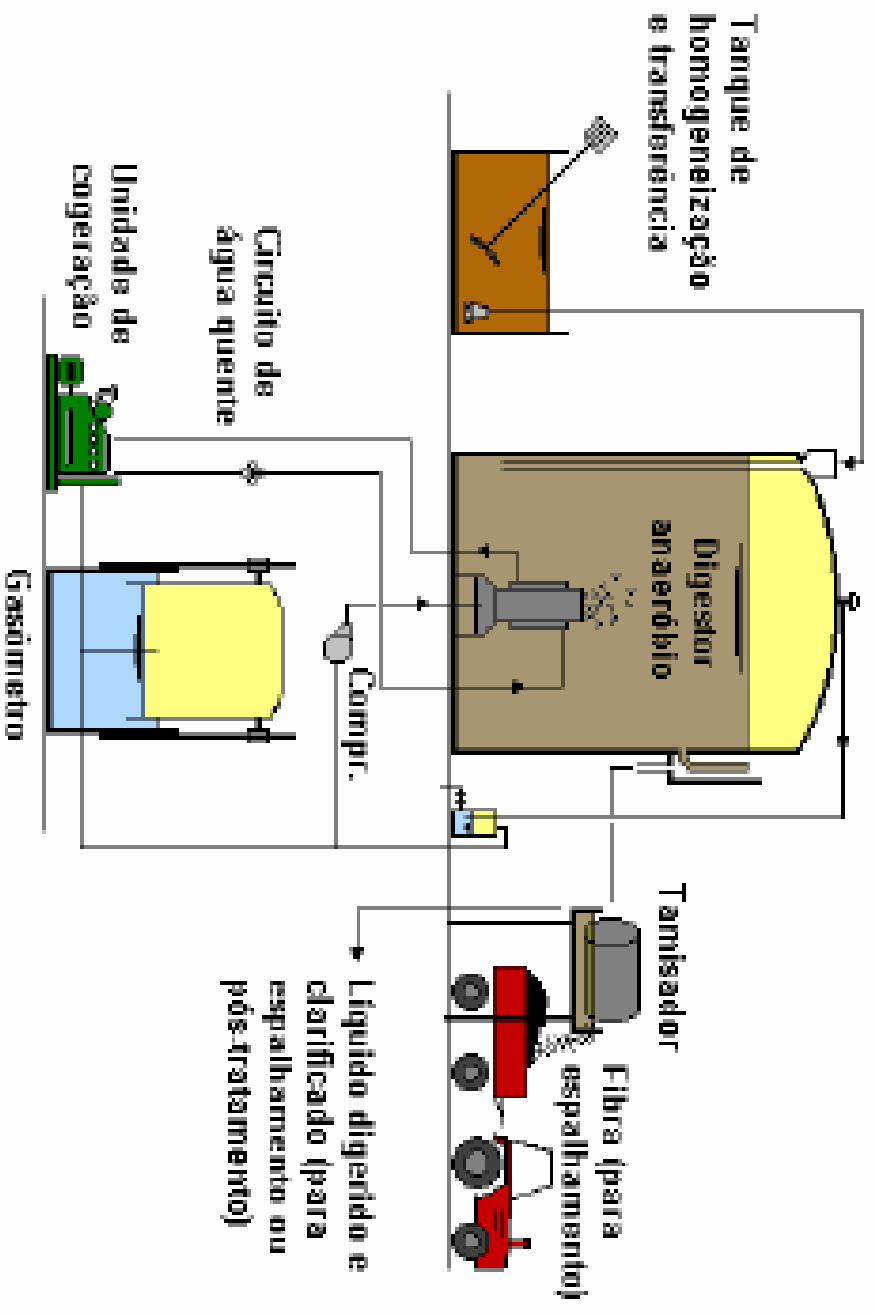
❖ Características de funcionamento e às eficiências de diversos tipos de digestores, quando aplicados ao tratamento de efluentes de bovinicultura leiteira.

	Lagoa coberta	Fluxo em pistão	Mistura completa	Contacto
Temperatura (°C)	10-23	35	35	35
Carga orgânica (kg SV m <sup>-3</sup> dia <sup>-1</sup> )	0.1-0.2	3-4.5	4.7	4.3
TRH (dias)	>50	30-40	18	15
Produção gás (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> SV)	0.39	0.37-0.41	0.27	0.33
Metano (%)	70	63	63	62

# Digestão anaeróbica



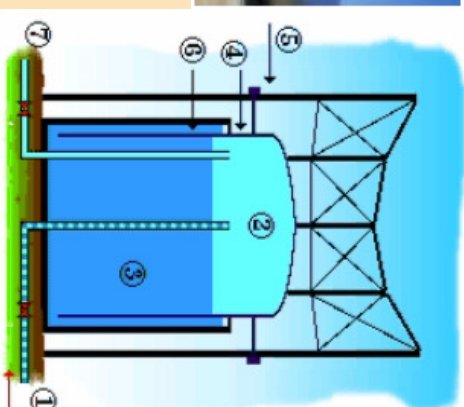
# Digestão anaeróbica



# Digestão anaeróbica



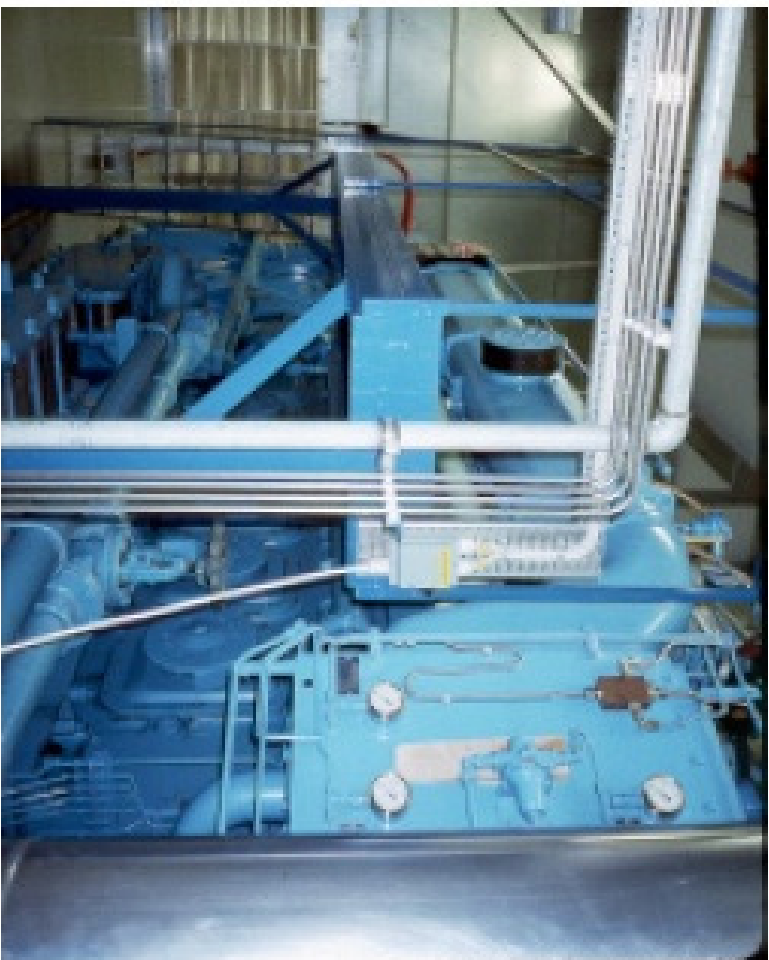
## Digestão anaeróbia



## Digestão anaeróbia

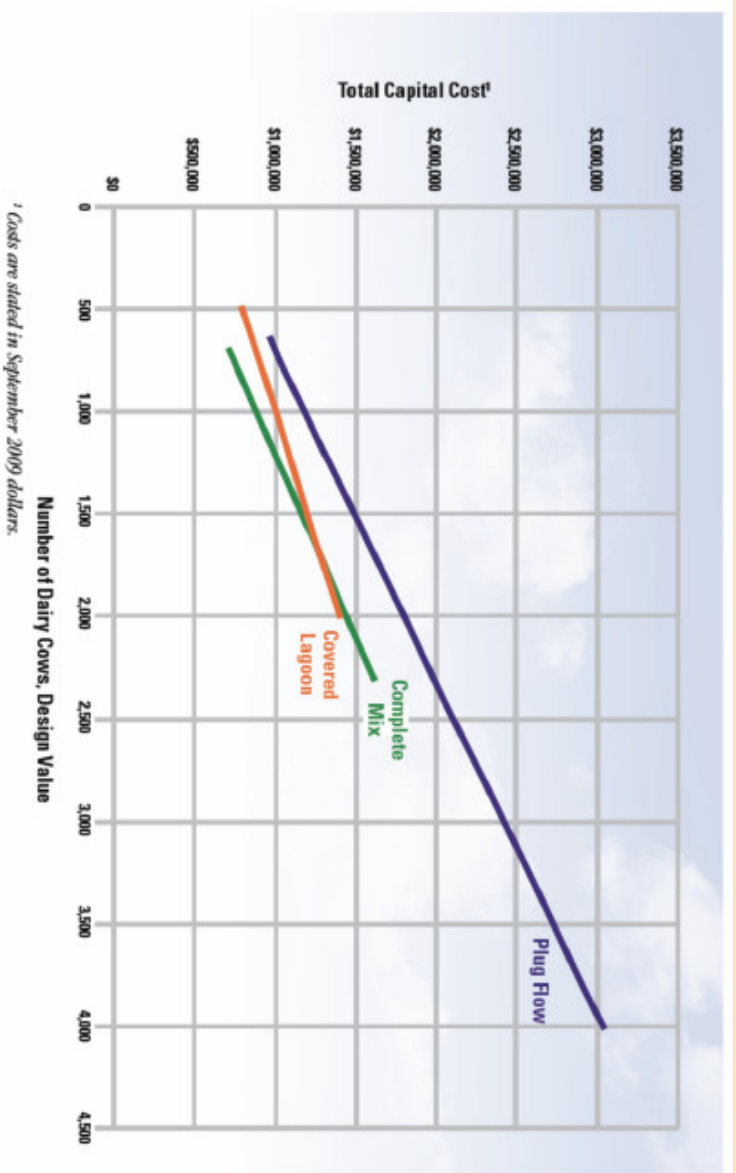


# Digestão anaeróbica



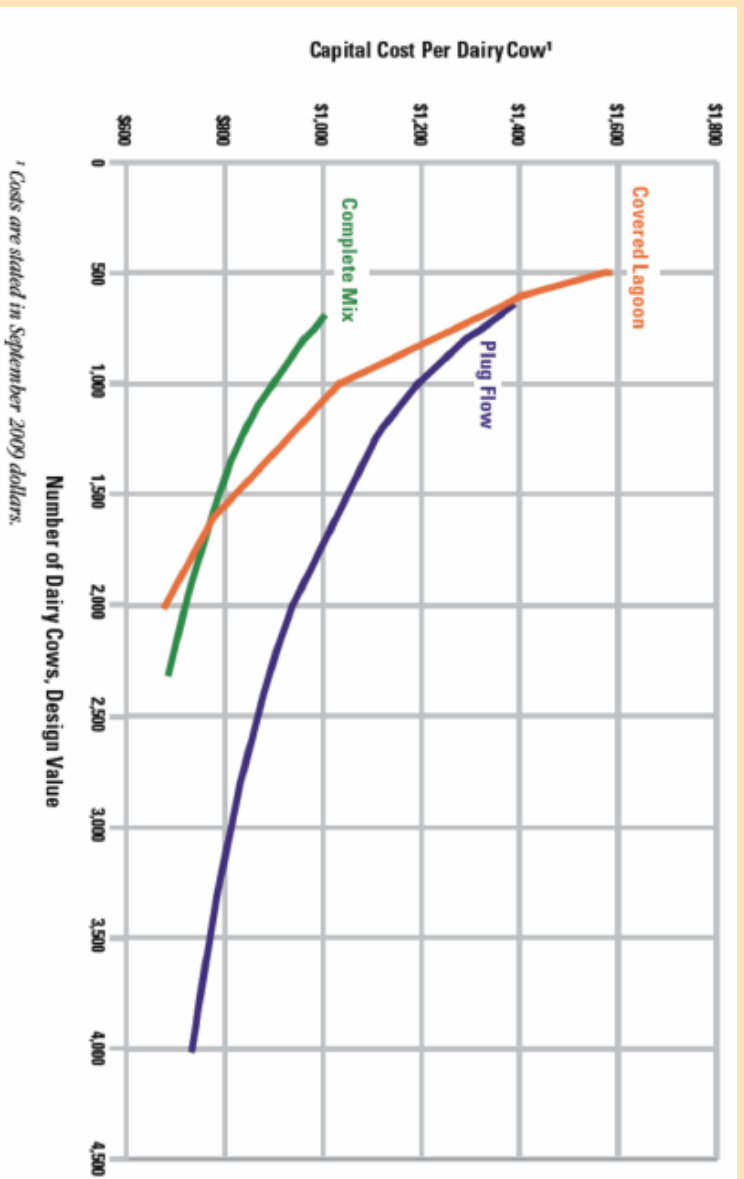
A compact unit that scrubs and compresses biogas for use as an alternative motor fuel

## Construção de um digestor



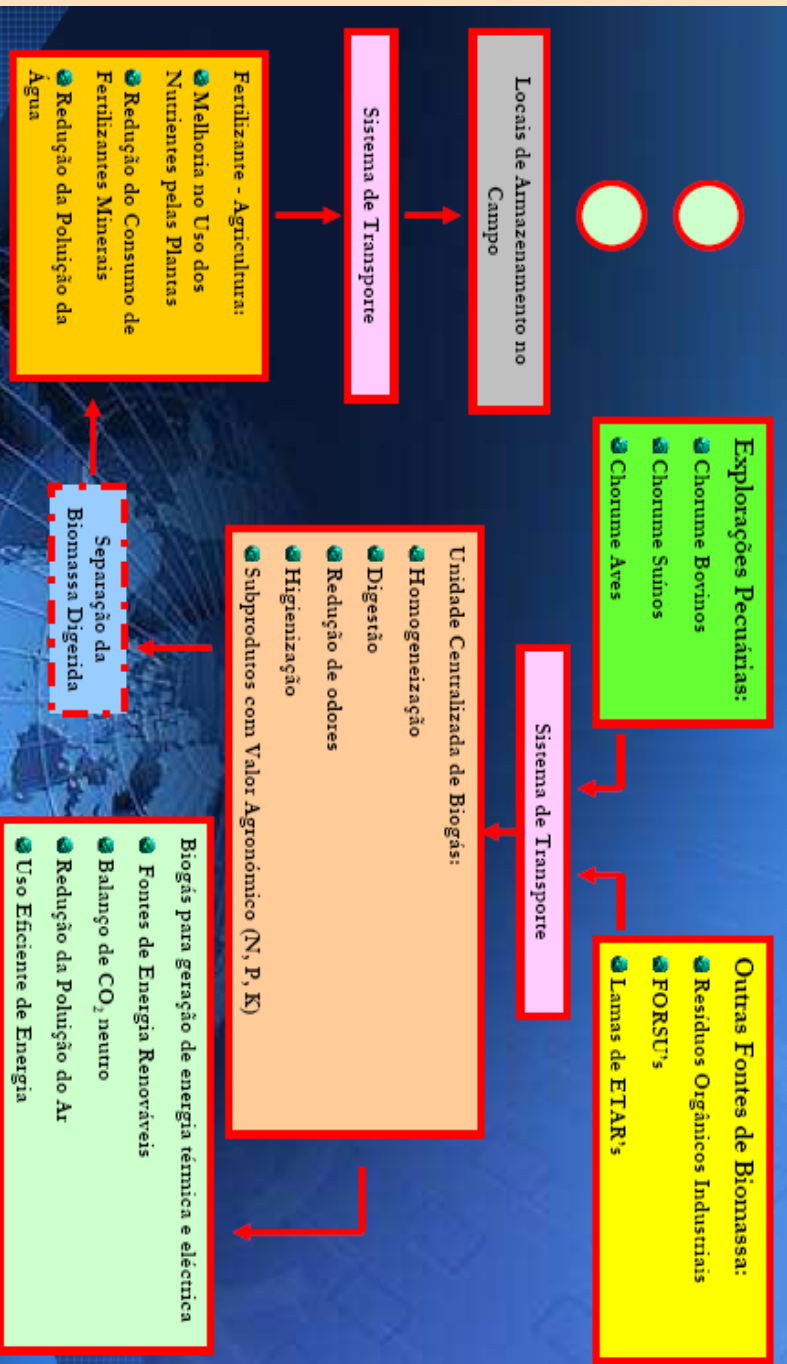
<sup>1</sup> Costs are stated in September 2009 dollars.

# Digestão anaeróbica



# Digestão anaeróbica

## Conceito Integrado – Unidade Centralizada de Co-Digestão



# CONVERSÃO TÉRMICA

## Conversão térmica

### Fontes e potencial da biomassa:

Origem	Valor energético MJ/ kgMS
Resíduos urbanos	RSU:resíduos sólidos urbanos 12,7 Biosólidos: lamas de ETAR 19,0
Resíduos agrícolas sólidos	Pecuária 13,5 - 17,8 (animais estabulados: aves, bobinos, ovinos, suínos)
Resíduos florestais	Resíduos de culturas 18,6 (deixados no campo ou resultantes da limpeza e selecção do produto)
Resíduos industriais	Resíduos do corte de árvores Resíduos da transformação da madeira Resíduos industriais Resíduos da indústria de pasta para papel

# Conversão térmica – processos de preparação dos resíduos e de valorização

## Conversões energéticas da biomassa

Processos físicos	Secagem Redução de tamanho Densificação Separação
Processos térmicos	Combustão Pirólise e Liquefacção Gaseificação
Processos naturais	Liquefacção
Síntese industrial	Combustíveis líquidos
Processos microbiológicos	Metano Hidrogénio

## Conversão térmica - preparação dos resíduos

- **Aumentar a densidade**
  - densificação resíduos diminui custos de investimento, mas reduz 1 a 5% o seu conteúdo térmico
  - conjugada com diminuição do tamanho das partículas
- **Ajustamento do tamanho das partículas (corte ou pulverização)**
  - tamanho partículas afecta velocidade de reacção
  - maior eficiência com partículas de dimensão padronizada
  - adaptação tamanho das partículas ao equipamento
- **Desidratação**
  - teor mínimo humidade depende do tipo de material
  - teor humidade > 65% - extracção de água por prensagem
  - < 20% de humidade – usar aquecimento de baixo nível (por ex: gases de exaustão)
- **remover objectos não combustíveis**

## Conversão térmica



## Conversão térmica – exemplo camas de aves

### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO MATERIAL

RESÍDUO		ESPECIFICAÇÃO
Tipo do material		Estrume de galinha
Espécie		Estrume de galinha
% da Mistura		65
Humidade de entrada antes do secador (%)		65 100
Humidade de saída após o secador (%)		30 10
Densidade do Material Húmido ( $\text{Kg/m}^3$ )		150
Densidade do Material Seco ( $\text{Kg/m}^3$ )		140

Conversão térmica – exemplo secador camas aves

CARACTERÍSTICAS GERAIS DO SECADOR			
SECADOR		ESPECIFICAÇÃO	
Secador (Modelo)		Tambor Rotativo	
Capacidade Nominal Entrada do Secador (Material Húmido) (Kg)		3.720,0	
Capacidade Nominal Saída (Material Seco) (Kg)		2.000,0	
Dimensões do Secador (Ø Nominal x Comprimento) (mm)		Ø 2.300 x 12000	
Potência Accionamento Tambor (CV)		15,0	
Formalha (Modelo)		Convencional (Tijolos)	
Temperatura Entrada no Secador (Graus)		400-500	
Volume de Gases Quentes Gerados na Formalha (N*m³/h)		22.229,30	
Combustível		Resíduos de Madeira	
Exaustor de Tiragem (Modelo)		Centrífugo	
Potência Exaustor de Tiragem (cv)		40,0	
Volume de gases (N*m³/h)		23.000,0	
Ciclone (Modelo)		Centrífu	
(Ø Nominal x Altura Conjunto) (mm)		1.100 x 6.000	
Quantidade		01	
CONSUMO DE ENERGIA			
Potência CV		Potência KW	
TOTAL		72,0 52,99	

Quadro I - Principais processos de conversão térmica de resíduos

Processo	Produto de conversão	Pré-processamento
Combustão(Incineração)	Energia na forma de vapor ou electricidade	Nenhum em incineradores; adequação dos resíduos ao equipamento
Pirólise	Gás de média energia, combustível líquido, combustível sólido (carvão)	Separação da fracção orgânica, redução do tamanho de partícula, preparação de cubos ou outras formas combustíveis derivadas
Gaseificação	Gás de baixa energia	Separação da fracção orgânica, redução do tamanho de partícula, preparação de cubos ou outras formas combustíveis derivadas
Gaseificação com vapor de água	Gás de média energia	Separação da fracção orgânica, redução do tamanho de partícula, preparação de cubos ou outras formas combustíveis derivadas
Hidrogaseificação/hidro genação	Gás de média energia combustível líquido	Separação da fracção orgânica, redução do tamanho de partícula, preparação de cubos ou outras formas combustíveis derivadas
Oxidação por via húmida	Ácidos orgânicos	Separação da fracção orgânica, redução do tamanho de partícula, preparação de cubos ou outras formas combustíveis derivadas

- Conversão térmica
- Processos

## **Conversão térmica – principais processos**

### **• Combustão**

- produção directa de calor, não ocorrendo perdas directas aos processos de conversão
- resíduos com baixo teor de humidade
- granulometria dos resíduos
- energia libertada é parcialmente transferida por convecção, condução e radiação para as paredes do incinerador e resíduo admitido
- utilização de quantidade de oxigénio superior à estaquiométrica, formando-se essencialmente dióxido de carbono e vapor de água
- equipamentos: caldeiras tubulares, caldeiras de concha, e fornalha de ciclone, sistemas de leito fluidizado, e incinerador de combustão controlada

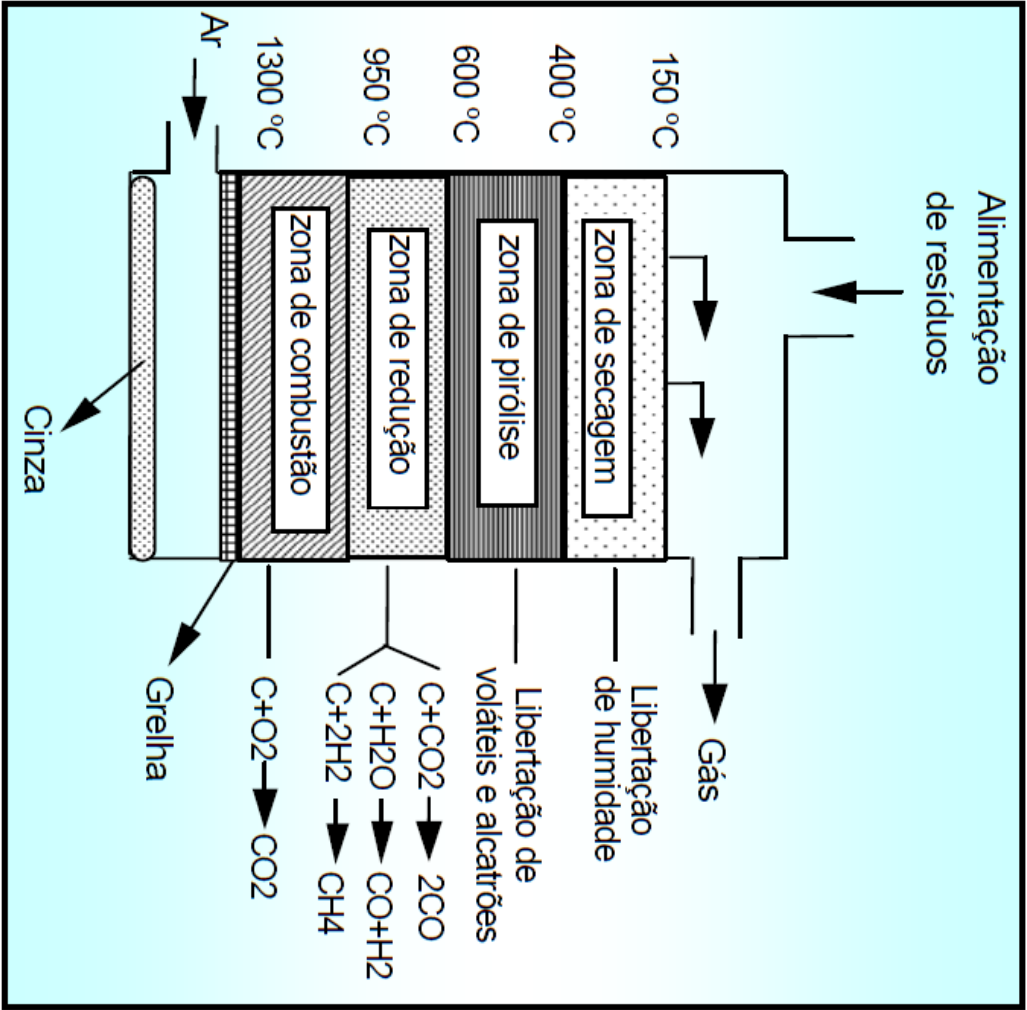
## **Conversão térmica – principais processos**

### **• Gaseificação**

- processo termoquímico que permite a conversão de resíduos de biomassa num gás combustível (rico em hidrogénio, monóxido e dióxido de carbono e metano)
- produtos da gaseificação são maioritariamente gasosos
- tecnologia mais limpa que incineração porque não resultam óxidos de azoto, de enxofre e dioxinas
- agente de gaseificação é ar (ou oxigénio) ou vapor de água à temperatura de 800 - 900 °C
- Combustão difere da gaseificação pela relação ar/combustível que é utilizada
- utilização de quantidade de oxigénio sub- estaquiométrica, envolvendo as etapas seguintes: secagem, pirólise, redução, oxidação

**Conversão  
térmica**

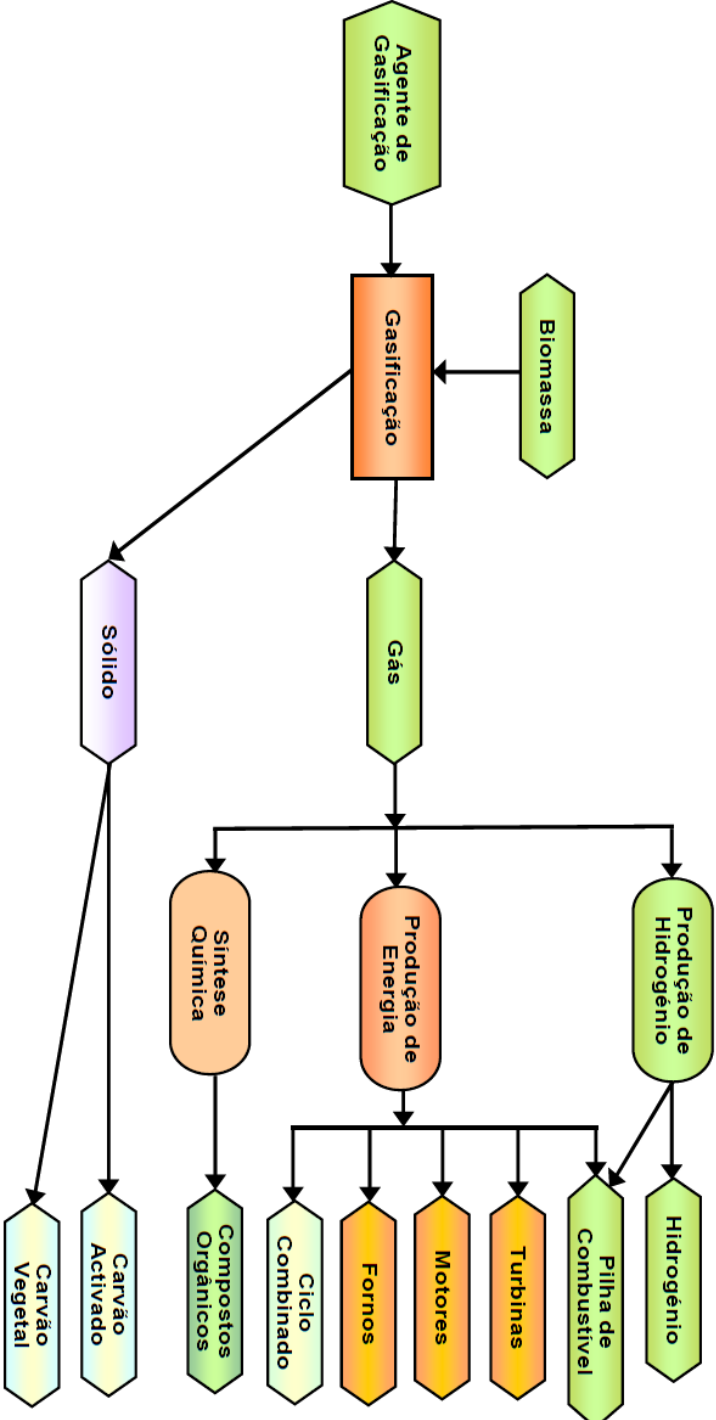
**Reações que  
ocorrem  
durante a  
gaseificação**



**Conversão térmica – tipo de gaseificadores e principais características**

	Leito Fixo	Leito Fluidizado	Leito em Suspensão
Tipo de Combustível	Sólido	Sólido	Sólido e líquido
Granulometria (combust. sólido)	5 – 50 mm	0,5 – 5 mm	< 500 $\mu$ m
Tempo de Residência do Combustível	15 – 30 min	5 – 50 s	1 – 10 s
Temperatura de Saída do Gás	400 – 500 °C	700 – 900 °C	900 – 1 400 °C

# Conversão térmica – potencialidades do gás de gaseificação



# Conversão térmica – instalação de gaseificação

Instalação de Gasificação de Biomassa com Motor de Combustão Interna de 70 kW<sub>e</sub>

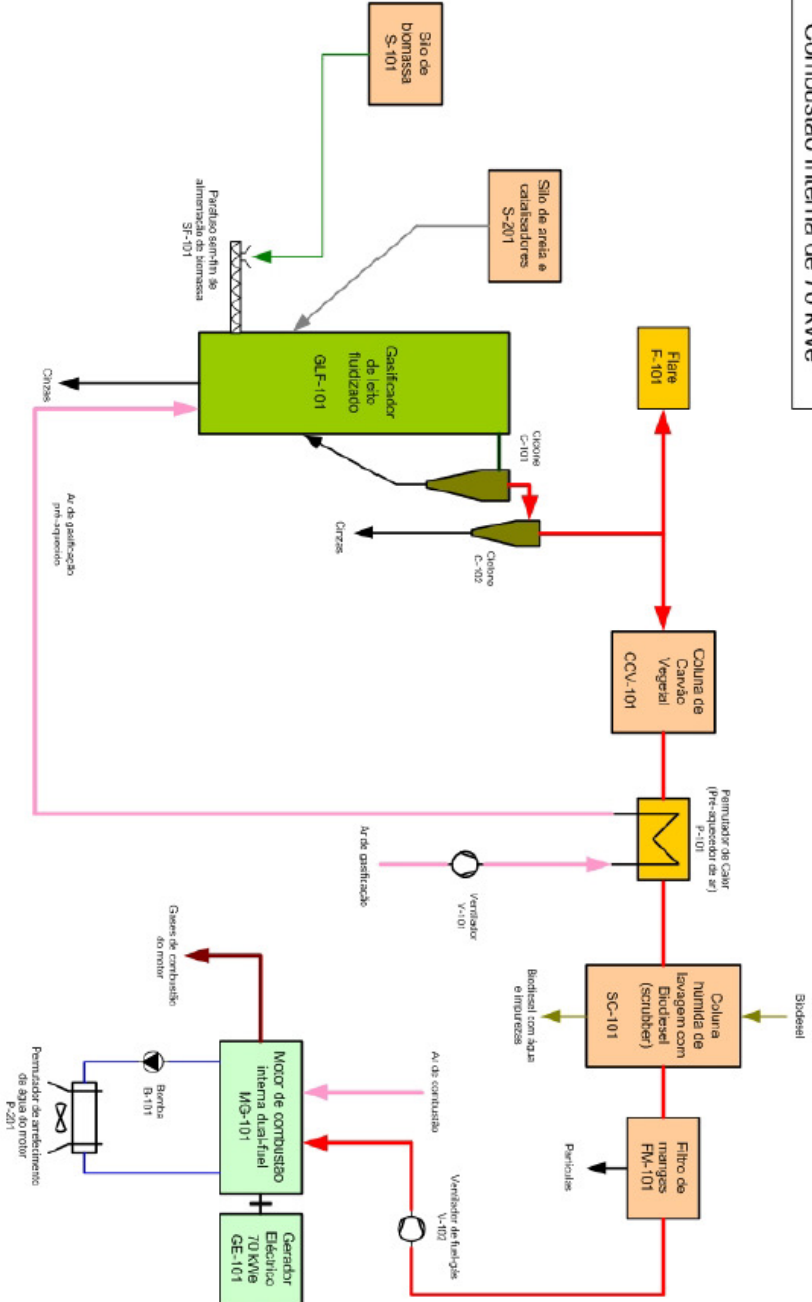


Figura VII.6 Diagrama da instalação de gasificação de biomassa com motor de combustão interna de 70 MW<sub>e</sub>.

# Conversão térmica – combinação de processos de tratamento e valorização

