

Soluções Energéticas Sustentáveis para as Ilhas



ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O
DESENVOLVIMENTO INDUSTRIAL



Bioenergia. Digestão Anaeróbica de Resíduos Orgânicos para Soluções Energéticas

*SIDS DOCK em cooperação com PCREEE, CCREEE e ECREEE.
Desenvolvido com o apoio técnico de ONUDI e CIEMAT.
Com o apoio financeiro de AECID e ADA.*



SIDS DOCK
SMALL ISLAND DEVELOPING STATES
ISLAND ENERGY FOR ISLAND LIFE



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA, INDUSTRIA
Y COMPETITIVIDAD

Ciemat
Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



aecid

Austrian
Development Agency



PCREEE
Pacific Centre for Renewable Energy and Energy Efficiency
SEALL Centre of Excellence to Promote Sustainable Energy Markets, Industries and Innovation



Índice

Objetivos do Módulo	1
1. Introdução	3
1.1. Desenvolvimento sustentável	5
1.2. Características dos Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento	7
Resumo do Capítulo 1	10
2. Resíduos Biodegradáveis	12
2.1. Parâmetros de Caracterização do Resíduo	12
2.2. Resíduos Pecuários	15
2.2.1. Produção	16
2.2.2. Composição	16
2.2.3. Características dos resíduos pecuários	17
2.2.4. A Pecuária em SIDS	17
2.3. Resíduos Agroindustriais	18
2.3.1. Características de resíduos agroindustriais	18
2.3.2. Geração de Resíduos Agroindustriais em SIDS	19
2.4. Os Resíduos Sólidos Urbanos	22
2.4.1. Produção	22
2.4.2. Composição	22
2.4.3. Geração e composição dos resíduos sólidos urbanos nos SIDS	23
2.5. Lodos de ETAR	27
2.5.1. Produção de lodos	27
2.5.2. Características	27
2.5.3. Situação das águas residuais em SIDS	27
2.6. Mescla de resíduos: A Codigestão	29
Resumo do Capítulo 2	30
3. A Digestão Anaeróbica ou Biometanização	32
3.1. Síntese Histórica: Descobrimento do Biogás	33
3.2. Benefícios ambientais e vantagens da Digestão Anaeróbica	34
3.2.1. Benefícios ambientais da Digestão Anaeróbica:	34
3.2.2. Vantagens da digestão anaeróbica:	35
3.3. Biodegradabilidade dos componentes da matéria orgânica	35
3.4. Etapas do Processo Anaeróbico	36
3.4.1. Fase de Hidrólise	37

3.4.2.	Fase Acidogênica	38
3.4.3.	Fase Acetogênica	38
3.4.4.	Fase Metanogênica	38
3.4.5.	Formação de ácido sulfídrico	39
3.5.	Produtos Finais do processo de Digestão Anaeróbica	39
3.5.1.	O Biogás	40
3.5.2.	Os Digestores	43
3.6.	Fatores que influenciam na operação e controle dos processos anaeróbicos	44
3.6.1.	Fase de arranque. Inoculo inicial	44
3.6.2.	pH	45
3.6.3.	Alcalinidade	45
3.6.4.	Ácidos graxos voláteis	46
3.6.5.	Potencial redox	46
3.6.6.	Temperatura	46
3.6.7.	Nutrientes	47
3.6.8.	Toxicidade e inibição	48
3.6.9.	Homogeneização	50
3.6.10.	Tempo de residência hidráulico	50
3.6.11.	Tempo de Retenção de Sólidos (TRS)	51
3.6.12.	Velocidade de carga orgânica (VCO)	52
3.6.13.	Produção e composição do biogás	53
3.7.	A Digestão Anaeróbia nos SIDS	54
	Resumo do Capítulo 3	56
4.	Tecnologias anaeróbicas. Digestores no meio rural de países em desenvolvimento	58
4.1.	Síntese histórica: Evolução da tecnologia	58
4.2.	Tipos de digestores em função da frequência de carga	61
4.2.1.	Digestor Batch ou descontínuo	61
4.2.2.	Digestores de tipo contínuo	61
4.2.3.	Digestores de tipo semicontínuo	62
4.3.	A Digestão Anaeróbica em áreas rurais de países em desenvolvimento	62
4.3.1.	Integração da tecnologia	63
4.3.2.	Vantagens e inconvenientes da aplicação dos biodigestores básicos no meio rural	63
4.4.	Digestores de pequena escala e baixo custo	64
4.4.1.	Digestor anaeróbico de cúpula fixa	66
4.4.2.	Digestor anaeróbico de tambor flutuante	67
4.4.3.	Digestor anaeróbico tubular de polietileno	68
4.5.	Construção e desenho de um digestor tubular de polietileno	69
4.5.1.	Dimensionamento e desenho	69

4.5.2.	Materiais para a construção	70
4.5.3.	Região de trabalho.....	71
4.5.4.	Construção da estrutura para o digestor.....	71
4.5.5.	Instalação do digestor e primeira carga	72
4.5.6.	Construção da Estufa	73
4.5.7.	Construção da Linha de gás	73
4.5.8.	Produção de Biogás	73
4.6.	Fatores que influenciam na operação e controle deste tipo de digestores	74
4.7.	Programas para o desenvolvimento. Experiências de produção de biogás a partir de resíduos orgânicos em Digestores de baixo custo.....	75
4.7.1.	Experiências em SIDS. Tomando o biogás para Samoa (SIDS Action Platform).....	76
	Resumo do Capítulo 4	78
5.	Tecnologias anaeróbicas avançadas.....	80
5.1.	Interação entre substrato, nutrientes e microrganismos.....	80
5.2.	Tecnologia dos digestores anaeróbicos de Biomassa Suspensa.....	81
5.2.1.	Digestor de Mescla Completa ou CSRT	82
5.2.2.	Digestor de Fluxo Pistão	83
5.2.3.	Digestor de Contato.....	83
5.2.4.	Digestor de Leito de lodos ou UASB	84
5.3.	Tecnologia dos digestores anaeróbicos de Biomassa Aderida	86
5.3.1.	Biomassa aderida a superfícies fixas	87
5.3.2.	Biomassa aderida a superfícies móveis	88
5.4.	Tecnologias Mistas	90
5.4.1.	Digestores EGSB	90
5.4.2.	Digestores IC	91
5.5.	Digestores de Duas Fases.....	92
5.6.	Comparação entre as distintas tecnologias	93
5.7.	Evolução dos digestores industriais	94
5.8.	Experiência prática em um SIDS da Região do Caribe: Planta de Digestión Anaerobia de Brugal en República Dominicana	95
5.8.1.	Introdução	96
5.8.2.	Processo.....	96
5.8.3.	Planta de tratamento das vinhaças geradas no Rum Brugal	96
5.8.4.	Características da digestão anaeróbica de Brugal	97
5.8.5.	Características do Biogás obtido na planta.....	98
5.9.	O projeto singular e estratégico PROBIOGÁS	98
5.9.1.	Objetivo	99
5.9.2.	Alcance.....	99

Resumo do Capítulo 5	100
6. Biogás de aterro sanitário de RSU	102
6.1. Tratamento de RSU em SIDS.....	103
6.2. Etapas do processo de formação de biogás em um aterro sanitário	105
6.3. Conveniências da extração do biogás.....	106
6.4. Infraestrutura de extração e aproveitamento do biogás em um aterro sanitário	106
6.4.1. Poços de captação e Linhas de condução.....	107
6.4.2. Tocha	108
6.4.3. Estação de regulação e medida	108
6.4.4. Sistema de coleta do biogás de aterro	109
6.4.5. Limpeza e condicionamento do biogás de aterro	109
6.4.6. Custos de investimento associados	110
6.5. Potencial energético de um aterro sanitário	111
6.5.1. Produção de biogás em um aterro sanitário.	111
6.5.2. Potencial do biogás.....	113
6.6. Projetos MDL em aterros sanitários.	114
6.6.1. Caso prático. Nova planta no aterro sanitário de Bordo Poniente (México).....	114
6.7. Aterro Biorreator Anaeróbico.....	115
6.7.1. Características dos aterros biorreatores anaeróbicos	115
6.7.2. Vantagens potenciais dos aterros biorreatores anaeróbicos	116
6.7.3. Fatores a serem considerados nos aterros biorreatores anaeróbicos	117
6.7.4. Pesquisas da EPA sobre o aterro sanitário biorreator. Caso prático: aterro do Condado de Yolo	117
Resumo do Capítulo 6	120
7. O Biogás.....	122
7.1. Características dos principais constituintes.....	122
7.1.1. Metano	123
7.1.2. Dióxido de carbono.....	123
7.1.3. Compostos minoritários	123
7.2. Equivalências do Biogás com outros combustíveis.....	124
7.3. Utilização do Biogás como fonte de energia	124
7.3.1. Obtenção de calor por combustão direta.....	126
7.3.2. Geração de eletricidade.....	126
7.3.3. Sistemas de cogeração	127
7.3.4. Integração na rede de gás natural	128
7.3.5. Combustível para veículos	128
7.4. Produção de energia a partir do Biogás nos SIDS.....	129
7.5. Tratamento do biogás em função do uso	129

7.5.1.	Redução da umidade	130
7.5.2.	Redução de H ₂ S.....	131
7.5.3.	Redução de CO ₂	131
7.5.4.	Tratamento mediante filtros	131
Resumo do Capítulo 7		132
Glossário		133
Bibliografia.....		138
Páginas Web		163
Índice de Figuras.....		166
Índice de Ilustrações.....		167
Índice de Tabelas		168
Acrônimos.....		170
Símbolos e Abreviaturas.....		175

Bioenergia Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos para Soluções Energéticas

Orientado para os Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS)

Objetivos do Módulo

O módulo tem como propósito formar profissionais no campo do Biogás para que no desenvolvimento de sua profissão contribuam a difundir o conhecimento à sociedade a fim de alcançar, no âmbito energético e ambiental, a excelência no contexto globalizado de uma economia circular, amigável com o meio ambiente.

Seu objetivo geral é fornecer uma perspectiva global do Biogás em um contexto energético e ambiental dentro da estrutura dos Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS) também conhecidos como SIDS por sua sigla em inglês (Small Islands Developing States). No módulo se apresentam os fundamentos teóricos relativos ao processo de biodigestão anaeróbica e revelam-se aspectos técnicos precisos para obter um amplo conhecimento desta energia renovável, da fonte de produção ao seu aproveitamento final, em seus diferentes âmbitos tais como: características dos recursos, tecnologias existentes, composição e produção, aplicações atuais e novos desenvolvimentos. Da mesma forma, informações sobre projetos que foram executados relacionados ao Biogás serão fornecidas. O aluno realizará dois casos práticos nos quais ele poderá aplicar o conhecimento adquirido.

A finalidade do módulo é dotar o aluno dos conhecimentos e capacidades básicas precisas para poder realizar a avaliação e definição de projetos e atividades viáveis e sustentáveis relativas ao Biogás como recurso energético em SIDS.

Os objetivos específicos mais importantes deste módulo são:

- Aproximar e introduzir aos alunos o conhecimento e a importância do Biogás, a fim de estimular a implantação desta energia renovável em SIDS.
- Revela aos alunos os diferentes tipos e características de resíduos biodegradáveis existentes (resíduos agroindustriais, resíduos pecuários, fração orgânica dos resíduos urbanos, lodos de ETAR), como recurso para a produção de biogás, bem como sua importância atual como fonte energética, a fim de que possam avaliar, com base nas suas características e geração, o potencial do biogás em seus respectivos SIDS. Será feita uma especial menção aos resíduos agropecuários e à produção e utilização do biogás no âmbito rural, tendo como marco de aplicação os SIDS.
- Revelar aos alunos os benefícios ambientais e energéticos que podem ser obtidos com uma adequada gestão dos resíduos biodegradáveis.
- Estudar os fundamentos do processo de biometanização, a microbiologia, os fatores que influenciam na operação e controle do processo e os produtos finais.

- Informar dos diversos tipos de digestores anaeróbicos existentes, bem como a seleção do mais adequado em função das características do resíduo biodegradável a tratar.
- Revelar os digestores anaeróbicos mais adequados para o meio rural em países em vias de desenvolvimento. Os alunos realizarão um caso prático que terá como objetivo determinar o desenho de um digestor para o tratamento de resíduos pecuários no meio rural, o biogás que pode ser obtido e suas possíveis aplicações.
- Estudar o processo de geração de biogás nos aterros, a infraestrutura de extração e aproveitamento necessária e os benefícios de sua extração. Os alunos aplicarão o modelo de produção de biogás de aterro LandGEM versão 3.02 da EPA a um aterro sanitário cujos dados serão fornecidos.
- Revelar o conceito de aterro biorreator e expor as investigações que estão sendo realizadas, principalmente nos Estados Unidos, a fim de considerá-lo como possível futura aplicação em SIDS.
- Estudar a composição e as características do biogás, revelando suas diversas aplicações atuais e os novos desenvolvimentos que estão sendo realizados. Analisar os possíveis usos aplicáveis em SIDS.
- Informar experiências bem sucedidas realizadas em países da América Latina e do Caribe sobre a produção e uso do Biogás através de casos práticos de plantas atualmente em funcionamento. Do mesmo modo, informar do projeto singular e estratégico PROBIOGAS que foi feito na Espanha com objeto de promover o biogás agroindustrial.

Em definitivo, este módulo está preparado para proporcionar ao aluno uma perspectiva global do biogás, em um contexto energético e ambiental, orientada aos Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento, também conhecidos como SIDS por sua sigla em inglês (Small Island Developing States).

1. Introdução

Existe um maior reconhecimento, tanto nos países industrializados como em desenvolvimento, da necessidade da eficiência técnica e econômica na exploração dos recursos. Os sistemas para a recuperação e utilização dos resíduos estão adquirindo um lugar destacado na comunidade mundial. Atualmente, emerge uma nova consciência ambiental, que chama a atenção dos responsáveis políticos e do público em geral.

Os problemas decorrentes da expansão dos desertos, da perda de florestas, da erosão dos solos, do crescimento das populações humanas e da criação industrializada de animais, da destruição dos equilíbrios ecológicos e da acumulação de resíduos resultaram na aplicação de novas políticas necessárias para enfrentar estes novos desafios. No mundo cada dia mais complexo e economicamente interdependente, os interesses econômicos e de segurança dos países em desenvolvimento devem ser entendidos em um contexto global mais amplo.

Estes relativamente novos problemas do mundo derivam da pobreza e do crescimento excessivo da população, nos países em desenvolvimento, ou do uso descuidado e excessivo dos recursos naturais nos países desenvolvidos, com mais impacto acumulado nos países pobres do que nos ricos. Cada vez existe uma consciência maior de que as preocupações ambientais são essenciais para a continuação do desenvolvimento econômico a longo prazo. São necessários objetivos globais para conseguir benefícios econômicos e ambientais através de projetos sustentáveis para a recuperação e utilização de recursos e programas para os países em desenvolvimento. O uso da digestão anaeróbica em um sistema de recuperação integrada dos recursos nestes países é importante para resolver tanto problemas ecológicos, como econômicos.

Os Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS) estão entre os sistemas humanos e naturais mais vulneráveis devido a seu pequeno tamanho, isolamento geográfico, rápido crescimento populacional, capacidade restrita e recursos naturais limitados, bem como a exposição a desastres. desastres naturais (ciclones, furacões, terremotos e erupções vulcânicas) e a variabilidade do clima e mudanças climáticas. As suas dificuldades econômicas estão freqüentemente relacionadas com a pequena dimensão dos mercados nacionais e a sua forte dependência dos poucos mercados remotos, os elevados custos de energia, infra-estruturas, transportes e sistemas de comunicações, as grandes distâncias que os separam de mercados de exportação e recursos de importação e a grande instabilidade do crescimento econômico.

Por mais de uma década, o Fundo para o Meio Ambiente Mundial (GEF) tem colaborado com SIDS e suas redes na tarefa de abordar os problemas do meio ambiente global através de projectos orientados para a ação, que também promover oportunidades de subsistência sustentáveis para os moradores das ilhas. Restauração e proteção do ambiente marinho e costeiro, a revitalização de bacias hidrográficas, preservação da biodiversidade, a proteção da terra contra a degradação e adaptação de todos os setores para variações no regime de clima são importantes alvos projetos (GEF, 2005).

Recentemente, o projeto de plano de trabalho e orçamento para o subprograma de avaliação e gestão da poluição ambiental para 2017-2018, divulgado pela ONU (ONU, 2017), indica que os desafios enfrentados pelos SIDS no Caribe, devido às suas pequenas massas de terra, economias vulneráveis, grande dependência de recursos energéticos externos e populações crescentes, implica que devem ser feitos concentrados esforços para transformar o conceito de desenvolvimento sustentável em uma prática realista. É amplamente aceito que o SIDS será mais diretamente afetado pela mudança climática do que outras regiões em termos do escopo e intensidade do impacto. Portanto, os governos devem continuar a acelerar o processo a fim de salvaguardar a base de

recursos naturais, de modo que as comunidades e os ecossistemas possam ser mais resilientes aos impactos da mudança climática.

Apesar dos progressos alcançados em várias frentes, ainda existem muitas barreiras no que diz respeito à gestão da água, da terra e dos recursos, bem como à implementação de acordos ambientais multilaterais relevantes. Da mesma forma, diz-se que os SIDS têm necessidades e problemas específicos em relação ao desenvolvimento sustentável e ao meio ambiente. Os objetivos aprovados através da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável, RIO + 20, (vinte anos após a histórica Cúpula da Terra no Rio em 1992), em relação ao documento sobre os resultados da SAMOA Pathway e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, que são mais relevantes para este projeto, eles incluem:

- a. A necessidade de acelerar a implementação do Programa de Ação de Barbados e a Trajetória da SAMOA;
- b. A necessidade de fornecer apoio ao desenvolvimento e implementação de programas de água doce e trabalhar na biodiversidade marinha e costeira;
- c. A implementação do PAM (Programa Mundial de Ação para a Proteção do Ambiente Marinho de Atividades Terrestres) em SIDS para prevenir, reduzir e controlar o desperdício e a
- d. A necessidade de fornecer apoio para a criação de capacidades para reduzir e gerenciar os resíduos e a poluição, bem como manter e gerenciar sistemas para fornecer serviços de água e saneamento;
- e. A necessidade de abordar os objetivos da Gestão Integrada dos Recursos Hídricos;
- f. A necessidade de desenvolver e implementar abordagens de gestão baseadas em ecossistemas, incluindo planos integrados de gestão de terras e uso da água, e fortalecer a capacidade dos governos, autoridades locais e comunidades para monitorar e gerenciar a quantidade e a qualidade dos recursos. terrestre e hídrico;
- g. A necessidade de promover programas para melhorar de maneira sustentável a produtividade da terra e a eficiência dos recursos hídricos na agricultura, silvicultura, zonas úmidas, pesca artesanal e aquíicultura, especialmente através de abordagens baseadas em comunidades locais e indígenas;
- h. A necessidade de fornecer apoio direto aos países para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) em água e saneamento, mudanças climáticas, oceanos e recursos terrestres, enquanto contribui para outros ODS, incluindo redução da pobreza e melhoria qualidade de vida.

Neste contexto, o uso da digestão anaeróbica em um sistema de recuperação integrada de recursos nesses países é importante para resolver problemas ambientais e econômicos.

O tratamento anaeróbico é o uso de processos biológicos para degradar a matéria orgânica na ausência de oxigênio e transforma-la em biogás, constituído principalmente por metano (50-70%) e dióxido de carbono (30-40%), e um digestão mais estável com alta concentração de matéria orgânica e nutrientes. O metano, gás combustível, dá ao biogás um valor energético facilmente explorável.

Já no século XXVII o processo anaeróbico de degradação da matéria orgânica era conhecido. Na metade do século XIX, evidenciou-se que as bactérias anaeróbicas estavam envolvidas no processo de degradação. Mas foi no século XX quando a digestão anaeróbica aplicou-se a escala industrial para o tratamento de águas residuais e resíduos orgânicos de modo geral. A partir deste momento a investigação sobre a digestão anaeróbica aumentou de forma constante, tanto em seus aspectos microbiológicos, quanto químicos.

Os aspectos ambientais e a necessidade de energias renováveis fizeram com que o Biogás seja de grande interesse, tanto em países desenvolvidos, quanto em desenvolvimento, expandindo a pesquisa e a aplicação nestas direções. Esta tecnologia oferece possibilidades e soluções interessantes para problemas mundiais e industriais com segurança e controle da contaminação ambiental. Outros benefícios da digestão anaeróbica são a redução dos odores, a redução ou

eliminação das bactérias patogênicas (dependendo da temperatura de tratamento) e o uso de um lodo ambientalmente aceitável.

Ao longo dos diferentes capítulos do módulo, conheceremos a fundo os diferentes aspectos relacionados com os fundamentos teóricos e os aspectos técnicos precisos para obter um amplo conhecimento desta energia renovável. Além disso, serão apresentados exemplos práticos de projetos que foram realizados nesta área.

1.1. Desenvolvimento sustentável

Provavelmente o problema mais grave de conservação com o que se enfrentam os países em desenvolvimento é o atraso do desenvolvimento rural. Na luta por alimentos e combustível foram cortadas grandes áreas de vegetação, árvores e arbustos. A consequência é a alteração dos processos ecológicos nestes países e a destruição permanente dos recursos normalmente renováveis. Há uma necessidade urgente do desenvolvimento rural, que combina medidas de curto prazo para a sobrevivência das medidas a longo prazo, a fim de proteger a base dos recursos e melhorar a qualidade de vida, ao mesmo tempo em que garante o futuro. Muitas comunidades rurais não tem uma flexibilidade econômica que permita postergar o consumo de recursos que precisam de restauração. Assim, necessitam-se medidas de conservação para manter o nível de vida destas comunidades ou melhorá-lo, considerando seu próprio conhecimento do ecossistema, e a busca de formas eficazes de garantir que esses recursos sejam utilizados de forma sustentável.

Em função da estratégia mundial em direção ao desenvolvimento sustentável, que reconhece a necessidade de uma ação internacional para colocá-la em prática, e para estimular e apoiar a ação nacional, é necessário um enfoque integrado para muitos dos problemas propostos. A cooperação entre as nações e as organizações pode facilitar a conservação dos escassos recursos disponíveis e, desse modo, melhorar as perspectivas para a conservação e o desenvolvimento sustentável.

Uma ação internacional conjunta pode auxiliar muito a restauração do meio ambiente, a luta contra a pobreza induzida pelo próprio ambiente e a que os países possam fazer melhor uso de seus recursos. O primeiro objeto é manter processos ecológicos essenciais, como a regeneração e proteção do solo, a reciclagem de nutrientes e a purificação da água, dos quais depende a sobrevivência humana. Parte deste objetivo pode ser atingido através de um uso racional da matéria orgânica nos países em desenvolvimento, para ajudar as comunidades rurais a conservar seus recursos básicos de vida.

Um destes procedimentos é a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos. Esses materiais são biodegradáveis e podem produzir um grande benefício sustentável, por exemplo, em uma fazenda. A fim de conquistar a estratégia neste campo particular, é necessário aumentar o número de pessoas capacitadas, conscientizar, e uma gestão orientada à pesquisa com a informação básica necessária. A conservação e o desenvolvimento sustentável, nas comunidades rurais, cujo único combustível é a madeira, o esterco e os resíduos de plantações, são básicos. A produção de biogás combina as necessidades econômicas a curto prazo destas comunidades com a conservação e o fim da degradação ecológica.

O biogás, como fonte de energia renovável, despertou um grande interesse nos últimos anos, sendo talvez uma das tecnologias de mais fácil implementação, sobretudo nos setores rurais. Seu potencial desenvolvimento, não apenas considerando a produção de biogás, mas também a obtenção de biofertilizante e tratamento de problemas sanitários em alguns casos, tornam muito atrativa sua aplicação e difusão nos setores com abundância de resíduos com alta concentração de matéria orgânica. Portanto, no processo, além de produzir energia na forma de biogás, um importante benefício ambiental é produzido pela redução da carga orgânica de um resíduo e pela produção de um digerido com propriedades fertilizantes por ter um alto conteúdo de nutrientes.

A FAO destacou o biogás como fonte de energia para a agricultura em países desenvolvidos e em desenvolvimento. Asseverou que o uso de fontes de energia não convencionais, como o biogás, contribui para atender três necessidades básicas: melhorar as condições sanitárias através do controle de resíduos orgânicos, gerar energia renovável e fornecer biofertilizante para as culturas. É, portanto, uma fonte de energia renovável que pode contribuir significativamente para a produção, controle e conversão de resíduos animais e vegetais em diferentes formas de energia, já que o biogás pode ser usado entre outros usos para a geração de eletricidade, aquecimento e cozinhar, impulsionar atividades agrícolas dos pequenos produtores e reduzir a emissão de gases de efeito estufa (FAO, 2012).

Por outro lado, a geração e eliminação de resíduos urbanos está se tornando uma questão primordial devido ao crescimento das cidades e ao aumento demográfico. De acordo com as previsões, 99% desse crescimento da populacional e 50% do crescimento urbano ocorrerá nos países em desenvolvimento (Chu e Majumdar (2012); Curry e Pillay (2012)). Se a fração orgânica do resíduo urbano pudesse ser usada para a produção de biogás e, assim, reduzir a demanda por aterros, seria possível produzir energia renovável e sustentável, e um subproduto que potencialmente poderia ser usado como fertilizante (ONU, 2015). Em um estudo realizado por Curry e Pillay publicado na revista *Renewable Energy*, verificou-se que o número de plantas de produção de biogás estava aumentando entre 20% e 30% a cada ano, o que mostra que a digestão anaeróbica está se tornando um importante fonte de energia sustentável (Curry e Pillay, 2012). Por sua vez, a ONU indicou que, nos últimos anos, a energia e os biocombustíveis têm prioridade devido à volatilidade dos preços do petróleo e à necessidade de os países adquirirem maior independência energética (FAO, 2012).

Da mesma forma, os especialistas também destacaram o potencial de resíduos gerado nas cadeias de produção de alimentos. Os agricultores podem tratar os resíduos de sua produção resolvendo um problema ambiental e gerando, ao mesmo tempo, energia para seu próprio consumo ou para vender o excedente a empresas especializadas. Assim reduz-se os custos da produção e a energia é convertida em um novo produto na economia rural. Contudo, esse potencial para converter resíduos agropecuários em biogás somente se materializará se os governos fomentarem as energias limpas e apoiarem sua pesquisa e difusão.

No entanto, as coisas estão mudando, há um interesse crescente em energias renováveis e especificamente no biogás na maioria dos países e especificamente nos Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS). Um exemplo é a criação da Primeira Fase Operacional do Centro Caribenho de Energias Renováveis e Eficiência Energética - CCREEE.

Atualmente, o Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas lista 57 pequenos estados insulares em desenvolvimento. Estes estão divididos em três regiões geográficas: Caribe, Pacífico e AIMS (África, Oceano Índico, Mediterrâneo e Mar do Sul da China). Cada uma destas regiões tem organismos regionais aos quais os respectivos SIDS podem pertencer para efeitos de cooperação regional. Estas são a Comunidade do Caribe (CARICOM), o Fórum das Ilhas do Pacífico (PIF) e a Comissão do Oceano Índico (IOC).

O biogás pode ser uma excelente oportunidade para a sustentabilidade, tanto da indústria agropecuária quanto, e especialmente, de pequenos agricultores em SIDS. Com tecnologias apropriadas e uma boa capacitação podem ser tratados resíduos orgânicos, resolvendo um problema ambiental e ao mesmo tempo produzir energia, elétrica e/ou térmica, e um fertilizante natural. A digestão anaeróbica é amplamente utilizada como fonte de energia renovável. Atualmente, existem milhões de biodigestores na Índia e na China. Na Alemanha, existem mais de 9.000 funcionando, gerando mais de 10.000 milhões de metros cúbicos, que são totalmente utilizados na íntegra; no México existem 721 e o Chile, por exemplo, gera 132 milhões de m³/ano de biogás, dos quais apenas 15% é usado energeticamente, de acordo com o Centro de Energia Renovável da CORFO (Hurtado M.E., 2012).

1.2. Características dos Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento

Atualmente, o Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas lista 57 Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS). Estes estão divididos em três regiões geográficas: Caribe, Pacífico e AIMS, que engloba a África, o Oceano Índico, o Mediterrâneo e o Mar do Sul da China. A **Tabela 1** mostra a distribuição de SIDS nessas regiões geográficas. Cada um deles tem órgãos regionais aos quais os respectivos SIDS podem pertencer aos efeitos da cooperação regional. Estas são a Comunidade do Caribe (CARICOM), o Fórum das Ilhas do Pacífico (PIF) e a Comissão do Oceano Índico (IOC).

Tabela 1: SIDS que compõem as regiões do Caribe, Pacífico e AIMS

Caribe	Pacífico	África, Oceano Índico, Mediterrâneo y Mar de China (AIMS)
 Anguilla ^{3, 4, 7}	 Samoa Americana ^{2, 6, 7}	 Baréin ^{3, 6}
 Antigua y Barbuda	 Islas Cook ⁷	 Cabo Verde ⁶
 Aruba ^{3, 5, 7}	 Micronesia	 Comoras ¹
 Bahamas	 Fiji	 Guinéa-Bissau ^{1, 6}
 Barbados	 Polinesia Francesa ^{3, 4, 7}	 Maldivas ⁵
 Belize	 Guam ^{2, 6, 7}	 Maurício
 Islas Vírgenes Británicas ^{3, 4, 7}	 Kiribati ¹	 Santo Tomé y Príncipe ^{1, 6}
 Cuba ⁶	 Islas Marshall	 Seychelles
 Dominica	 Nauru	 Singapur ⁶
 República Dominicana ⁵	 Nueva Caledonia ^{3, 4, 7}	
 Granada	 Niue ⁷	
 Guyana	 Islas Marianas del Norte ^{3, 6, 7}	
 Haiti ¹	 Palaos	
 Jamaica	 Papúa Nueva Guinea	
 Montserrat ^{3, 7}	 Samoa ¹	
 Antillas Neerlandesas ^{2, 5, 7}	 Islas Salomón ¹	
 Puerto Rico ^{3, 5, 7}	 Timor Oriental ^{1, 3, 5}	
 San Cristóbal y Nieves	 Tonga	
 Santa Lucía	 Tuvalu ¹	
 San Vicente y las Granadinas	 Vanuatu ¹	
 Surinam		
 Trinidad y Tobago		
 Islas Vírgenes de los Estados Unidos ^{2, 6, 7}		

1. También listado como país en desarrollo
2. Observador de la Alianza de Pequeños Estados Insulares
3. No es miembro ni observador de la Alianza de Pequeños Estados Insulares
4. Miembro asociado de algún organismo regional
5. Observador de algún organismo regional
6. No es miembro ni observador de organismo regional
7. No es miembro de las Naciones Unidas

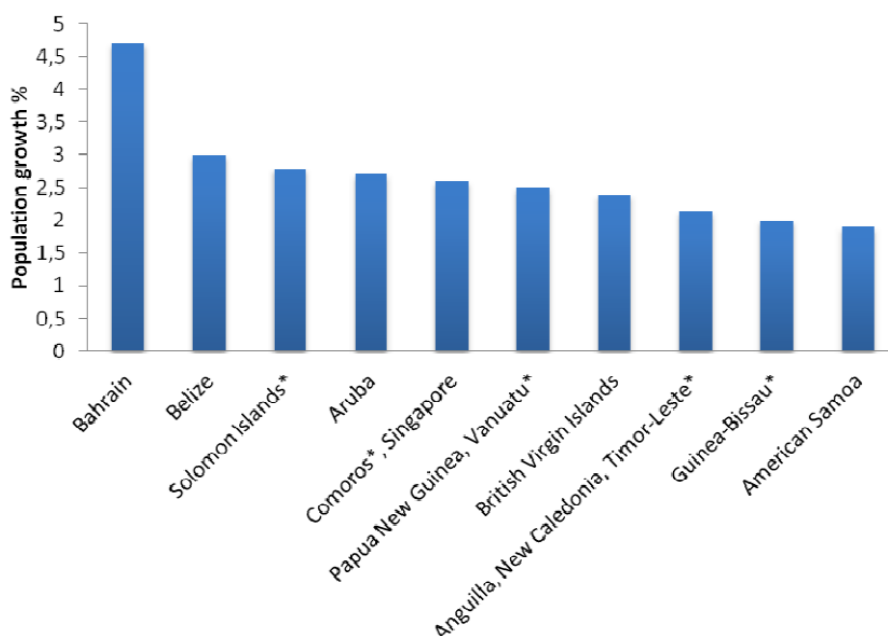
Fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Small_Island_Developing_States, Fevereiro , 2019.

A estes 52 SIDS foram adicionados outros 5 da Comunidade Caribenha que não são membros das Nações Unidas: Bermuda, Martinica, Ilhas Turks e Caicos, Ilhas Cayman e Guadalupe (ONU, 2015).

Com relação ao tamanho de sua população, os SIDS são países bastante pequenos. Cuba é a ilha mais populosa, com 11,3 milhões de habitantes, e Niue, a menos povoada, com 1.500 habitantes. SIDS tem uma população de cerca de 65 milhões, o que representa pouco menos de 1% da população mundial.

A taxa média de crescimento anual da população é de 1,3%. A maioria dos SIDS experimenta menos de 1 ou 2% de crescimento da população por ano. No entanto, existem diferenças significativas entre

alguns países e outros. Por exemplo, enquanto o Bahrain tem uma taxa de crescimento de quase 5% ao ano, Niue experimenta um crescimento negativo (-2,3% ao ano) devido ao alto nível de emigração para a Nova Zelândia. A **Figura 1** mostra o SIDS com o maior crescimento populacional anual.

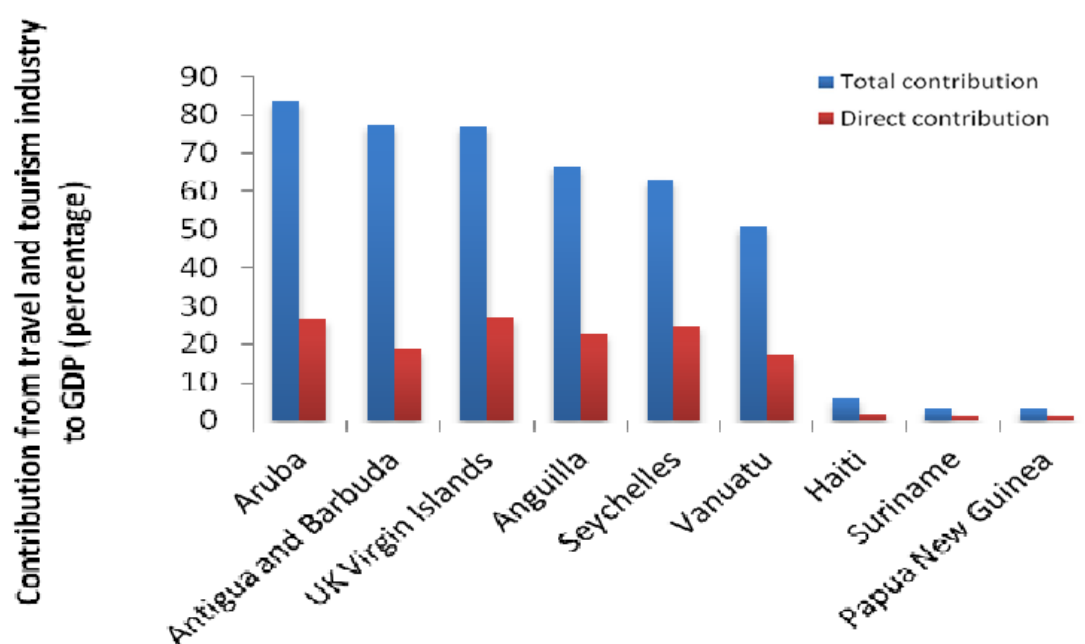


Fonte: SIDS, 2013.

Figura 1: SIDS com o maior crescimento populacional anual (1990-2010)

As taxas de crescimento da população urbana variam significativamente em SIDS. Como no caso do crescimento populacional em geral, o Bahrein domina o crescimento da população urbana com um crescimento médio anual de quase 5%.

A indústria do turismo, de acordo com as estatísticas da SIDS, contribuiu enormemente para o desenvolvimento de muitos SIDS. A contribuição da indústria de viagens e turismo para o PIB e o emprego é indicativa da importância desta indústria. Por exemplo, em 2012, a indústria de viagens e turismo de Aruba fez uma contribuição total de 26,5% para o PIB e, se a contribuição total (direta e induzida) for levada em consideração, a contribuição será de 83,8%. Da mesma forma, Antígua e Barbuda, as Ilhas Virgens do Reino Unido, Anguilla, Seychelles e Vanuatu (**Figura 2**) dependem em grande parte da indústria de viagens e turismo (a contribuição total é superior a 50%). Em relação ao emprego, em 2012, as Ilhas Virgens do Reino Unido encabeçaram a lista com uma contribuição direta para o emprego de 32,8% e uma contribuição total (direta e induzida) de 89,3%. Pelo contrário, a indústria de viagens e turismo no Haiti, Suriname e Papua Nova Guiné faz contribuições relativamente pequenas ao PIB e ao emprego.



Fonte: SIDS, 2013; FAO, 2013.

Figura 2: Viagens e turismo em SIDS: contribuição total e direta ao PIB.

Outras indústrias importantes são a pesca e a mineração. Dependendo da ilha, as indústrias podem ser mais ou menos relevantes. Por exemplo, a indústria pesqueira contribuiu com apenas 0,07% para o PIB de Trinidad e Tobago em 2006, 2007 e 2008, enquanto para Tuvalu a contribuição foi de 7,2 por cento em 2011 e para os Estados Federados da Micronésia (EFM) foi de 10,1% em 2010. Em termos de mineração, a indústria de mineração em Trinidad e Tobago contribuiu com 45,8% do PIB da ilha em 2008; no entanto, muitas outras ilhas têm indústrias de mineração menos significativas, com contribuições abaixo de 1% (por exemplo, Barbados, Belize, Dominica, de acordo com dados de 2007). A ilha de Nauru costumava ser altamente dependente da mineração; no entanto, explorou praticamente todas as suas reservas de fosfato.

Não há dados sobre a população que vive na pobreza em 40 dos 57 SIDS. Dos 17 em que os dados estão disponíveis, diferenças significativas são observadas entre eles. Por exemplo, na Jamaica, Maldivas e Seychelles menos de 2% da população tem que viver com menos de 1,25 \$ US por dia. Em contraste com o Haiti, onde quase 55% das pessoas vivem com menos de 1,25 \$ US por dia. Em geral, a maioria da população que vive em situação de pobreza pode ser encontrada em países de baixa renda e de renda média que chegam a ao nível mais baixo.

Como mencionado, os SIDS são um grupo de países em desenvolvimento que enfrentam desafios únicos neste processo como resultado de fatores como seu relativo isolamento ou afastamento, o tamanho pequeno de seu mercado, sua base limitada de recursos e exportação, sua suscetibilidade a choques econômicos externos, sua vulnerabilidade a ameaças ambientais e os efeitos das mudanças climáticas, e sua exposição a desastres naturais frequentes e intensos.

Os SIDS são um grupo muito heterogêneo que, juntamente com a falta de orçamento para a execução dos Sistemas Estatísticos Nacionais (SEN), torna extremamente difícil a obtenção de dados.

Os SEN dos SIDS variam consideravelmente em termos de tamanho e níveis orçamentais, e o perfil do Instituto Nacional de Estatística (INE) difere de uma ilha para outra. Os menores em termos numéricos estão nesses Estados. Eles enfrentam restrições específicas ligadas à sua vulnerabilidade e

isso é freqüentemente refletido em seus INEs. Não é de surpreender que os mais vulneráveis sejam encontrados em países mais pequenos e com menos recursos financeiros.

Por exemplo, adquirir recursos suficientes para realizar um censo agropecuário é um grande desafio para muitos países. Para SIDS, o desafio de recursos é frequentemente financeiro, institucional e humano. Com a importância do declínio do setor agrícola em muitos SIDS, a agricultura que já não goza da mesma alta prioridade que costumava ter e a obtenção dos fundos necessários para realizar um censo agropecuário estão se tornando cada vez mais difíceis.

O financiamento externo também é uma opção para alguns SIDS, mas há uma demanda crescente por esses fundos em todo o espectro da atividade governamental e da agricultura, e as estatísticas nem sempre têm alta prioridade. Muitos censos agrícolas são realizados, portanto, com um nível de financiamento inferior ao ideal. Isso pode ter um impacto na metodologia do censo agropecuário que deve ser ajustada para acomodar o nível de financiamento disponível, o que muitas vezes resulta em uma redução no escopo e cobertura dos dados coletados e, se a amostragem for usada, em uma redução da área geográfica disponível e o intervalo de seções.

A metodologia do Censo, a coordenação de campo, o processamento de dados, a análise e a disseminação são difíceis de encontrar na maioria dos SIDS. Dada a natureza relativamente pouco frequente do censo (a cada dez anos), pode-se argumentar que as SIDS não pode se dar ao luxo de criar e manter uma capacidade em todas essas áreas de habilidades. Daí a dificuldade em encontrar informações sobre resíduos biodegradáveis, matéria-prima para a produção de biogás.

Da mesma forma, a heterogeneidade dos SIDS também é evidente no que diz respeito ao uso da energia per capita. Trinidad e Tobago tem, com mais de 15 toneladas de óleo equivalente, a taxa mais alta de todos os SIDS e, ao mesmo tempo, uma das taxas mais altas do mundo. Pelo contrário, o consumo de energia per capita em Timor-Leste, que é um dos SIDS menos desenvolvidos, é de apenas 58 kg de óleo equivalente. O consumo médio de energia per capita nos SIDS é de 1.520 kg, mas apenas 7 países excedem esse valor, a maioria não chega perto deste valor. Além disso, ainda é significativamente inferior à média dos países de renda média e alta, que é de 1.848 kg e 4.944 kg, respectivamente.

Resumo do Capítulo 1

Os aspectos ambientais e a necessidade de energias renováveis motivaram o desenvolvimento do Biogás tanto em países em desenvolvimento, quanto em desenvolvimento, expandindo a pesquisa e a aplicação nestas direções. Esta tecnologia oferece possibilidades e soluções de interesse para problemas mundiais como a produção de energias alternativas, a gestão dos resíduos humanos, animais, municipais e industriais com segurança e o controle da contaminação ambiental.

A FAO destacou o biogás como fonte de energia para a agricultura em países desenvolvidos e em desenvolvimento. Ele afirmou que o uso de fontes de energia não convencionais, como o biogás, contribui para atender três necessidades básicas: melhorar as condições sanitárias através do controle de resíduos orgânicos, gerar energia renovável e fornecer biofertilizante para as culturas. Ele também indicou que a gestão adequada de resíduos de atividades agrícolas pode contribuir significativamente para a produção e conversão de resíduos animais e vegetais em diferentes formas de energia, que podem ser usados para a geração de eletricidade, aquecimento e cozinhar entre outros usos, sendo assim capaz de promover as atividades agrícolas dos pequenos produtores e reduzir a emissão de gases de efeito estufa (FAO, 2012).

Por outro lado, a geração e eliminação de resíduos urbanos está se tornando uma questão importante devido ao crescimento das cidades e ao aumento demográfico. De acordo com as previsões, 99% desse crescimento populacional, assim como 50% do crescimento urbano, ocorrerão

nos países em desenvolvimento (Chu e Majumdar (2012), Curry e Pillay (2012)). Se a fração orgânica do resíduo urbano pudesse ser usada para a produção de biogás e, assim, reduzir a demanda por aterros, seria possível produzir energia, renovável e sustentável, e um subproduto que potencialmente poderia ser usado como fertilizante (ONU, 2015). Em um estudo realizado por Curry e Pillay publicado na revista *Renewable Energy*, descobriu-se que o número de plantas produtoras de biogás estava aumentando entre 20% e 30% a cada ano, o que mostra que a digestão anaeróbica está se tornando uma importante fonte de energia sustentável (Curry e Pillay, 2012). Na sua vez, a ONU indicou que nos últimos anos a energia e os biocombustíveis ocupam um lugar prioritário devido à volatilidade dos preços do petróleo e à necessidade dos países de adquirir maior independência energética (FAO, 2012).

A digestão anaeróbica é uma tecnologia amplamente utilizada como fonte de energia renovável. Na actualidade, existem milhões de digestores em operação. O biogás pode ser uma excelente oportunidade para a sustentabilidade, tanto na indústria agrícola como, especialmente, nos pequenos agricultores dos Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS, Small Island Developing States).

Actualmente, o Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais das Nações Unidas lista 57 SIDS. Estes estão divididos em três regiões geográficas: Caribe, Pacífico e AIMS (África, Oceano Índico, Mediterrâneo e Mar do Sul da China). Cada uma destas regiões tem organismos regionais aos quais os respectivos SIDS podem pertencer para efeitos de cooperação regional. São elas: a Comunidade do Caribe (CARICOM), o Fórum das Ilhas do Pacífico (PIF) e a Comissão do Oceano Índico (IOC).

Os SIDS são um grupo de países em desenvolvimento que enfrentam desafios únicos neste processo, como resultado de fatores como seu relativo isolamento ou afastamento, a pequena dimensão do seu mercado, sua base limitada de recursos e exportações, sua suscetibilidade a choques econômicos externos, sua vulnerabilidade a ameaças ambientais e os efeitos das mudanças climáticas e sua exposição a desastres naturais frequentes e intensos. É um grupo muito heterogêneo que, juntamente com a falta de orçamento para a realização dos Sistemas Nacionais de Estatística (SNE), dificulta grandemente a recolha de dados.

Ao longo dos diferentes capítulos do módulo, serão conhecidos a fundo os diferentes aspectos relacionados com os fundamentos teóricos da digestão anaeróbia e o biogás, bem como os aspectos técnicos precisos para obter um amplo conhecimento desta energia renovável focada nos Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS).

2. Resíduos Biodegradáveis

A biodegradabilidade é a faculdade de alguns produtos ou substâncias de descompor-se em elementos químicos naturais em um período de tempo relativamente curto e por ação de organismos vivos (bactérias, microrganismos, fungos, vermes, insetos, etc.) que as utilizam para produzir energia e criar outras substâncias como aminoácidos, novos tecidos ou novos organismos. A biodegradação pode ocorrer de forma aeróbica, na presença de oxigênio, ou de forma anaeróbica, quando não há oxigênio no meio. Os processos anaeróbicos tem a característica de que, além de tratar os resíduos, produzem um combustível gasoso, conhecido como biogás por sua origem biológica, que pode ser facilmente aproveitável.

Os resíduos biodegradáveis englobam subprodutos e resíduos orgânicos, que podem ser apresentados em fase sólida e líquida, suscetíveis de ser submetidos a processos biológicos de tratamento via biometanização. Consideram-se resíduos biodegradáveis potenciais, isso é, aqueles suscetíveis de ser tratados por digestão anaeróbica para a geração de energia (biogás), principalmente os seguintes: resíduos de explorações pecuárias (esterco e purinas), resíduos de agroindústrias, como os que gerados em usinas de álcool e açúcar, na indústria do café, fábricas de queijo, matadouros, conservas, etc., a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e os lodos anaeróbicos das estações de tratamento de águas residuais (ETAR's).

2.1. Parâmetros de Caracterização do Resíduo

Quando se aborda um projeto de tratamento de resíduos, é necessária uma fase inicial de caracterização dos mesmos, que deve iniciar-se com uma campanha de análises e coleta de toda informação sobre os fatores que afetam as características do resíduo. Um resíduo é definido através de um conjunto de parâmetros físico-químicos que o caracterizam e determinam o tipo de processo de deve ser seguido para seu tratamento. Os parâmetros mais importantes de caracterização dos resíduos biodegradáveis são os seguintes:

Vazão: A correta determinação do vazão de derramamento de uma exploração ou indústria é crítica para a definição do projeto. Geralmente se expressa em m³/dia para os resíduos líquidos e em t/dia para os resíduos sólidos.

Conteúdo de umidade (H): É a medida da quantidade de água que possui a amostra do resíduo no momento de ser extraída. Para determinar este parâmetro pesa-se a amostra logo após sua extração (m_1), que é mantida durante 24 horas em um forno a uma temperatura de 105°C para ser pesada novamente (m_2). A porcentagem de umidade é calculada substituindo os valores na seguinte fórmula:

$$\text{Porcentagem de Umidade} = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \times 100$$

Onde: m_1 = massa da amostra recém extraída.

m_2 = massa da amostra depois de passar pelo forno

A porcentagem de umidade é determinada também para saber qual é o conteúdo em sólidos totais (ST) de um resíduo, já que: Porcentagem de umidade = 100-ST.

Concentração de sólidos: A natureza e conteúdo dos sólidos definem fisicamente um resíduo e influenciam muito a escolha do processo de tratamento e dos equipamentos a serem utilizados. Existem diferentes tipos de sólidos em função de suas características, de modo que temos:

Sólidos Totais (ST): É um parâmetro muito utilizado e de grande influência na escolha do tratamento e dos equipamentos a serem utilizados. Como já foi dito, os sólidos totais são determinados por dissecação da amostra a 105°C, até obter um peso constante. Através de filtração separam-se os sólidos suspensos determinados finalmente a 105°C e, por diferenciação com os sólidos totais, encontram-se os dissolvidos. São calculados substituindo os valores na seguinte fórmula:

$$\text{sólidos totais (\%)} = \frac{\text{peso}_{105^{\circ}} - \text{tara}}{\text{peso amostra}} * 100$$

Na **Figura 3** são apresentados os distintos tipos de sólidos que um resíduo pode conter. Os sólidos totais se dividem em sólidos suspensos e filtráveis. O primeiro grupo está constituído por sólidos sedimentáveis e não sedimentáveis e, o segundo, por sólidos coloidais e dissolvidos. No entanto, na prática costuma-se simplificar esta divisão considerando os sólidos totais divididos entre sólidos suspensos e sólidos dissolvidos. Normalmente, determinam-se apenas os sólidos suspensos e, por diferenciação, os dissolvidos.

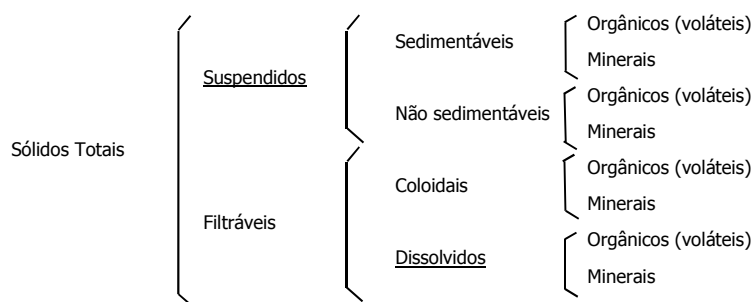


Figura 3: Tipos de sólidos

- ❁ **Sólidos em Suspensão (SS):** Não existe mescla íntima sólidos-água, conservando ambos suas próprias características. São facilmente separáveis por decantação. Cabe destacar que o conteúdo em sólidos suspensos, seu tamanho, dureza e composição química, afetam a biodegradabilidade, abrasividade e fluência do resíduo.
- ❁ **Sólidos Dissolvidos (SD):** Encontram-se misturados intimamente com a água, sendo que as propriedades da mescla são únicas e as dos componentes individualmente são distintas. Não podem ser separados por decantação.
- ❁ **Sólidos Voláteis (SV):** são aqueles que se volatilizam durante a calcinação à 550±50°C e são determinados por diferencia de peso com os sólidos minerais, segundo os métodos 2540E (amostras aquosas) ou 2540G (amostras sólidas e semissólidas) do Standard Methods (American Public Health Association, 1992). Calculam-se substituindo os valores na seguinte fórmula:

$$\text{Sólidos voláteis (\%)} = \frac{\text{Peso}_{105^{\circ}} - \text{Peso}_{550^{\circ}}}{\text{peso amostra}} * 100$$

- ❁ **Sólidos Suspensos Voláteis (SSV):** são também um parâmetro interessante porque se assimila à concentração de microrganismos presentes em digestores de fase dispersa (Metcalf e Eddy, 1995). A determinação é realizada seguindo os métodos 2540D e 2540E do Standard Methods (APHA, 1992 e 1999).

- **Sólidos Minerais (SM)** ou cinzas: são os sólidos que permanecem depois da calcinação da amostra a $550 \pm 50^\circ\text{C}$, até peso constante, e são determinados por pesagem direta. Isso é, determinam-se segundo a fórmula:

$$\text{Cinzas(\%)} = \text{Sólidos totais(\%)} - \text{Sólidos voláteis(\%)}$$

- A metodologia para determinação dos diferentes tipos de sólidos em águas residuais são recolhidas nas diferentes seções acordo com o Método 2540 do *Standard Methods* (APHA, 1992 e 1999).

Demanda Química de Oxigênio (DQO): É a quantidade de oxigênio necessária para oxidar os compostos redutores suscetíveis de ser oxidados pelo dicromato e o permanganato em meio ácido. A biomassa residual, a DQO (COD, siglas em inglês), é uma medida do conteúdo total de matéria orgânica, sem distinguir entre a matéria assimilável pelos microrganismos e a não assimilável. O procedimento que geralmente se utiliza para sua determinação é a oxidação com dicromato potássico em meio ácido e posterior avaliação com sulfato ferroso de amônio (sal de Mohr). O teste é realizado de o Método 5220 do *Standard Methods* (APHA, 1992 e 1999).

Demanda Biológica de Oxigênio (DBO₅): É o único parâmetro analítico que quantifica de forma global a contaminação provocada por substâncias biodegradáveis. Determina-se pela quantidade de oxigênio consumido pelos microrganismos para assimilar a matéria orgânica presente no resíduo, expressa-se em mg O₂/l. A DBO₅ (BOD₅, siglas em inglês) informa sobre o conteúdo em materiais assimiláveis bioquimicamente. A determinação da DBO₅ se baseia, portanto, na oxidação bioquímica da matéria orgânica. É a medida do oxigênio dissolvido que é consumido por microrganismos aeróbicos para metabolizar a matéria orgânica carbonada biodegradável presente na amostra. O método normalizado mais utilizado para calcular a DBO₅ é o método das dissoluções, que corresponde ao Método 5210 do *Standard Methods* (APHA, 1992 e 1999). Esta é uma reação lenta devido a que, a 20°C, são necessários 20 dias para completar de 95-99% da reação. A efeitos operativos, uma determinação analítica que dure 20 dias representa um período excessivamente longo, de modo que se adotou o critério geral de realizar a DBO₅, isso é, a medida do oxigênio consumido ao final de 5 dias a 20°C, já que neste tempo completou-se mais de 90% da reação.

A diferença entre DBO₅ e DQO radica no tipo de compostos determinados em cada caso. O valor de DQO sempre é maior, já que engloba todas os compostos oxidáveis, enquanto a DBO corresponde à fração destes compostos, que são assimiláveis pelos microrganismos.

Carbono orgânico total (COT): Denomina-se Carbono orgânico total (TOC, siglas em inglês) a quantidade de carbono contida nos compostos orgânicos. Costuma-se utilizar como indicador não específico da quantidade de água. Tem-se uma ideia do conteúdo de matéria orgânica, mas não de sua biodegradabilidade. São determinados através da mensuração da quantidade de dióxido de carbono liberado depois do tratamento com oxidantes químicos ou combustão, dependendo da metodologia utilizada, seguindo o método 5310 do *Standard Methods* (APHA, 1992 e 1999) adequado.

Nitrogênio: Este elemento forma parte da matéria orgânica como nitrogênio amoniacal e como nitrato. A importância do nitrogênio se deve ao seu caráter de elemento essencial para a nutrição dos microrganismos responsáveis pelos processos biológicos. Normalmente se determina como nitrogênio Kjeldhal, que é a soma do nitrogênio orgânico e o amoniacal. A análise consiste em uma avaliação com ácido do nitrogênio que foi transformado através de um processo de mineralização em amônio. A determinação é realizada de acordo com o Método de 4500 do *Standard Methods* (APHA, 1992 e 1999).

Relação Carbono/Nitrogênio: A relação C/N é um índice da suscetibilidade de um material que será degradado biologicamente. Os microrganismos requerem um substrato que contenha carbono e nitrogênio em uma relação equilibrada para seu desenvolvimento. Se a relação C/N é alta, não

haverá suficiente nitrogênio e as bactérias não poderão produzir as enzimas necessárias para assimilar o carbono, e se a relação C/N é baixa, produz-se um excessivo desenvolvimento de microrganismos. Geralmente, o valor ideal da relação C/N para que um processo biológico possa ser iniciado está compreendido entre 20 e 30, em nenhum caso devesse exceder o valor de 35.

Temperatura: Todos os processos biológicos têm uma gama ideal de temperatura, de modo que é necessário conhecer a temperatura que origina o resíduo e suas variações diárias e anuais, a fim de adequar ao valor ideal.

pH: O pH é imprescindível para caracterizar um resíduo, informa o tipo de compostos que pode conter e de possíveis reações que podem ser realizadas, como precipitação de sais e oxidação de metais. Geralmente, quando o pH fica fora da gama 6,5-8, que é a apropriada para os processos biológicos, será necessário corrigi-lo.

Alcalinidade: Indica a capacidade do resíduo para neutralizar ácidos ou para tamponamento. A alcalinidade se deve à presença de hidróxidos, carbonato e bicarbonato de cálcio, magnésio, sódio, potássio e amônio. Determina-se por avaliação com ácido normalizado expressando os resultados como CaCO_3 de acordo com o Método 2320 do *Standard Methods* (APHA, 1992 e 1999).

Fósforo: Como o nitrogênio, o fósforo é um elemento essencial para o desenvolvimento dos microrganismos. Em alguns casos pontuais é necessário adicionar fósforo a um resíduo para que possa sofrer uma bioconversão. O fósforo é determinado como ortofosfato através da formação de um complexo colorido com molibdato de amônio, de acordo com o Método 4500-PC do *Standard Methods* (APHA, 1992 e 1999).

Enxofre: A determinação do conteúdo em sulfatos é necessária para prever a formação de ácido sulfídrico no gás de digestão. Esta determinação consiste em uma turbidimetria, adicionando sal de bário à amostra, de acordo com o Método 4500 do *Standard Methods* (APHA, 1992 e 1999).

Compostos Inibidores: São todos aqueles que afetam negativamente os processos biológicos, impedindo ou retardando as reações. Sua natureza é muito variada. Podem ser compostos orgânicos que aparecem como consequência do processo gerador do resíduo, como é o caso de detergentes, pesticidas, antibióticos, etc. Também pode existir inibição causada por metais pesados ou por concentrações elevadas de elementos que por si só não são tóxicos, como o sódio ou o nitrogênio, quando se encontram na forma amoniacal.

2.2. Resíduos Pecuários

A pecuária, em seu conceito básico mais simples, pode ser definida como a agrupação de espécies animais que foram domesticadas pelo homem a fim de utilizar melhor seus produtos. Do ponto de vista ambiental, até pouco tempo, não se podia dizer que causasse problemas importantes de contaminação. Os resíduos gerados nas explorações pecuárias são utilizados tradicionalmente como adubo e complemento orgânico nas plantações, devido ao seu conteúdo em elementos minerais e matéria orgânica. Sua equilibrada dispersão, permanente contato com a natureza, o tipo de exploração e o reduzido tamanho dos rebanhos não podiam produzir impactos importantes sobre o meio ambiente, pois o próprio poder depurativo dos sistemas naturais era capaz de eliminar o problema.

Contudo, nos últimos anos, em um espaço de tempo curto, passou-se das explorações tradicionais extensivas às intensivas, devido às exigências do mercado, isso é, ao grande consumo de produtos, o que implica uma massificação de animais e uma seleção genética muito intensa. Este fato fez com que os resíduos gerados fossem também tão numerosos e especificamente localizados, que a capacidade de autodepuração do meio receptor não fosse suficiente para absorver esta produção.

Isto produz a conseguinte repercussão e incidência no meio físico, o que leva ao deterioração destes, impossibilitando sua utilização posterior e gerando um grave problema ecológico.

Estas mudanças não afetaram a penas a produção de resíduos, mas também incidiram na composição, devido ao uso de produtos que induzem o crescimento acelerado, medicamentos e de metais pesados como o cobre e o zinco, cuja presença nos resíduos pode gerar danos e prejuízos irreversíveis quando utilizados e aplicados com fins agrícolas. Estas circunstancias fazem com que os resíduos das explorações pecuárias, consideradas antigamente como subprodutos de aplicação agrícola, atualmente constituam um sério problema ambiental, por sua forte carga contaminante e os grandes volumes gerados nos núcleos produtores.

Neste sentido, a digestão anaeróbica oferece a possibilidade de solucionar, em grande medida, o problema ambiental e, ao mesmo tempo, produzir uma energia facilmente utilizável. Ademais, em fazendas de pequeno porte, nas quais o problema ambiental não é tão severo, o biogás gerado a partir dos resíduos pode resolver muitos problemas energéticos e ajudar a melhorar a qualidade de vida de seus usuários, como de fato tem ocorrido há anos em alguns países.

2.2.1. Produção

Não é possível estabelecer de forma geral e teórica a produção de resíduos pecuários, já que esta é muito variável, não apenas como é óbvio entre uma espécie ou outro, mas inclusive dentro da mesma espécie. Os resumos biográficos são abundantes e os dados variam muito, pois a produção de resíduos de origem animal depende de inúmeros fatores como a espécie pecuária, tamanho do animal, estado fisiológico e alimentação, fundamentalmente.

Também é possível encontrar variações nos volumes de resíduos produzidos, conforme o tipo de alojamento e a frequência de lavagens, bem como pela forma de evacuação e de utilização da água como meio de propulsão, cujo volume deve ser considerado. É, portanto, imprescindível, no momento de realizar um estudo do tratamento a ser aplicado a estes resíduos, determinar a produção real dos mesmos, utilizando a bibliografia somente como dado orientativo, devido à importância deste parâmetro no desenho de uma planta de tratamento.

Como dado orientativo, a **Tabela 2** reúne, como valores médios, os resíduos produzidos por distintas espécies animais. Como é possível ver, a quantidade de resíduos produzidos por animal oscila entre 50 kg/d em vacas leiteiras até 0,1 kg/d em aves.

Tabela 2: Resíduos produzidos por distintas espécies animais (excrementos frescos)

Espécie Pecuária	Peso Animais (kg)	Quantidade (kg/d)	Peso vivo (%)
Bovinos de carne	200-500	15-30	5,3-7
Vacas leiteiras	450-600	30-50	6-9
Ovinos	45-50	1,5-5	3-10
Porcos adultos	160-250	5,8-25	2,5-10
Porcos de engorda	45-100	3-9	5-10
Porcos post-desmame	8-40	1,3-4,5	7-17
Frangos de carne	1-2,5	0,10-0,17	6-8
Poedeiras	2-2,5	0,15-0,25	7-12

Fonte: AEE, 2010.

2.2.2. Composição

A composição bioquímica apresentada por estes resíduos permite o desenvolvimento e a atividade microbiana do processo anaeróbico. O processo microbiológico, como veremos mais adiante, requer fontes de carbono e nitrogênio, bem como outra série de nutrientes como fósforo, potássio, cálcio e

enxofre, dentre outros. Normalmente as substâncias orgânicas, como os excrementos pecuários, apresentam estes elementos em proporções adequadas. A **Tabela 3** apresenta a composição química de diversos resíduos de origem animal em base seca. O conteúdo de água destas matérias primas pode oscilar entre 40 e 90% do peso fresco do resíduo.

Tabela 3: Composição química de diversos resíduos de origem animal (valores médios sobre base seca)

Matéria prima	Lipídios (%)	Proteínas (%)	Celulose Hemicelulósica (%)	Lignina (%)	Cinza (%)
Bovino	3,23	9,05	32,49	35,57	19,66
Suíno	11,50	10,95	32,39	21,49	23,67
Aves	2,84	9,56	50,55	19,82	17,23
Equino	2,70	5,00	40,50	35,00	17,80
Ovino	6,30	3,75	32,00	32,00	25,95
Caprino	2,90	4,70	34,00	33,00	26,40

Fonte: Varnero, 2011.

2.2.3. Características dos resíduos pecuários

A **Tabela 4** mostra o conteúdo em sólidos totais e sólidos voláteis (em função dos sólidos totais) para distintas espécies pecuárias.

Tabela 4: Porcentagem de sólidos totais e voláteis para distintas espécies pecuárias

Resíduo	ST (%)	SV (%)
Chorume de porco	3-8 ¹	70-80
Esterco bovino	5-12 ¹	75-85
Estrume	10-30 ¹	70-80

¹ Segundo diluição. Fonte: Steffen et al (1998).

Ademais, a **Tabela 5** mostra algumas características de resíduos pecuários em função da produção.

Tabela 5: Características de resíduos pecuários em função da produção

Animal	ST (kg/d)	SV (kg/d)	DQO (kg/d)	Nitrogênio (kg/d)	Resíduo total(kg/d)	Umidade (%)
Bovino de carne	2,353	1,895	1,961	0,163	29,412	92
Vaca leiteira	8,900	7,500	8,100	0,450	68,000	87
Frangos de carne	0,022	0,016	0,018	0,002	0,088	75
Poedeiras	0,027	0,020	0,022	0,001	0,102	74
Javali grávida	1,200	1,000	1,100	0,085	12,000	90
Javali	0,380	0,340	0,270	0,028	3,800	90

Fonte: ASAE (2003-2005).

2.2.4. A Pecuária em SIDS

Embora existam diferenças entre os SIDS e a falta de dados estatísticos, pode-se dizer que, em nível global, as pecuarias mais abundantes nesses países são a bobina, o porco, a ovelha e a cabra.

Na CARICOM, a produção pecuária é distribuída em condições climáticas e agroecológicas muito variadas. As explorações pecuárias são realizadas sob uma gama de condições técnicas muito

diferentes. Num extremo estão os sistemas de produção de subsistência, caracterizados por baixos indicadores de produção e uso de matérias-primas. No outro, há os sistemas de produção intensiva, com alto uso de matéria-prima, onde a produção é destinada a satisfazer demandas de mercados bem estabelecidos ou em crescimento. A produção pecuária é baseada, principalmente, em pequenas fazendas onde alguns animais são criados, geralmente com propósitos duplos (leite e carne), destinados ao consumo familiar ou para venda em leilões locais. Há também fazendas de gado maiores destinadas à atividade comercial para atender à demanda de produtos pecuários do mercado interno ou de exportação.

FAO tem uma longa história de associação com SIDS, fornecendo aconselhamento, análise e assistência na agricultura, pecuária, pesca, silvicultura, gestão de recursos naturais e segurança alimentar em seu compromisso de apoiar meios de subsistência resilientes e melhorar a segurança alimentar. Como exemplo, a FAO está trabalhando para estabelecer um setor doméstico de produção de ovos comercialmente viável e ambientalmente sustentável nas Maldivas, a fim de aumentar a renda familiar e melhorar a segurança alimentar e nutricional.

Um projeto gerenciado em conjunto pelo Governo de São Vicente e Granadinas e a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) foi realizado para que São Vicente e Granadinas possam iniciar o conceito inovador de escolas de campo para agricultores (FAO, 2013).

O projeto, o primeiro de seu tipo voltado especificamente para criadores de gado do Caribe, foi oficialmente lançado com uma oficina que contou com a participação de agricultores locais, funcionários do Ministério, representantes do CARDI, do IICA e do Oficial de Desenvolvimento da FAO, Dr. Cedric Lazarus.

Isso foi motivado porque, em 2011, São Vicente e Granadinas importaram 8,6 milhões de quilos de carne e produtos derivados da Austrália e Nova Zelândia por um valor aproximado de 47,6 milhões de dólares, segundo dados do Ministério da Agricultura. Essas importações representam mais de 90% do consumo total de carne. O objetivo do projeto foi contribuir para a redução dessa dependência excessiva de carnes importadas, ajudando os produtores de ovinos e caprinos do país, a maioria dos quais dirigem pequenas fazendas familiares, a aumentar a produção, a produtividade e a eficiência.

2.3. Resíduos Agroindustriais

Os resíduos biodegradáveis de origem agroindustrial normalmente se identificam com os resíduos e águas residuais de origem agroalimentar que, para sua depuração, são tratados por processos biológicos. Existem, além disso, outros resíduos industriais, como os procedentes de fabricas de papel, industrias farmacêuticas, dentre outros que, conforme o tipo de processo industrial que os gera, podem ser tratados biologicamente. A seguir serão descritas as características dos resíduos biodegradáveis produzidos em algumas das regiões mais agroindustriais da ALC.

2.3.1. Características de resíduos agroindustriais

Indústria do café: O café maduro apresenta uma composição em que o grão, que é a parte aproveitável para consumo, representa aproximadamente 20% do volume total do fruto. O processo de extração do fruto (beneficiado) gera aproximadamente o restante 80% do volume processado na qualidade de resíduo (Orozco et al., 2005). As características das águas residuais variam muito em função do procedimento seguido, encontrando-se valores de 2.000 (mg L⁻¹) e 15.000 (mg L⁻¹) para a DQO (Guardia, 2012). Estes resíduos agroindustriais apresentam excelentes condições de biodegradabilidade do ponto de vista de relação BOD/COD (superior a 0.5) (Guardia, 2012).

Destilarias: As águas residuais geradas nas destilarias recebem o nome de vinhaças, suas características dependem do tipo de licor a destilar. No melaço da cana-de-açúcar ou beterraba a quantidade de vinhaça gerada oscila entre 10 e 15 litros por litro de álcool, com uma DQO próxima de entre 60.000 y 100.000 mg/l (Wilkie et al., 2000; López et al., 2010; Del Toro, 2001; Pérez y Garrido, 2008).

Cervejarias: Da indústria cervejeira provém águas residuais da lavagem de garrafas, barris e bacias, que são as mais abundantes, e águas procedentes do resfriamento e condensação que aportam altos volumes pouco contaminantes. Valores de referência são: volume de águas residuais/volume de cerveja=3,5-8, DBO/DQO= 0,58-0,66, DBO₅=0,2-0,4 kg/hl volume de cerveja, nitrogênio= 30-100 mg/l, fósforo= 30-100 mg/l (UNEP, 1996).

Açucareiras: Os resíduos das açucareiras de beterraba e cana de açúcar procedem, principalmente, do transporte e lavagem e da condensação de vapores. Função da tecnologia utilizada pode ser reciclada uma porção da água, resultando num enriquecimento desses de matéria orgânica durante a campanha. Valores de 700- 5.000 mg O₂/l de DBO₅ e 800-10.000 mg O₂/l de DQO são alcançados (STankali, 2013; Morales, 2011, Aini, 2007). Os resíduos têm caráter sazonal, já que as fábricas trabalham durante quatro meses por ano.

Indústrias de conservas de Frutas e Legumes: As águas residuais destas indústrias procedem da lavagem das matérias primas e de seu processamento. Costuma-se gerar grandes vazões, já que os consumos destas indústrias são elevados (tomates, ervilhas, espinafre, beterraba, pêssego, damasco...). Suas características são: pH= 4,5-8, DBO₅= 200-3.000 mg O₂/l, SS= 250-1600 mg/l e SD= 1.700-6.000 mg/l (WBG, 1998; Nelson y Dasgupta, 1998).

2.3.2. Geração de Resíduos Agroindustriais em SIDS

Como já foi mencionado, os SIDS são um grupo muito heterogêneo, tanto por sua localização geográfica quanto por causa de seu nível econômico. O grupo inclui países que são relativamente ricos que desenvolvendo padrões nacionais, mas também alguns dos países mais pobres do mundo. As características comuns incluem: pequenez, abundância de recursos marinhos e afastamento. Com algumas exceções, a maior parte da população em SIDS está concentrada em áreas rurais, geralmente na costa ou perto dela. Tradicionalmente, os SIDS são altamente dependentes da pesca para comida e renda, especialmente para os pobres. A terra é limitada, o que restringe a área para a produção agrícola, resultando em uma baixa diversidade de culturas e produtos alimentícios, e um aumento significativo na dependência das importações. As grandes distâncias a importantes mercados de importação e exportação e a alta sensibilidade a choques externos, em particular à volatilidade do preço dos alimentos, dificultam ainda mais a segurança alimentar e nutricional. Além disso, esses países estão ameaçados pela elevação do nível dos oceanos, a erosão costeira e a diminuição da disponibilidade de água doce para a agricultura, como resultado tanto da mudança climática quanto da sobre-exploração dos recursos naturais (FAO, 2017).

Como indicado, não há dados estatísticos suficientes para conhecer a agricultura e a agroindústria de todos os SIDS. A importância do setor agrícola varia de acordo com o país. Por exemplo, a Papua Nova Guiné teve uma contribuição de 36% para o PIB em 2012, enquanto as Bahamas e Porto Rico tiveram uma dependência de 2% e 1%, respectivamente. A agricultura inclui silvicultura, caça e pesca, cultivo de culturas e produção de gado.

Entre os parceiros comerciais mais importantes para mais da metade dos SIDS são a União Européia, os Estados Unidos e a China, como mostra a **Tabela 6**.

Tabela 6: Os 5 principais parceiros comerciais dos SIDS

Socios de los PEID	
33 SIDS	UE (x27), EEUU (x23), China (x21), Singapur (x12)
17 SIDS do Caribe	EEUU (x16), UE (x15), Trinidad y Tobago (x8), Venezuela (x4), Canadá (x3)
9 SIDS da AIMS	UE (x9), China (x5), EEUU (x5), Índia (x4)
7 PEID do Pacífico	Australia (x6), Singapur (x6), Japón (x4) Nueva Zelanda (x3)

Fonte: SIDS, 2013.

Na região do Caribe, o agronegócio canavieiro em Cuba e a beterraba na República Dominicana para a produção de rum se destacam. Da mesma forma, a indústria cítrica é uma grande fonte de renda em vários países da região. Desde outubro de 2009, eles estão sob ameaça de Citrus Huanglongbing (HLB) ou doença verde. Em um projeto regional que cobre a América Central e o Caribe, a FAO está fornecendo apoio técnico a Antígua e Barbuda, Bahamas, Barbados, Belize, Granada, Guiana, Haiti, Jamaica, São Vicente e Granadinas, Santa Lúcia, Suriname e Trinidad e Tobago. Seu objetivo é controlar a saúde das plantas nos países e sub-regiões, através de organizações com ferramentas técnicas fundamentais e recursos humanos treinados para implementar sistemas eficientes e coordenar medidas regionais para responder ao HLB.

Na região do Pacífico, vale a pena mencionar a produção de café da Papua Nova Guiné (PNG). Com a ajuda de doadores e do setor privado, os produtores de café procuraram capitalizar a tendência do mercado de certificação de terceiros (TPC), aumentando o café vendido nesse nicho de mercado em 25%. Foi um desafio alcançar os níveis de garantia de qualidade e volume de oferta suficiente para fornecer um retorno positivo sobre esse investimento. Oitenta e cinco por cento do café produzido na PNG é produzido por pequenos agricultores em menos de 2 hectares, com infra-estruturas de transporte e comunicação deficientes. Apenas grupos relativamente grandes de agricultores (1.000 ou mais) localizados em áreas facilmente acessíveis por estrada ou perto de estações de compras, proporcionaram um retorno líquido positivo sobre o investimento e, em 2013, apenas 10% da produção de café de PNG foi certificada.

As **Tabelas 7, 8 e 9** mostram a população economicamente ativa na agricultura e a porcentagem em relação ao total, nas regiões do Caribe, AIMS e Pacífico, respectivamente.

Tabela 7: População economicamente ativa na agricultura e porcentagem em relação ao total na região do Caribe.

Cariben	População economicamente ativa na agricultura	% do Total
Anguila	1000	7,1
Antiga y Barbuda	8000	8,9
Aruba	9000	8,7
Bahamas	5000	1,3
Barbados	4000	1,4
Belize	33000	9,9
Ilhas Bermudas	0	0,0
Ilhas Vírgens Britânicas	2000	7,1
Ilhas Caimão	5000	8,6
Cuba	551000	4,9
Dominica	6000	8,3
República Dominicana	432000	4,2
Granada	9000	8,5
Guadalupe	3000	0,6
Guiana	52000	6,5
Haití	2323000	22,5
Jamaica	208000	7,5
Martinica	3000	0,7
Montserrat	ND	ND
Porto Rico	13000	0,4
São Cristóvão e Névis	6000	11,1
Santa Lúcia	18000	9,5
São Vicente e Granadinas	11000	10,1
Suriname	33000	6,1
Trinidad e Tobago	45000	3,4
Ilhas Turks e Caicos	3000	9,1
Ilhas Vírgens (EUA)	9000	8,4

ND: Não disponível.

Fonte: FAO, 2014_b.

Tabela 8:

População economicamente ativa na agricultura e porcentagem em relação ao total na região AIMS.

AIMS	População economicamente ativa na agricultura	% do Total
Barém	4000	0,3
Cabo Verde	30000	6,0
Comores	222000	30,2
Guiné-Bissau	498000	29,2
Maldivas	23000	6,7
Maurício	41000	3,3
São Tomé e Príncipe	38000	19,7
Seychelles	32000	34,4
Cingapura	2000	0,04

Fonte: FAO, 2014_b.

Tabela 9: População economicamente ativa na agricultura e porcentagem em relação ao total na região do Pacífico.

Pacífico	População economicamente ativa na agricultura	% do Total
Samoa Americana	6000	10,9
Ilhas Cook	2000	9,5
Fiyi	128000	14,5
Polinésia Francesa	31000	11,2
Guam	18000	10,9
Kiribati	11000	10,8
Ilhas Marshall	6000	11,3
Micronésia, Fed. Sts.	11000	10,6
Nauru	1000	10,0
Nova Caledônia	31000	12,1
Niue	NA	NA
Ilhas Marianas do Norte	6000	11,1
Palau	2000	9,5
Papua Nova Guiné	2247000	30,7
Samoa	18000	9,5
Ilhas Salomão	157000	28,0
Timor Leste	358000	31,6
Tonga	11000	10,5
Tuvalu	1000	10,0
Vanuatu	39000	15,4

ND: Não disponível
Fonte: FAO, 2014_b.

2.4. Os Resíduos Sólidos Urbanos

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) que de forma comum conhecemos como “lixos” há alguns anos não eram um motivo especial de preocupação. Atualmente, devido ao crescimento econômico e à acumulação de população em áreas pontuais, atingem quantidade tão importantes que devem ser administrados adequadamente, pois do contrário se converteriam em um problema muito grande.

2.4.1. Produção

O conhecimento da produção é essencial para todos os aspectos do gerenciamento de RSU. Isso depende essencialmente do número de habitantes. No entanto, a produção per capita é muito heterogênea e varia dependendo de vários elementos. Depende principalmente de: padrão de vida da população, época do ano, localização geográfica, modo de vida dos habitantes e novos métodos de condicionamento dos produtos, com tendência a utilizar embalagens descartáveis, entre outros. É um fato comprovado que quanto maior o nível de vida, maior a geração de resíduos. Assim, quanto mais desenvolvido for um país, maior a quantidade de resíduos gerados.

2.4.2. Composição

É imprescindível a realização de estudos de composição e caracterização dos resíduos urbanos quando se pensa na aplicação de um sistema determinado de tratamento, independentemente dos de ordem quantitativa que devam ser realizados. O conhecimento da composição dos resíduos sólidos

é de crescente importância, sobretudo com o desenvolvimento dos diferentes processos de avaliação. Os resíduos urbanos são essencialmente heterogêneos. Geralmente o número de categorias depende do objetivo perseguido, de modo que uma classificação mais completa poderia ser dividida em 10 categorias: 1. Papel-cartão; 2. Telas; 3. Plásticos; 4. Metais; 5. Vidro; 6. Matéria orgânica; 7. Ossos; 8. Restos combustíveis não classificados; 9. Restos incombustíveis não classificados, finos e inferiores a 20 mm. Esta classificação é necessária quando se pretende fazer um estudo dos diferentes processos de avaliação dos resíduos.

2.4.3. Geração e composição dos resíduos sólidos urbanos nos SIDS.

A produção de RSU de um país depende do número de habitantes e da produção per capita. Ao mesmo tempo, como mencionado anteriormente, a produção de RSU por habitante depende de diferentes fatores, como o padrão de vida da população, época do ano, localização geográfica e modo de vida de seus habitantes, entre outros. Portanto, a heterogeneidade dos SIDS, suas diferentes populações e níveis econômicos, implica que a produção de resíduos urbanos neles é diversa. No entanto, o fluxo de turistas também deve ser levado em conta, dada a importância que este setor tem em muitos deles.

As **Tabelas 10, 11 e 12** mostram as populações dos SIDS nas regiões do Caribe, Pacífico e AIMS, respectivamente.

Tabela 10: Populações de SIDS da Região do Caribe.

Caribe	População Total	População Rural	% do Total
Anguila	14000	ND	ND
Antiga y Barbuda	90000	63000	70
Aruba	103000	55000	53,4
Bahamas	377000	58000	15,4
Barbados	285000	155000	54,4
Belize	332000	185000	55,7
Ilhas Bermudas	65000	ND	ND
Ilhas Vírgens Britânicas	28000	17000	60,7
Ilhas Caimão	58000	ND	ND
Cuba	11266000	2804000	24,9
Dominica	72000	23000	31,9
República Dominicana	10404000	3034000	29,2
Granada	106000	64000	60,4
Guadalupe	466000	7000	1,5
Guiana	800000	572000	71,5
Haití	10317000	4527000	43,9
Jamaica	2784000	1331000	47,8
Martinica	404000	45000	11,1
Montserrat	5000	4000	80
Porto Rico	3688000	33000	0,9
São Cristóvão e Névis	54000	4000	7,4
Santa Lúcia	182000	153	80,5
São Vicente e Granadinas	109000	55000	50,5
Suriname	539000	159000	29,5
Trinidad e Tobago	1341000	1150	85,8
Ilhas Turks e Caicos	33000	2000	6,1
Ilhas Vírgens (EUA)	107000	5000	4,7

ND: Não Disponível

Fonte: FAO, 2014_b.

Tabela 11: Populações dos SIDS da Região do Pacífico

Pacífico	População Total	População Rural	% do Total
Samoa Americana	55000	3000	5,5
Ilhas Cook	21000	5000	23,8
Fiyi	881000	414000	47
Polinésia Francesa	277000	135000	48,7
Guam	165000	11000	6,7
Kiribati	102000	57000	55,9
Ilhas Marshall	53000	14000	26,4
Micronésia, Fed. Sts.	104000	80000	76,9
Nauru	10000	ND	ND
Nova Caledônia	256000	99000	38,7
Niue	1000	1000	100
Ilhas Marianas do Norte	54000	4000	7,4
Palau	21000	3000	14,3
Papua Nova Guiné	7321000	6400000	87,4
Samoa	190000	153000	80,5
Ilhas Salomão	561000	441000	78,6
Timor Leste	1133000	803000	70,9
Tonga	105000	80000	76,2
Tuvalu	10000	5000	50
Vanuatu	253000	188000	74,3

ND: Não Disponível

Fonte: FAO, 2014_b.

Tabela 12: Populações dos SIDS da Região AIMS.

AIMS	Población Total	Población Rural	% del Total
Barém	1332000	149000	11,2
Cabo Verde	499000	179000	35,9
Comores	735000	528000	71,8
Guiné-Bissau	1704000	932000	54,7
Maldivas	345000	195000	56,5
Maurício	1244000	725000	58,3
São Tomé e Príncipe	193000	69000	35,8
Seychelles	93000	42000	45,2
Cingapura	5412000	ND	ND

ND: Não Disponível

Fonte: FAO, 2014_b.

Entre os vários problemas que a SIDS enfrentou ao longo dos anos, o aumento da quantidade de resíduos está se tornando um dos principais problemas. Portanto, o rápido aumento que está ocorrendo na geração de resíduos, faz com que a SIDS enfrente um sério problema de gerenciamento de RSU. Além disso, os problemas de escassez de terra, falta de recursos e experiência no campo da gestão de resíduos reduzem significativamente o potencial de gestão de resíduos nessas ilhas (UNEP, 1999).

A gestão dos RSU é um grande problema que afeta as economias dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, devido à crescente quantidade de resíduos gerados anualmente. Esse aumento na geração de resíduos é frequentemente associado ao crescimento econômico, aumento da industrialização, aumento da população e melhores padrões de vida (Kothari et al., 2014). Portanto, a geração de resíduos difere de um país para outro. Os países desenvolvidos geralmente têm taxas

mais altas de geração de resíduos do que os países menos desenvolvidos. A **Tabela 13** mostra as taxas médias de geração de RSU nas diferentes regiões geográficas dos SIDS e o valor médio global.

Tabela 13: Taxa de geração de RSU per capita nos SIDS

SIDS	RSU kg/hab/d
Região do Caribe	1,61
Região do Pacífico	0,82
Região da AIMS	1,56
Valor médio	1,29

Fonte: Mohee et al, 2015.

Ao comparar as taxas de geração de RSU entre os SIDS, pode-se observar que os SIDS do Caribe apresentam maior taxa de geração em comparação com os SIDS do Pacífico e da AIMS. Isso pode ser explicado por vários fatores, como padrões de vida e crescimento econômico.

O índice de desenvolvimento humano (IDH) é uma medida do padrão de vida de um cidadão. Ter um IDH maior significa um padrão de vida mais alto, portanto, maior consumo e maior geração de resíduos. No SIDS do Caribe, o IDH médio é de 0,70 seguido de 0,69 no SIDS da AIMS e de 0,63 no SIDS do Pacífico (Mohee et al., 2015). Então, o IDH mais alto em SIDS no Caribe corresponde a uma maior taxa de geração de RSU neles, seguido pelo SIDS da AIMS e do Pacífico, respectivamente. Além disso, o PIB per capita também é maior no SIDS caribenhos e no AIMS (US \$ 11.732 e 13.853 respectivamente) em comparação com US \$ 9.076 nos SIDS do Pacífico (Mohee et al., 2015). Com um PIB per capita mais alto, mais bens e serviços são produzidos e isso gera um maior volume de resíduos. No entanto, embora o PIB per capita seja maior nos SIDS da AIMS do que nos da região do Caribe, estes últimos têm uma taxa de geração de RSU mais elevada. A razão é porque o PIB per capita no SIDS da AIMS é anormalmente alto devido à inclusão do PIB per capita de Cingapura, que é de US \$ 55.182 (The World Bank, 2014). Outro fato que justifica a baixa taxa de geração de RSU nos PEID do Pacífico em comparação com os SIDS do Caribe e AIMS é o número de turistas que visitam os diferentes SIDS. Devido ao baixo número de turistas que visitam as SIDS do Pacífico em relação aos SIDS do Caribe e AIMS (UN, 2010 citado por Mohee et al., 2015), a quantidade de resíduos gerados e, portanto, a taxa de geração de RSU é consideravelmente menor em comparação com o SIDS do Caribe e o AIMS.

Como referência, a produção de RSU em Espanha e a média da União Europeia (U28) foi, respectivamente, 434 kg/habitante (1,19 kg/hab.d) e 476 kg/habitante (1,30 kg/hab.d) em 2015 (Eurostat, 2017).

Além da geração de resíduos, a composição dos resíduos é outro parâmetro importante no desenvolvimento de estratégias adequadas para o gerenciamento do RSU. Com base na composição dos resíduos gerados nos SIDS podem ser implementadas tecnologias para o seu tratamento. A **Tabela 14** mostra a composição média do RSU nos diferentes regiões geográficas de SIDS e o valor médio. Como pode ser visto, as composições dos resíduos diferem apenas ligeiramente entre as três regiões, devido a possíveis semelhanças nos padrões de consumo adotados por pessoas que vivem em diferentes regiões geográficas de SIDS (Chandrappa e Das, 2012 citados por Moheer et al., 2015). A principal fracção de RSU nas três regiões, é a correspondente á matéria orgânica, sendo maior na região AIMS (48%) e menor na região do Pacífico (41%). O valor médio indica que a fracção principal do RSU é composta por materia orgânica (44%), seguida de materiais recicláveis, ou seja, papel, plástico, vidro e metais (43%), embora alguns SIDS gerem mais materiais recicláveis.

Tabela 14: Composição média dos RSU nos SIDS

SIDS	Papel e cartão	Metais	Vidro	Plásticos	Materia Orgânica	Outros
Região do Caribe	15 %	7 %	7 %	13 %	46 %	12 %
Região do Pacífico	17 %	10 %	6 %	14 %	41 %	12 %
Região AIMS	11 %	7 %	2 %	12 %	48 %	20 %
Valor médio	16 %	8 %	6 %	13 %	44 %	13 %

Fonte: Mohee et al, 2015.

No que diz respeito ao sistema de gestão de resíduos, a recolha e transporte de resíduos são elementos funcionais importantes. Em muitos SIDS não há um sistema de coleta adequado que interrompa o fluxo de manejo e os geradores de resíduos recorram a práticas ilegais e indesejadas, como jogá-los em locais proibidos e queimá-los sem qualquer controle. Essas práticas resultam em efeitos prejudiciais à saúde devido à liberação de emissões tóxicas durante a queima e à disseminação de doenças causadas por descargas ilegais (ADB, 2014, citado por Mohee et al, 2015). As taxas de coleta de lixo no SIDS variam de alto a muito baixo e existem várias razões para essa diferença (ADB, 2014). Enquanto em alguns SIDS a infra-estrutura é bem desenvolvida, o mesmo não é verdadeiro em outros onde as estradas são muito estreitas ou inacessíveis (ADB, 2014, Medina, 2011 citado por Mohee et al., 2015). Como resultado, os veículos de coleta não podem acessar essas áreas e os resíduos permanecem em sua fonte de geração. Outro fator responsável pela baixa coleta de resíduos é a falta de recursos suficientes para fornecer contêineres e veículos de coleta adequados (Al Ansari, 2012). A eficácia dos processos de coleta e transporte é bastante reduzida. Portanto, os geradores de resíduos se voltam para a queima ilegal ou despejo no mar como sua opção mais próxima de descarte (UNEP, 1999).

Com relação às tecnologias de gerenciamento de resíduos, existem várias que podem ser utilizadas, como reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia, processos termoquímicos e disposição final em aterros sanitários. Considerando o alto teor de matéria orgânica dos RSU no SIDS (Tabela 14) e a falta de espaço em aterros sanitários na maioria dos pequenos Estados insulares em desenvolvimento, a reciclagem da fração orgânica para tratamento por digestão anaeróbica é uma das tecnologias mais apropriadas para a gestão do RSU nos SIDS. No entanto, antes de implementar qualquer técnica de gestão de resíduos, é muito importante realizar uma caracterização adequada dos resíduos para que o processo de gestão de resíduos seja finalmente eficaz.

É importante mencionar que um grande problema nos SIDS é a falta de conhecimento dos geradores de resíduos, ou seja, do público em geral, o que amplifica as complicações e dificuldades, já presentes, no manejo de resíduos sólidos de SIDS (Thaman et al., 2003; Prasertsan e Sajjakulnukit, 2006; Wangi, 2013, ADB, 2011, citado por Mohee et al., 2015). Squires (2006) argumentou que a eficácia de um sistema de gerenciamento de RSU pode ser afetada por riscos sociais devido à insuficiente participação cidadã (Mohee et al., 2015). Consequentemente, o cidadão em geral deve ser sensibilizado e incentivado a participar de programas de gestão de resíduos através de campanhas apropriadas de conscientização sobre gestão de resíduos desenvolvidas pelo governo ou organizações não-governamentais (PNUMA, sem data, Wangi, 2013). Os cidadãos locais devem estar cientes dos regulamentos existentes que os impedirão de recorrer a práticas como o despejo ilegal ou a queima de resíduos no quintal. As campanhas de conscientização ambiental no nível educacional e comunitário podem, eventualmente, ajudar a ter um sistema eficiente de gerenciamento de resíduos.

2.5. Lodos de ETAR

As águas residuais originadas nos núcleos urbanos são, fundamentalmente, de origem doméstica, existindo em alguns casos contribuições industriais. O volume de águas residuais gerado por uma população se estima em função da dotação de água por habitante e dia, que depende do grau de desenvolvimento do país e do tamanho da cidade. Estas águas são tratadas em estações depuradoras de águas residuais urbanas (ETAR) para que, uma vez depuradas, possam ser reutilizadas, conseguindo-se desse modo reduzir a contaminação causada pela atividade humana. Estas instalações, um pouco complexas, permitem depurar as águas residuais urbanas através de processos físico-químicos e biológicos, resultando em um efluente com qualidade adequada para poder ser incorporado aos leitos públicos e à geração de lodos. A lama ou lodo biológico são o produto da retirada do excesso de biomassa sintetizada no reator biológico aeróbico como consequência da assimilação da carga contaminantes (substrato) eliminada da água residual afluente no tratamento secundário. Estas estações de tratamento concentram nos lodos os produtos contaminantes que são separados no processo de depuração. Estes lodos devem ser submetidos a determinados processos, a fim reduzir sua carga orgânica. Um dos sistemas mais utilizados para sua estabilização é a digestão anaeróbica.

2.5.1. Produção de lodos

A determinação da produção de lodos é complexa e depende de muitos fatores. A seguir, de forma orientativa, são fornecidas as quantidades de lodo produzidas nos diferentes processos de depuração que correspondem à linha de água. Os valores mais significativos são: decantação primária 110-170 kg/1.000 m³, valor típico 150; lodo ativo (em excesso) 70-100 kg/1.000 m³, valor típico 85; filtros biológicos (em excesso) 55-90 kg/1.000 m³, valor típico 70; areação prolongada (lodo em excesso) 80-120 kg/1.000 m³, valor típico 100 (supondo que não existe tratamento primário); lagoa aerada (lodo em excesso) 80-120 kg/1.000 m³, valor típico 100 (supondo que não existe tratamento primário). Em termos gerais, pode-se dizer que a quantidade de lodo gerada é de cerca de 1% da vazão de água tratada.

2.5.2. Características

Os parâmetros que caracterizam a água residual urbana são a DBO₅, os ST e os SS. Em média, são gerados 70 g DBO₅/hab.d, e 90 g SS/hab.d. A porcentagem de ST oscila entre 2% e 8%, dos quais entre 60 e 80% são voláteis. Estes valores, junto com a dotação de água, permitem estimar o volume e a concentração do resíduo de uma população, sabendo-se o número de habitantes.

A concentração média de DBO₅ oscila entre 250 e 350 mg/l e os SS em torno de 300 mg/l. Tratando-se de resíduos diluídos com um baixo conteúdo de matéria orgânica, os processos aplicados a estas águas possuem apenas uma finalidade depuradora, e não de aproveitamento. No entanto, no processo de depuração das águas urbanas são originados lodos que apresentam uma maior concentração e que são submetidos à digestão anaeróbica, obtendo-se metano aproveitável energeticamente.

2.5.3. Situação das águas residuais em SIDS

Nos últimos anos, o crescimento econômico e demográfico da SIDS vem aumentando, causando distúrbios no ambiente natural. A maioria desses estados tem uma população pequena, mas densa e crescente, que geralmente soma entre 100.000 e 700.000 pessoas, que se instalam principalmente em áreas de rápido desenvolvimento ao longo de costas frágeis; 30% da população das ilhas do Pacífico e 60% da população das ilhas do Caribe vivem atualmente em vilas e cidades, o que pressiona os recursos e aumenta a poluição. As cidades em expansão, as novas urbanizações, a

agricultura e a eliminação de resíduos, as terras cada vez mais escassa são disputadas, o que causa seu empobrecimento e desertificação. Resíduos e poluição estão se tornando sérios problemas. O crescimento industrial está causando um aumento na proporção de resíduos sólidos tóxicos e resíduos não biodegradáveis; Águas residuais urbanas não tratadas despejadas no mar, juntamente com o escoamento agrícola, estão destruindo os recifes de corais e outros ambientes de importância crítica para o turismo.

Os SIDS do Pacífico enfrentam desafios crescentes para proteger e gerenciar eficientemente seus limitados recursos de água doce. Existem várias ações que devem ser levadas em conta para garantir a segurança da água doce em SIDS. Entre eles, a intrusão de água salgada nos aquíferos, causada por mudanças climáticas e causas relacionadas às atividades humanas, se torna um desafio crítico. No entanto, embora se reconheça que, em grande medida, a falta de dados impede uma avaliação confiável e detalhada da atual vulnerabilidade do país a esse problema, seu escopo está melhorando dentro dos quadros de gestão e governança integrada da água. No entanto, um ambiente complexo onde as estruturas tradicionais e legais estão interligadas e a governança da água fragmentada dificulta o processo de tomada de decisão. A magnitude dos desafios futuros relacionados com os recursos hídricos dependerá da forma como os compromissos atuais incluídos na legislação e nos documentos de estratégia nacional são traduzidos. As principais prioridades neste processo incluem investimento e melhoria das capacidades humanas e técnicas relacionadas com a ciência da água e a avaliação de recursos e manutenção de campanhas nacionais de consciencialização do público.

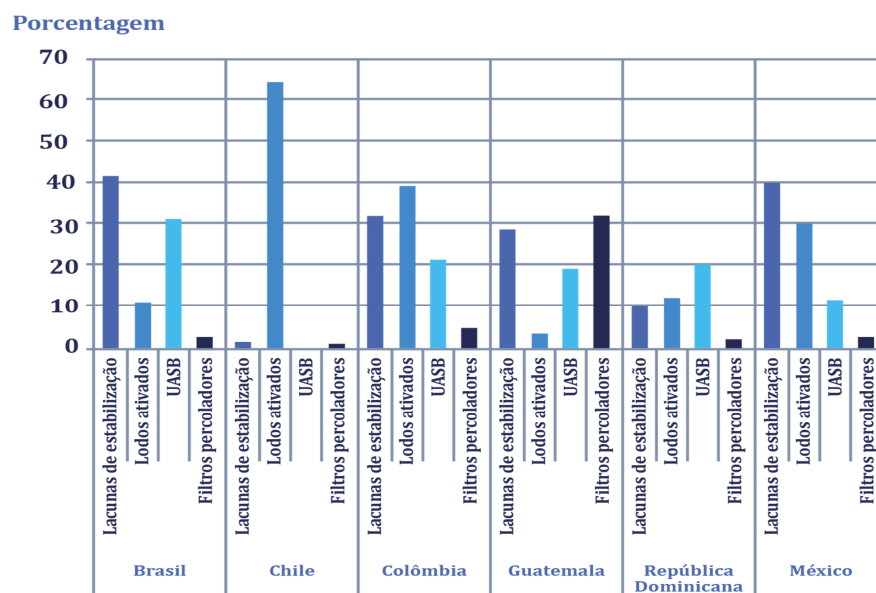
Vários projectos do Global Environment Facility (GEF) prevêm a gestão integrada das zonas costeiras para proteger a indústria pesqueira, da qual depende a economia de muitos SIDS, assegurar o transporte marítimo, que é vital para as suas economias, e proteger o recifes de coral através do tratamento de esgoto e outras medidas.

Já em 1999, o GEF financiou o projeto de demonstração de abordagens inovadoras para a reabilitação de baías muito poluídas no Grande Caribe, como continuação de um projeto piloto executado na baía de Havana (Cuba), Puerto Limón (Costa Rica), a baía de Cartagena (Colômbia) e o porto de Kingston (Jamaica). O projeto piloto resultou em planos de investimento e fortalecimento institucional e identificou fontes de financiamento para a aplicação de medidas corretivas, o que resultou em uma contribuição de mais de US \$ 250 milhões.

Através do todo o projeto está sendo fornecido cofinanciamento a nível nacional para ajudar Cuba e Jamaica a superar vários obstáculos importantes à adoção de melhores práticas para reduzir a poluição das águas nacionais e das águas internacionais adjacentes. O objetivo do projeto é reduzir a entrada de nitrogênio e fósforo na Baía de Havana e no porto de Kingston e nas águas adjacentes do Grande Caribe, através da construção, em um ponto intermediário da margem do rio Luyanó, de uma planta de demonstração para tratamento integrado de águas residuais.

Vale a pena destacar os projetos piloto realizados na província de Cienfuegos (Cuba) sobre a proteção das bacias de abastecimento de água e a redução dos efeitos a jusante da descarga de águas residuais; redução da poluição de indústrias na bacia inferior do rio Haina na República Dominicana; melhoria da gestão da bacia hidrográfica do Fond d'Or em Santa Lucía; redução da poluição e dos sedimentos da bacia de Courland, em Trinidad e Tobago, e proteção do suprimento de água do aquífero do vale do Basseterre em Saint Kitts e Nevis.

Não há informações específicas sobre o tratamento de águas residuais urbanas em SIDS. Na América Latina e no Caribe, menos de 20% das águas residuais municipais são tratadas, o que reflete a necessidade de investimentos no setor de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) nessa região e, mais especificamente, nos SIDS. A escolha de tecnologias de tratamento deve considerar não apenas aspectos técnicos e econômicos, mas também os impactos ambientais gerados. Neste sentido, as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) constituem um dos impactos ambientais relevantes do setor (Noyola, A., 2012). A **Figura 4** apresenta as tecnologias mais utilizadas na ALC nas PTAR em uma amostra de seis países analisados (Noyola, 2012).



Fonte: Noyola, 2012.

Figura 4: Distribuição por número e por país das diversas tecnologias de tratamento para águas residuais municipais.

2.6. Mescla de resíduos: A Codigestão

Conhece-se como "codigestão anaeróbica" o tratamento anaeróbico conjunto de resíduos orgânicos de diferente origem e composição, a fim de aproveitar a complementariedade das composições para permitir perfis de processo mais eficazes. Além de melhorar o processo, tem outras vantagens como compartilhar instalações de tratamento, unificar metodologias de gestão, amortizar as variações temporais em composição e produção de cada resíduo separadamente, bem como reduzir custos de investimento e exploração. Há tempos se pesquisa a codigestão de distintos cosubstratos como, por exemplo, resíduos pecuários com resíduos industriais (Ahling et al., 1992) ou mesmo algas (com ou sem tratamento) com culturas energéticas (Ramos e Carreras, 2011 e 2012).

A principal vantagem da codigestão radica no aproveitamento da sinergia das mesclas, compensando as carências de cada um dos substratos separadamente. Além de aumentar o potencial de produção de biogás, a adição de cosubstratos facilmente biodegradáveis confere uma estabilidade adicional ao sistema. Ademais, unifica a gestão destes resíduos ao compartilhar instalações de tratamento, reduzindo os custos de investimento e exploração. A "codigestão" anaeróbica permite, portanto, aproveitar a complementariedade da composição dos resíduos para criar processos mais eficientes. Como exemplo, o conteúdo de carbono no esterco de boi é excessivo, assim como o conteúdo de nitrogênio no esterco de porco; assim surge a possibilidade e vantagem de alimentar o digestor com excrementos misturados de várias espécies animais, permitindo balancear seu conteúdo em nutrientes e aumentar a eficiência do processo de produção de biogás (Marañón, 2009).

Como cosubstrato podem ser utilizadas muitas matérias orgânicas, sobretudo resíduos agrícolas como palhas ou, inclusive, cultivos energéticos, como a ensilagem do milho.

A codigestão anaeróbica se desenvolveu muito nos últimos anos, especialmente na Alemanha que, nos últimos 10 anos, multiplicou por 5 o número de plantas de biogás. Atualmente possui cerca de

8.000 plantas (Figura 26) que tratam, principalmente, chorume de porco em codigestão com ensilagem de milho.

Resumo do Capítulo 2

Os resíduos biodegradáveis englobam subprodutos e resíduos orgânicos que podem ser apresentados na fase sólida e líquida, suscetíveis de ser submetidos a processos biológicos de tratamentos através de biometanização.

Um resíduo é definido através de um conjunto de parâmetros que indicam o grau de contaminação produzido e determinam o tipo de processo que deve ser seguido para o seu tratamento.

Consideram-se resíduos biodegradáveis potenciais, isso é, aqueles que são suscetíveis de ser tratados por digestão anaeróbica para a geração de energia (biogás), principalmente os seguintes: resíduos de explorações pecuárias (esterco e purinas), resíduos de agroindústrias, como os gerados na indústria do café, destilarias, açucareiras, cervejarias, etc., a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e os lodos anaeróbicos das estações de tratamento de águas residuais (ETAR).

Ademais, a codigestão anaeróbica de resíduos, o tratamento conjunto dos mesmos, pode ser uma alternativa considerável. Sua viabilidade apresenta uma série de vantagens como compartilhar instalações de tratamento, unificar metodologias de gestão, amortizar as variações temporais na composição e produção de cada resíduo separadamente, bem como reduzir custos de investimento e exploração.

Nos últimos anos, o crescimento econômico e demográfico do SIDS vem aumentando, causando distúrbios no ambiente natural. O gerenciamento do RSU é um grande problema que afeta as economias dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, devido à crescente quantidade de resíduos gerados anualmente. Esse aumento na geração de resíduos é frequentemente associado ao crescimento econômico, maior industrialização, aumento da população e melhores condições de vida. Portanto, a geração de resíduos difere de um país para outro. Os países desenvolvidos geralmente têm taxas mais altas de geração de resíduos do que os países menos desenvolvidos.

Existem várias deficiências no processo de coleta e transporte de RSU devido a veículos de coleta antigos e estradas estreitas inacessíveis. Entre as práticas de gestão de resíduos nos SIDS, na maioria das vezes foi favorecida a eliminação de resíduos em aterros, descargas ilegais e queimadas descontroladas à custa de tecnologias de tratamento sustentáveis, como compostagem, digestão anaeróbica e reciclagem.

A eficácia de um sistema de gerenciamento de RSU pode ser afetada por riscos sociais devido à participação insuficiente dos cidadãos (Mohee et al., 2015). Consequentemente, o público em geral deve ser sensibilizado e incentivado a participar de programas de gestão de resíduos através de campanhas de conscientização apropriadas sobre gestão de resíduos desenvolvidas pelo governo ou organizações não-governamentais (UNEP, sem data, Wangi, 2013). Os cidadãos locais devem estar cientes dos regulamentos existentes que os impedirão de recorrer a práticas como o despejo ilegal ou a queima de resíduos no quintal. As campanhas de conscientização ambiental no nível educacional e comunitário podem, eventualmente, ajudar a ter um sistema eficiente de gerenciamento de resíduos.

Além da geração de resíduos, a composição dos resíduos é outro parâmetro importante no desenvolvimento de estratégias adequadas para o gerenciamento do RSU. Com base na composição dos RSMs gerados no SIDS, tecnologias apropriadas para seu tratamento podem ser implementadas. A principal fração do RSU nas três regiões é a matéria orgânica, sendo maior na região AIMS (48%) e menor na região do Pacífico (41%).

Considerando o alto teor de matéria orgânica dos RSU em SIDS e a falta de espaço em aterros na maioria dos pequenos Estados Insulares em desenvolvimento, a reciclagem da fração orgânica para tratamento por digestão anaeróbia é uma das tecnologias mais apropriadas para a gestão do RSU nos SIDS.

3. A Digestão Anaeróbica ou Biometanização

A degradação biológica da matéria orgânica biodegradável é um processo que ocorre no meio natural graças à ação de distintos microrganismos que, em função do meio em que se desenvolvem, podem ser aeróbicos, anaeróbicos ou facultativos. Esta classificação está baseada na presença do ar ou, concretamente, de oxigênio no meio. Assim, os microrganismos aeróbicos necessitam de oxigênio para sua sobrevivência, os anaeróbicos se desenvolvem na ausência de oxigênio e os facultativos têm a capacidade de sobreviver nos dois ambientes.

Dentre as diversas técnicas de tratamento que permitem reduzir a carga orgânica contaminante dos resíduos, um dos processos mais utilizado atualmente é o tratamento por digestão anaeróbica ou biometanização. Este é um processo biológico mediante o qual a matéria orgânica, na ausência de oxigênio e por meio de um grupo de bactérias específicas (anaeróbicas), degrada-se em uma série de produtos gasosos, conhecidos como biogás, e um subproduto conhecido como digestão ou digerido (biol). Este tratamento é especialmente interessante já que, além de reduzir a contaminação, enseja a produção de biogás, gás com um importante valor energético por estar constituído principalmente por metano (55-65%).

Em comparação com os processos aeróbicos, os tratamentos anaeróbicos apresentam as vantagens de não necessitar arejamento e de gerar biogás que pode ser recuperado e utilizado com fins energéticos, permitindo, em muitos casos, a autonomia ou autossuficiência das plantas de tratamento. Outro aspecto a ser considerado é a redução da geração de lodos, reduzindo-se, portanto, os custos.

Sem embargo, deve-se considerar que a digestão anaeróbica é um processo complexo, que requer controle para assegurar seu correto funcionamento. Um exemplo disto é a sensibilidade às sobrecargas orgânicas que podem produzir a desestabilização do processo. A velocidade de degradação é baixa em comparação com os tratamentos aeróbicos e, portanto, são necessários tempos de retenção elevados e, conseqüentemente, digestores maiores.

Analisando todos os fatores, conclui-se que a digestão anaeróbica constitui uma boa alternativa para tratar efluentes e/ou resíduos com alta concentração de matéria orgânica biodegradáveis que, por outro lado, como viu-se no capítulo anterior, são numerosos na região da ALC.

Este processo pode ocorrer de maneira forçada em digestores anaeróbicos ou de maneira natural em aterros controlados de RSU. Tanto a geração de biogás em digestores anaeróbicos, quanto a extração e utilização do biogás gerado nos aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (RSU), são processos interessantes para a área da produção energética e serão abordados em capítulos posteriores. Além disso, nas duas situações se produz uma melhora ambiental importante, já que a extração do biogás de aterro oferece a possibilidade de reduzir as emissões de metano, gás que contribui de maneira notável ao efeito estufa, e a digestão anaeróbica dos resíduos reduz de forma considerável o poder contaminante destes.

Analisando todos os fatores, pode-se concluir que a digestão anaeróbica constitui uma boa alternativa para tratar efluentes e / ou resíduos com alta concentração de matéria orgânica biodegradável que, por outro lado, como vimos no capítulo anterior, são numerosos e problemáticos nos SIDS.

Neste capítulo se faz uma síntese histórica da descoberta do biogás, analisam-se as etapas do processo biológico anaeróbico e as distintas famílias de microrganismos envolvidas em cada uma

delas. Além disso, serão expostos os parâmetros que afetam o rendimento do processo e dos potenciais energéticos de alguns resíduos.

3.1. Síntese Histórica: Descobrimento do Biogás

A geração de Biogás a partir da digestão anaeróbica é um dos processos mais comuns utilizado pela natureza para degradar a matéria orgânica. Sabe-se há vários séculos que na degradação dos resíduos orgânicos gera-se gás combustível. Fontes muito antigas indicam que o uso de resíduos e os "recursos renováveis" para o fornecimento de energia não são conceitos novos, pois já eram conhecidos e utilizados muito antes do nascimento de Cristo.

Os inícios do biogás foram fixados com base em fatos históricos que dizem que começo da história do biogás deu-se na Assíria, no século X aC, indicando que existem evidência de que foi usado para aquecer a água dos banheiros públicos (Brakel, 1980; Lusk, 1998). Outros autores fixam os inícios por volta de 3000 anos antes de Cristo, indicando que os sumérios já praticavam a limpeza anaeróbica dos resíduos (Deublein e Steinhauser, 2008). Também há dados baseados no relato da viagem de Marco Polo à China (Catai) (1278-1295) no livro "Divisament du monde" (posteriormente conhecido como "O Livro das maravilhas do mundo"), no qual se descrevem tanques cobertos em que se armazenavam as águas residuais na antiga China, mas não está claro se capturavam o gás. Neste livro se afirma que esta prática estava mencionada na literatura chinesa do terceiro milênio antes de Cristo. Muito mais recente, no século XVI na Pérsia, consta escrito o uso do biogás (Brakel, 1980; Lusk, 1998).

Além destes fatos, mais o menos anedóticos, a ciência do processo de produção do biogás é tão antiga quanto a pesquisa científica e inclui os nomes da maioria dos pesquisadores mais famosos do mundo. A primeira nota científica sobre o biogás se atribui a Jan Baptista Van Helmont, na primeira metade do século XVII (1630), que determinou que da decomposição da matéria orgânica se obtinham gases inflamáveis (Abbasi et al, 2012), e Boyle, em 1682, anunciou a possibilidade de obter gás a partir de resíduos animais e vegetais em decomposição (Pine, 1971; Stafford, 1974). O interesse científico do processo com fins energéticos data do ano 1776, quando Volta identifica a relação entre a decomposição da matéria orgânica em um meio na ausência de oxigênio com a presença de gás combustível (Stafford e Hawkes, 1980), o qual havia sido definido anos antes como "gás dos pântanos" por seu descobridor, Shirley, em 1659.

Em 1804, John Dalton descreve a estrutura química do metano e o associa com o biogás. Foi, portanto, quem descobriu a presença de metano no gás. Contudo, foi Humphry Davy quem, em 1808, gerou metano a partir de esterco de gado em recipientes fechados de laboratório; toma-se este acontecimento como o início da pesquisa sobre o biogás (Tietjen, 1975). A este trabalho dá continuidade, parcialmente, seu aluno e célebre físico inglês Faraday, realizando alguns experimentos com o gás dos pântanos e o hidrocarboneto identificado com parte dele. Em 1821, Avogadro elucida pela primeira vez a estrutura química final do metano (CH₄).

Antoine Béchamp (aluno de Pasteur), em 1866, concluiu que a formação do metano durante a decomposição da matéria orgânica era produzida através de um processo microbiológico. Louis Pasteur foi o primeiro a descobrir os microrganismos anaeróbicos (tipo Clostridium) ao realizar um estudo sobre a fermentação butírica. Ademais, comprovou que pequenas quantidades de oxigênio eram tóxicas para estes microrganismos. Em 1884, obteve 100 litros de biogás por metro cúbico de esterco gás ao mesclar esterco e água à 35°C, sem a presença de oxigênio.

Van Senus, em 1890, estudou as relações existentes entre as atividades de vários microrganismos. Mais tarde, em 1906, Sohngen desenvolveu sua tese doutoral sobre "O processo microbiológico da digestão anaeróbica". Demonstrou que o hidrogênio reagia com dióxido de carbono para formar metano. Também supôs que o ácido acético, através da descarboxilação, formava metano. Esta

suposição foi muito controversa e se manteve durante décadas, mas agora se sabe que é essencialmente correta (McCarty et al. 1982).

Durante a década de 20 e 30 se realizaram muitas experiências em laboratório e em plantas piloto. Em muitos casos já se utilizavam os lodos de águas residuais como alimento dos digestores (Acharia, 1958; Summers e Bousfield 1976). Em 1927, Castellini foi um dos pesquisadores a estudar as relações simbióticas entre os diversos microrganismos que intervêm no processo de produção de metano.

Entre os anos 1927 e 1950 foram realizados diversos trabalhos experimentais sobre a produção de gás a partir de resíduos pecuários e, a partir de os anos 40, ocorreu um interesse maior pela digestão anaeróbica na Europa porque, em razão da II Guerra Mundial, as fontes de energia eram escassas. No entanto, esse interesse começou a decair pelo consumo crescente de combustíveis fósseis. Somente depois da crise do petróleo de 1973 ressurgiu o interesse na mecanização dos países europeus, estimulando programas de pesquisa e desenvolvimento, com a construção de plantas industriais. Todas estas pesquisas levaram a um melhor conhecimento do processo resumido em 4 etapas, como veremos no ponto 3.4.

Atualmente destaca-se o número de digestores existentes no mundo, tanto de pequeno tamanho e de baixo custo (Figura 9), quanto de grande tamanho e tecnologia mais avançada (Figura 25).

3.2. Benefícios ambientais e vantagens da Digestão Anaeróbica

A digestão anaeróbica reúne duas importantes características que a diferenciam das demais tecnologias, tem a capacidade de depurar e, ao mesmo tempo, produzir energia. A seguir enunciam-se os benefícios ambientais e vantagens de utilizar esta tecnologia.

3.2.1. Benefícios ambientais da Digestão Anaeróbica:

- Reduz o potencial contaminante dos resíduos orgânicos. Estes resíduos constituem um dos elementos mais contaminantes do meio ambiente.
- Reduz a contaminação de solos e água.
- Reduz as emissões de gases de efeito estufa.
- Tem benefícios adicionais ao cumprir com os objetivos do Protocolo de Kyoto.
- Menor potencial de contaminação dos lodos obtidos no processo.
- Os nutrientes dos lodos obtidos são mais suscetíveis de ser absorvidos pelas plantas e, assim, evitar a lixiviação do solo.
- Reduz os odores dos lodos agrícolas.
- Permite a gestão adequada dos resíduos.
- Evita a proliferação de insetos.
- Em regiões rurais, evita a derrubada de árvores para serem utilizadas como combustível. Os biodigestores são uma das grandes possibilidades para evitar a derrubada desmedida, já que se pode obter a energia do biogás.
- Não produz fumaça, como ocorre na queima da biomassa, sendo este um dos fatores que mais afetam a saúde das mulheres do campo.

3.2.2. Vantagens da digestão anaeróbica:

- A umidade dos resíduos não é um problema.
- Vários resíduos podem se tratado de maneira conjunta (codigestão).
- Seu consumo energético é muito inferior ao dos processos aeróbicos.
- Produz-se no processo um gás combustíveis que pode ser facilmente aproveitado.
- Pode-se conseguir ingressos adicionais pela gestão de resíduos.
- São sistemas simples e fáceis de administrar.
- Há uma ampla gama de tecnologias. As mais simples para o meio rural de países em desenvolvimento têm baixo custo.
- No âmbito rural, melhora-se a economia família ao produzir energia e o investimento é baixo. É um investimento a longo prazo e a manutenção é barata. As reparações do biodigestor são simples. Quando se tem um conhecimento mínimo de como manejá-lo, é possível realiza-las sem problemas. O biogás é muito mais rápido para cozinhar. Tem uma chama azul com alta concentração de calor, o que facilita o cozimento.

3.3. Biodegradabilidade dos componentes da matéria orgânica

Os resíduos orgânicos constituem-se principalmente de três grandes grupos, os carboidratos ou hidratos de carbono, os protídeos ou proteínas e os lipídios ou gorduras. A digestão anaeróbica é adequada para o tratamento destes resíduos, já que estes componentes têm boa biodegradabilidade. A **Tabela 15** mostra a biodegradabilidade dos principais componentes da matéria orgânica e os tipos de resíduos nos que estão presentes.

Tabela 15: Origem e biodegradabilidade dos principais componentes dos resíduos orgânicos

Componente	Presente em	Biodegradabilidade anaeróbica
Açúcares	Beterraba ou cana-de-açúcar. Subprodutos de uma açucareira ou fábrica de doces, etc.	Excelente
Amido	Excedentes de cereais, batatas, etc., subprodutos de fábricas de salgadinhos ou de amidos, etc.	Excelente
Celulose	Palha triturada, erva, polpas e peles de frutas e verduras, etc.	Boa ¹
Proteínas	Subprodutos animais, subprodutos da carne, lácteos ou da pesca, etc.	Excelente

¹ Requer maior tempo de retenção.

Fonte: Ainia (2010).

A seguir são descritas as etapas da degradação destes componentes.

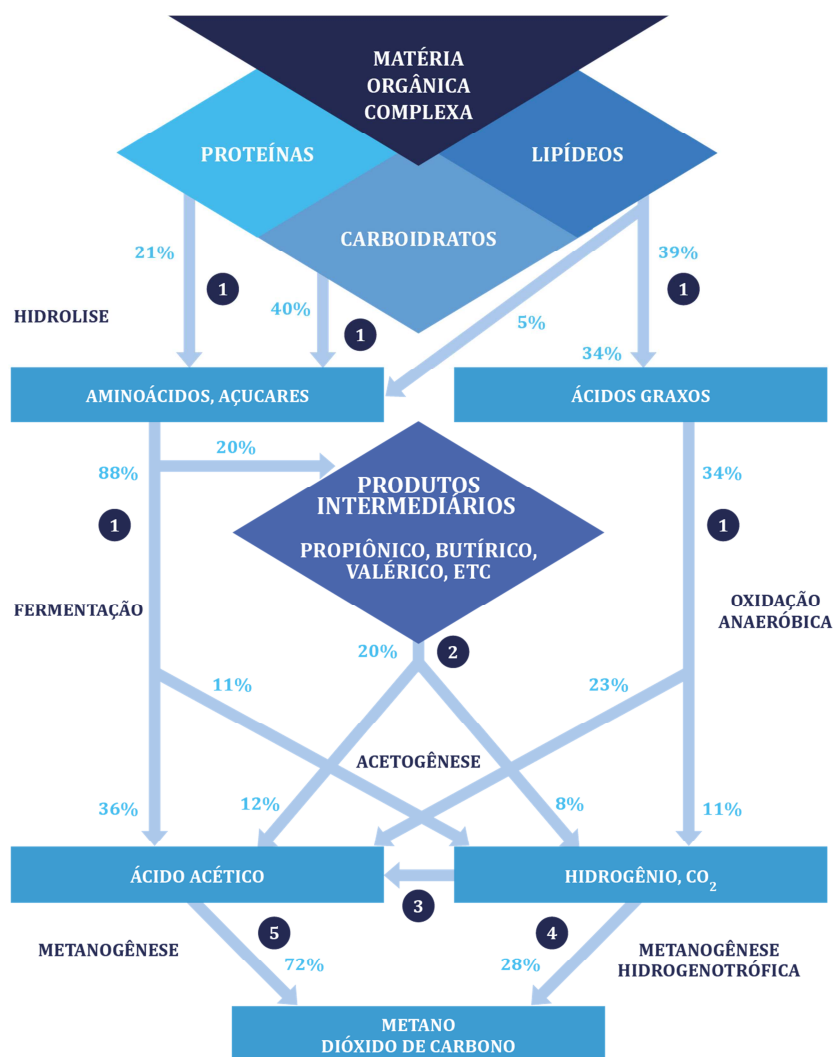
3.4. Etapas do Processo Anaeróbico

Como já se afirmou, no processo de degradação anaeróbica a matéria orgânica se transforma, pela ação dos microrganismos, em um gás, conhecido como "biogás" por sua origem biológica, em matérias orgânicas degradadas que continuam em dissolução, bem como em novos microrganismos. A degradação da matéria orgânica é realizada através de uma série complexa de reações bioquímicas que derivadas de distintas famílias de microrganismos. É, portanto, um processo muito complexo tanto pelo número de reações bioquímicas geradas, quanto pela quantidade de microrganismos envolvidos. De fato, muitas reações ocorrem de forma simultânea.

Os estudos bioquímicos e microbiológicos realizados até agora dividem o processo de decomposição anaeróbica em quatro fases ou etapas:

1. Fase de Hidrólise
2. Fase Acidogênica ou Fermentativa
3. Fase Acetogênica
4. Fase Metanogênica

Deve-se considerar que alguma destas quatro etapas pode ser a etapa limitante com relação à velocidade global da reação. A etapa de hidrólise pode ser a etapa limitante do processo global quando se trata de substratos complexos, como é o caso de alguns resíduos agrícolas e biomassa residual, que apresentam grande quantidade de sólidos (Lema e Méndez 1997). Contudo, pode-se considerar que a etapa mais lenta do processo é a metanogênese. Na **Figura 5** apresenta-se um esquema das distintas etapas envolvidas no processo de digestão anaeróbica, os microrganismos que intervêm em cada uma delas e os produtos intermediários gerados. Os números indicam a população bacteriana responsável pelo processo: 1. Bactérias fermentativas; 2. Bactérias acetogênicas que produzem hidrogênio; 3. Bactérias homoacetogênicas; 4. Bactérias metanogênicas hidrogenotróficas; 5. Bactérias metanogênicas acetoclásticas.



Fonte: Gujer, W., Zehnder, A.J.B., 1983.

Figura 5: Esquema das reações da digestão anaeróbica

A seguir se descrevem brevemente as quatro etapas do processo:

3.4.1. Fase de Hidrólise

A hidrólise é o passo inicial para a degradação anaeróbica de substratos orgânicos complexos, já que os microrganismos somente podem utilizar matéria orgânica solúvel capaz de atravessar sua parede celular. Portanto, é o processo de hidrólise que proporciona substratos orgânicos para as seguintes etapas do processo anaeróbico. A hidrólise destas moléculas complexas é realizada pela ação de enzimas extracelulares produzidas por microrganismos hidrolíticos e pode ser a etapa limitante da velocidade global do processo, sobretudo quando se tratam de resíduos com alto conteúdo de sólidos.

A matéria orgânica está constituída fundamentalmente por três tipos básicos de macromoléculas: hidratos de carbono, proteínas e lipídios. Durante a hidrólise, as bactérias transformam os substratos

orgânicos em monômeros e polímeros solúveis, isso é, as proteínas, os hidratos de carbono e as gorduras se transformam, respectivamente, em aminoácidos, monossacarídeos e ácidos graxos.

A velocidade de degradação dos materiais lignocelulósicos compostos principalmente por lignina, celulose e hemicelulose é tão lenta que costuma ser a etapa limitante do processo de hidrólise. Isto se deve a que a lignina é muito resistente à degradação por parte dos microrganismos anaeróbicos, afetando também à biodegradabilidade da celulose, da hemicelulose e de outros hidratos de carbono. A taxa de hidrólise geralmente aumenta com a temperatura e depende, também, do tamanho das partículas, devido principalmente à disponibilidade da superfície para a absorção das enzimas hidrolíticas. Os pré-tratamentos físico-químicos, cujo principal efeito é a redução do tamanho das partículas, produzem um aumento da taxa de hidrólise, e se esta fase é a limitante do processo anaeróbico, representa um benefício para o processo geral, produzindo menores tempos de retenção e reatores menores.

3.4.2. Fase Acidogênica

Durante esta ocorre a fermentação das moléculas orgânicas solúveis em compostos que podem ser utilizados diretamente pelas bactérias metanogênicas (acético, fórmico, H_2) e compostos orgânicos mais reduzidos (ácido propiônico, ácido valérico, ácido láctico e etanol, principalmente) que devem ser oxidados por bactérias acetogênicas na seguinte etapa do processo.

A formação de um ácido ou outro depende da concentração de H_2 no meio. Quando a concentração de H_2 no gás produzido é muito baixa (5 a 50 ppm), forma-se preferentemente ácido acético. Quando aumenta a concentração de H_2 , observa-se uma diminuição da concentração de acético e aumenta a fração de ácidos de cadeia mais longa como propiônico, butírico, etc.

Nesta fase também são produzidos álcoois. A cinética do processo é relativamente rápida, as bactérias produtoras de ácido são de crescimento rápido, já que tem um tempo mínimo de duplicação de 30 minutos. As bactérias implicadas são facultativas.

3.4.3. Fase Acetogênica

Na terceira etapa, conhecida como acetogênese, os demais produtos da acidogênese, isso é, o ácido propiônico, ácido butírico e álcoois, dentre outros, são transformados pelas bactérias acetogênicas em hidrogênio, dióxido de carbono e ácido acético (Figura 5). As moléculas orgânicas pequenas, sobretudo ácidos graxos voláteis (AGV), transformam-se em acético. O metabolismo destas bactérias está inibido por elevadas concentrações de hidrogênio. As bactérias responsáveis são facultativas e vivem uma estreita colaboração com as bactérias metanogênicas, só podem sobreviver em simbiose com o gênero que consome hidrogênio.

Estas bactérias têm um crescimento mais lento que as acidogênicas, sendo seu tempo mínimo de duplicação de 1,5 a 4 dias.

3.4.4. Fase Metanogênica

Constitui a etapa final do processo, na qual compostos como o ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono são transformados em CH_4 e CO_2 .

As bactérias implicadas constituem um único grupo composto por várias espécies de diferente forma e estrutura celular. São estritamente anaeróbicas. Encontram-se na natureza em organismos vivos (rúmen de ruminantes), e na ausência total de oxigênio. Distinguem-se dois tipos principais de microrganismos, os que degradam o ácido acético (bactérias metanogênicas acetoclásticas) e os que

consomem hidrogênio (bactérias metanogênicas hidrogenotróficas). A principal via de formação do metano é a primeira, com cerca de 70% do metano produzido.

As bactérias metanogênicas acetoclásticas produzem metano a partir de acetato. Têm um crescimento lento (tempo mínimo de duplicação de 2 a 3 dias) e não são afetadas pela concentração de hidrogênio no biogás.

As bactérias metanogênicas consumidoras de hidrogênio produzem metano a partir de hidrogênio e CO_2 . Esta reação tem uma função dupla no processo de digestão anaeróbica, por um lado se produz metano, e por outro se elimina o hidrogênio gasoso.

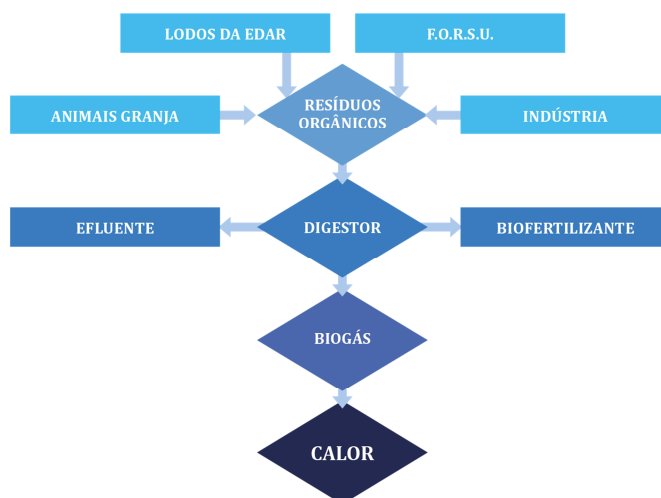
3.4.5. Formação de ácido sulfídrico

Além das bactérias descritas, também existem nos digestores anaeróbicos um grupo denominado sulfobactérias, que são especialmente importantes na presença de sulfatos (Espinosa-Chávez, 2007). As sulfobactérias são organismos capazes de reduzir os sulfatos a sulfuros. Sua importância é grande, porque podem competir com as metanobactérias reduzindo a formação de metano. Por outro lado, as sulfobactérias também são capazes de reduzir os sulfatos utilizando o hidrogênio produzido pelas bactérias formadoras de ácidos. Neste caso, o hidrogênio não pode ser utilizado pelas bactérias metanogênicas. Assim, é importante controlar a presença de sulfatos no meio já que, além de afetar as metanobactérias, a presença de ácido sulfídrico no biogás pode afetar, por sua corrosividade, o aproveitamento energético do biogás (Hidalgo e García, 2001).

3.5. Produtos Finais do processo de Digestão Anaeróbica

A digestão anaeróbica da matéria orgânica enseja dois subprodutos, um composto gasoso conhecido como biogás e um efluente estabilizado conhecido como digestores ou digerido.

A **Figura 6** apresenta um esquema das aplicações e os produtos que podem ser obtidos em um processo de digestão anaeróbica.



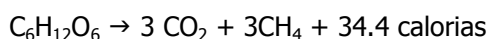
Fonte: Elaborado pelo autor a partir de informações coletadas.

Figura 6: Aplicações e produtos do processo de digestão anaeróbica.

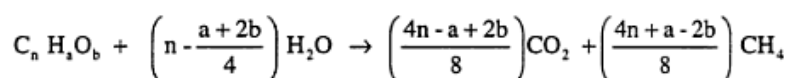
3.5.1. O Biogás

O denominado biogás é a mescla gasosa obtida da decomposição da matéria orgânica em condições anaeróbicas. Produz-se, portanto, como resultado da degradação da matéria orgânica na ausência de ar pela ação de microrganismos.

A equação global do processo poderia ser resumida com a seguinte equação:



A quantidade de biogás produzido em a digestão anaeróbica depende da composição do substrato. Compostos degradáveis simples podem ser determinados com uma boa aproximação à estequiometria :



Segundo esta equação, pode-se deduzir que por cada kg de DQO eliminada, isso é, para a degradação anaeróbica completa de 1kg de DOQ, teoricamente se obtém 0,35 m³ de metano, medidos em condições normais. Conhecendo a composição em volume de biogás, pode-se determinar o volume que será gerado (Marañón E., et al, 1998).

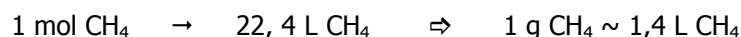
Quanto gás metano pode ser gerado através da degradação anaeróbica completa de 1kg de DQO em condições normais de pressão e temperatura?

1. Cálculo da DQO equivalente de metano:



2. Conversão da massa de metano no volume equivalente:

Considerando que 1 mol de um gás em condições normais de pressão e temperatura ocupa 22,4L



3. Geração de metano em função da DQO eliminada:



Isso é, a degradação completa de 1 kg de DQO produz 0,35 m³ de CH₄.

A produção total de biogás depende fundamentalmente da quantidade de alimento consumido pelas bactérias ou, dito de outra forma, da quantidade de substrato eliminado no processo. Este substrato costuma ser expressado pela demanda química de oxigênio (DQO) e pelos sólidos voláteis. A seguir são apresentadas tabelas de produção potencial de biogás a partir de distintos substratos.

A **Tabela 16** mostra valores de produção potencial de biogás a partir de diferentes resíduos em função do conteúdo em sólidos totais.

Tabela 16: Produção potencial de biogás a partir de distintos resíduos

Resíduo	Biogás Potencial (Nm ³ /t ST)	Riqueza em metano (%)
Resíduos Urbanos	400-700	60-65 (%)
Lodos ETAR	380-400	65-75
Chorume suíno	250-350	65-70
Lodos lácteos	950-1100	75
Lodos papelreira	180-210	55
Papel jornal	80-100	50
Palha de trigo	200-250	65

Fontes diversas: Kübler (1999), Abring (1992), Slessor e Lewis (1979), Flotats (2000), Mata (1999), etc.

Na **Tabela 17** se mostram valores de produção de biogás em função da quantidade de resíduo a digerir, bem como características para diferentes resíduos agroindustriais.

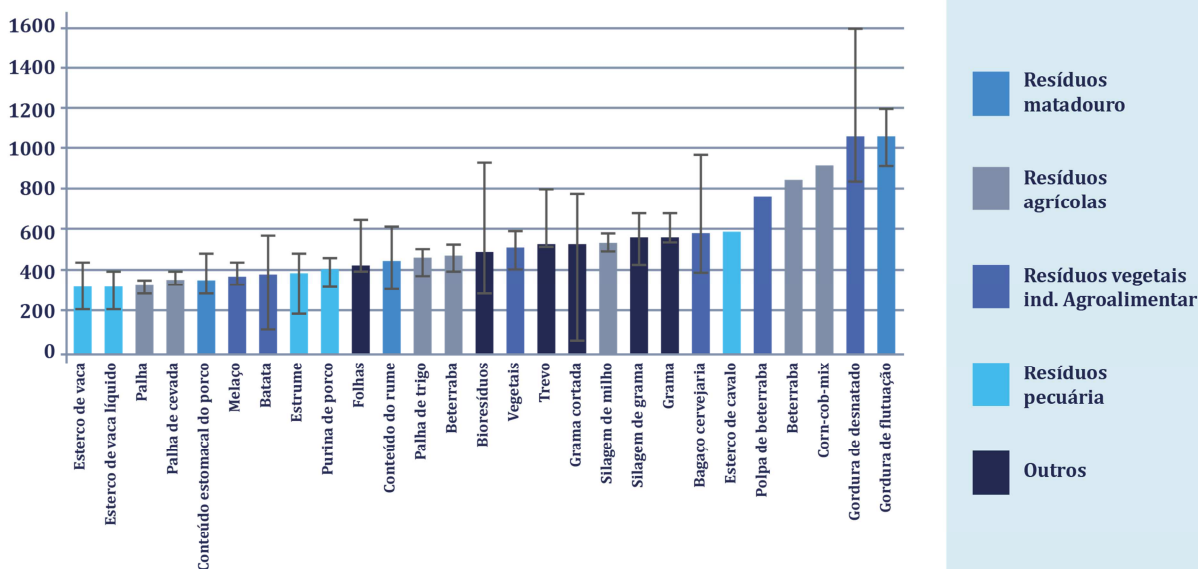
Tabela 17: Produção de biogás a partir de distintos resíduos agroindustriais

Tipo	Conteúdo orgânico	Sólidos Voláteis (%)	Produção de biogás (m ³ /t)
Intestinos + conteúdos	Hidratos de carbono, proteínas, lipídios	15-20	50-70
Óleos de peixe	30-50% lipídios	80-85	350-600
Soro	75-80% lactose, 20-25% proteínas	7-10	40-55
Soro concentrado	75-80% lactose, 20-25% proteínas	18-22	100-130
Hidrolisados de carne e ossos	70% proteínas, 30% lipídios	10-15	70-100
Marmeladas	90% açúcares, ácidos orgânicos	50	300
Óleo de soja/margarinas	90% óleos vegetais	90	800-1.000
Lodos residuais	Hidratos de carbono, lipídios e proteínas	3-4	17-22
Lodos residuais concentrados	Hidratos de carbono, lipídios e proteínas	15-20	85-110
FORSU separado na origem	Hidratos de carbono, lipídios e proteínas	20-30	150-240

Fonte: Angelidaki, I. e Ahring, B.K. 1997

Os potenciais de produção de biogás de alguns resíduos orgânicos da indústria alimentícia e da fração orgânica de resíduos urbanos são apresentados na **Figura 7**.

Produção de biogás (L/kg sv)



Fonte: Ainia, Probiogás 2010.

Figura 7: Potencial máximo de biogás de resíduos da indústria agroalimentar

Com relação à produção de biogás em Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR's), segundo Eckenfelder os valores máximos de produção de biogás por lodo da ETAR são: 1-1.25 m³/kg SV destruídos e 0.30-0.42 m³ CH₄/Kg DQO destruída. Também, a produção do biogás também pode ser estimada a partir de uma base per capita. Segundo Metcalf, o rendimento normal é de 15 a 22 m³/10³ hab.dia em depuradoras com tratamento primário. Em depuradoras com tratamento secundário a produção se incrementa a 28 m³/10³ hab.dia.

A **Tabela 18** mostra o potencial de produção de biogás de distintos resíduos pecuários em função do conteúdo de sólidos voláteis, bem como algumas características destes resíduos.

Tabela 18: Produção potencial de biogás de distintos resíduos pecuários em função do conteúdo em SV do resíduo e algumas características destes resíduos

Resíduo	ST (%)	SV (%)	C/N	Prod. biogás (m ³ kg ⁻¹ SV)	TRH (d)	CH ₄ (%)
Chorume suíno	3-8 ¹	70-80	3-10	0,25-0,50	20-40	70-80
Esterco	5-12 ¹	75-85	6-20 ²	0,20-0,30	20-30	55-75
Estrume	10-30 ¹	70-80	3-10	0,35-0,60	>30	60-80

¹ Segundo diluição ² Segundo presença de palha

Fonte: Steffen, R. et al (1998).

A **Tabela 19** mostra o potencial de produção de biogás de distintos resíduos pecuários e resíduos humanos em função da quantidade de resíduo tratado.

Tabela 19: Produção potencial de vários tipos de resíduos

Tipo de Resíduo	Produção de Biogás (m^3kg^{-1})
Esterco	0,023-0,04
Chorume suíno	0,04-0,059
Estrume	0,065-0,116
Humano	0,02-0,028

Fonte: Buxton and Brian (2010).

A composição do biogás e suas propriedades energéticas serão tratadas no capítulo 9.

3.5.2. Os Digestores

O processo de digestão anaeróbica produz um subproduto normalmente conhecido como digestor, ou também chamado biol em determinados países. É outro produto resultante da degradação anaeróbica e pode-se dizer que é a mistura do afluente estabilizado e da biomassa microbiana produzida. Para um mesmo resíduo o tipo de digestor e os parâmetros de operação utilizados determinam a qualidade do logo digerido com relação ao nível de contaminação e de organismos patogênicos. Como já se afirmou, durante o processo anaeróbico parte da matéria orgânica se transforma em metano, de modo que o conteúdo em matéria orgânica do digestor é menos do que no afluente. Segundo Lindemeyer (2008), a redução da relação C/N é benéfica quando o produto final é para fins agrícolas. As características de um digestor tipo são apresentadas na **Tabela 20**.

Tabela 20: Características de um digestor tipo.

Parâmetro	Digestores tipo
Sólidos Totais	6%
Sólidos voláteis	69%
pH	7,6 – 8,8
C/N	1,5/1
Nitrogênio	15%
Potássio	4,70%
Fósforo	0,70%
Cálcio	0,34%
Enxofre	0,30%
Magnésio	0,19%

Fonte: WRAP, 2013.

Existem diferentes estratégias de gestão do digestor e a adequação destas está condicionada às características do meio, aos objetivos propostos e à escala do tratamento. A avaliação agrícola dos digeridos se foca fundamentalmente em dois aspectos: a utilização direta do digerido como fertilizante e a separação sólido-líquido, com utilização da fração sólida para a preparação de adubos de alto valor agregado mediante compostagem e o uso da fração líquida como fertilizante líquido (Bernal, et al. 2010).

a) Uso do digestor como fertilizante

Na utilização direta dos digeridos na agricultura, deve-se considerar uma opção de avaliação destes subprodutos obtendo um benefício para o solo e os cultivos. Neste sentido, é necessário que exista um equilíbrio entre as necessidades das plantações e da produção atual de digeridos produzidos nos processos de digestão anaeróbica de resíduos e subprodutos pecuários e agroindustriais. A

quantidade de digestores deve ser determinada em função de parâmetros como: estabilidade, nível de higienização, presença de compostos contaminantes e impurezas, bem como do conteúdo de nutrientes e de matéria orgânica.

b) Gestão independente da fração sólida e da fração líquida, Separação sólido-líquido

O processo de separação de fases permite dividir o digerido em duas frações diferentes, uma sólida (digestor sólido), com um conteúdo em sólidos superior ao do digestor original, e uma líquida (digestor líquido), que contém elementos dissolvidos e em suspensão. A separação sólido-líquido não muda o conteúdo de componentes presentes no digestor, mas com este tratamento físico se consegue uma redistribuição dos constituintes e, portanto, melhora a capacidade de gestão das fases obtidas. Deste modo, o uso de diferentes linhas de tratamento, transporte e aplicação ao solo é favorecido para cada uma das duas fases obtidas (Bernal, et al., 2010).

Existem diferentes sistemas de separação:

- A decantação natural: é a opção mais econômica para separar as partículas em suspensão, mas que só deve ser considerada quando as exigências de separação sejam baixas.
- Os sistemas mecânicos de separação: que se classificam dependendo do tipo de força utilizado no processo em sistemas por gravidade, compressão ou centrifugação.

3.6. Fatores que influenciam na operação e controle dos processos anaeróbicos

O objetivo básico do digestor é manter a maior atividade bacteriana possível. A quantidade de microrganismos retidos depende da configuração e desenho do digestor. O estado em que se encontrem e conseguir uma flora equilibrada é função dos parâmetros de operação. Para que o processo se realize com a máxima eficácia deve-se conseguir: manter a máxima atividade dos microrganismos, manter uma concentração mínima e produtos intermediários e aumentar a velocidade da etapa que limite globalmente o processo.

A) Manter a máxima atividade dos microrganismos

Para tanto é necessário controlar tanto o tempo de retenção de lodo, já que se os digestores operam com concentrações muito elevadas de biomassa bacteriana ativa conseguem-se melhores condições de estabilidade, quanto os parâmetros físico-químicos, como pH, potencial redox, temperatura, nutrientes e toxicidade. As condições mais adequadas nos processos anaeróbicos são:

3.6.1. Fase de arranque. Inoculo inicial

Para alguns substratos orgânicos que carecem de microrganismos adequados, como é o caso de algumas águas industriais, é necessário contar com um inoculo de bactérias anaeróbicas que realize a degradação. Por outro lado, a baixa velocidade de crescimento dos microrganismos torna necessário utilizar um inoculo inicial que aporte a quantidade suficiente de bactérias.

Os inoculos mais utilizados são os procedentes de outro digestor, já que a utilização de microrganismos comerciais liofilizados não se impõe (Fernández-Polanco e García, 2000). Por sua maior abundância, utilizam-se como inoculos lodos de digestores anaeróbicos que tratam resíduos urbanos e/ou resíduos pecuários e, em algumas ocasiões, também são utilizados lodos de reatores anaeróbicos industriais. Os microrganismos presentes no inoculo devem aclimatar-se às novas

condições de operação e ao novo meio. Uma concentração inicial de inoculo de 5% costuma ser suficiente para conseguir a atividade da primeira etapa do processo anaeróbico (Balaza et al., 2003).

O funcionamento do digestor requer a utilização inicial de velocidades de carga orgânica moderadas e o controle constante dos parâmetros de operação. Os digestores que foram arrancados lentamente oferecem a longo prazo uma maior estabilidade. Os tempos de arranque habituais flutuam entre 1 e 4 meses, dependendo do substrato e da tecnologia utilizada, como se verá no seguinte capítulo.

3.6.2. pH

É um parâmetro importante na digestão anaeróbica. Os diferentes grupos bacterianos presentes no processo apresentam níveis de atividade ideais de neutralidade, dentre os seguintes valores:

- Bactérias fermentativas: entre 7,2 e 7,4
- Bactérias acetogênicas: entre 6,0 e 6,2
- Bactérias metanogênicas: entre 6,5 e 7,5

Para que o processo se desenvolva satisfatoriamente, o pH não deve ser menor do que 6,0, nem maior do que 8,3 (Banaza et al., 2003). Se o pH do meio é inferior a 6,5, reduz-se a atividade das bactérias metanogênicas acetoclásticas, enquanto que a um pH inferior a 5,5, sua atividade cessa completamente. Abaixo de 4,5 detém-se a atividade de todos os microrganismos implicados (Lema e Méndez, 1997). Para que todo o processo anaeróbico se desenvolva adequadamente em um único digestor, o pH deve possuir um valor próximo a 7, deve manter-se entre 6,6-7,6 (Rittmann e McCarty, 2001). Uma das dificuldades é a manutenção do pH acima de 6,6. Os ácidos orgânicos são produtos intermediários produzidos pelos microrganismos. A presença de uma concentração muito alta de ácidos orgânicos reduz o pH, a produção de metano, e pode causar a acidificação ou parada do digestor (Rittmann e McCarty, 2001).

O valor do pH não só determina a produção de biogás, mas também sua composição. Uma das consequências do descenso do pH a valores inferiores a 6 é que o biogás gerado seja pobre em metano e, portanto, possua menos qualidades energéticas.

3.6.3. Alcalinidade

Define-se como a capacidade do meio para neutralizar o ácido, isso é, é uma medida da capacidade de tampão do meio (Rittman e MacCarty, 2001). Manter um valor ideal de alcalinidade no digestor é muito importante, pois amortiza (ou tampa) as repentinas mudanças de pH produzidas pela geração de ácidos graxos voláteis. Requer-se uma alcalinidade do bicarbonato de, pelo menos, 500-900 mg/l de CaCO_3 para um pH maior do que 6,5 (Rowse, 2011). A cal, o hidróxido de sódio, e o amoníaco são três dos produtos químicos baratos disponíveis para a adição de alcalinidade. Outros autores recomendam que o valor de alcalinidade do bicarbonato esteja compreendido entre 1.500 e 5.000 mg/l CaCO_3 . Ademais, dentre os já citados, também é possível adicionar, para manter e/ou aumentar a alcalinidade, reativos como o carbonato cálcico ou o bicarbonato sódico. Estudos prévios demonstraram que valores da alcalinidade do bicarbonato acima de 2500 mg/l garantem um bom controle do pH e uma adequada estabilidade do sistema. A concentração de ácidos voláteis sob condições estáveis costuma estar entre 50 e 100 mg/l. Quando se mantém uma relação constante de ácidos voláteis/alcalinidade $< 0,25$, assegura-se a capacidade tampão do sistema (Water Environmental Federation, 1998) (Energia da Biomassa, 2010). A dissolução de CO_2 também permite aumentar a alcalinidade original do afluente, de modo que a recirculação de parte do efluente torna possível o tratamento sem precisar agregar reativos.

3.6.4. Ácidos graxos voláteis

Este parâmetro é de controle específico dos digestores anaeróbicos. Os ácidos graxos voláteis (AGV ou VFA siglas em inglês) a considerar são: fórmico, acético, propiônico e valérico, ainda que os dois mais abundantes sejam o acético e o propiônico. A acumulação de AGV no digestor é um sintoma de desestabilização causada pela dissociação das reações de produção e eliminação destes compostos. Os AGV atuam como inibidores do processo anaeróbico. Em um digestor maduro e estável, a concentração de AGV é inferior a 500 mg/l. A inibição não é alcançada até valores próximos a 5.000 mg/l.

3.6.5. Potencial redox

Por serem as bactérias metanogênicas anaeróbicas estritas, sua tolerância às mudanças no potencial redox é menor do que a de outras espécies implicadas. Em cultivos puros as bactérias metanogênicas requerem um potencial redox dentre -300 mV e -320 mV para assegurar o ambiente fortemente redutor que estas bactérias necessitam para sua atividade ideal. Dirasian realizou estudos do processo de digestão medindo continuamente o potencial redox em um digestor. A partir desta pesquisa, chegou-se às conclusões apresentadas na **Tabela 21** (Montes, 2008).

Tabela 21: Potencial Redox e Digestão

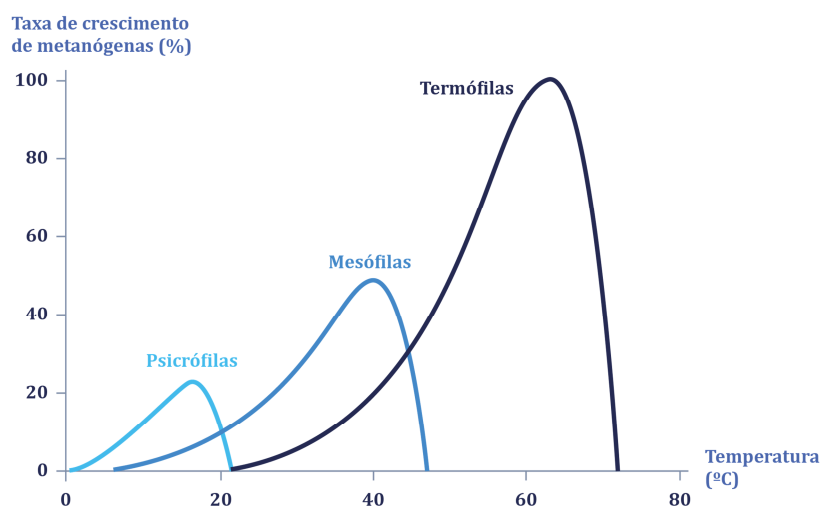
Potencial (mV)	Digestão
-520 a -530	Ideal
-510 a -540	Boa
-495 a -555	Limites admissíveis
Fora do limite anterior	Não possível

Fonte: Montes, 2008.

3.6.6. Temperatura

A temperatura é um parâmetro muito importante. Como regra geral, a taxa de crescimento de bactérias se duplica a cada aumento de 10°C em uma gama de temperatura que varia conforme as espécies bacterianas. Os microrganismos metanogênicos são extremamente sensíveis à temperatura. Existem três gamas de temperatura: psicrófilo (5-20°C), mesófilo (25-45°C, sendo o ideal de 35-37°C, acima de 40°C pode ocorrer a desnaturalização das enzimas) e termófilo (45-65°C, sendo o ideal de 50-60°C) (**Figura 8**). Esta última gama se divide, por sua vez, em termotolerantes (cerca de 50°C, mas também podem viver a 35°C) e estritos (>45°C).

As taxas específicas de produção de metano são de 50 a 100% mais altas para a digestão anaeróbica termófila do que para a digestão anaeróbica mesófila (Rittmann e McCarty, 2001).



Fonte: Van Lier, 1993.

Figura 8: Efeito da temperatura na atividade anaeróbica (Van Lier, 1993)

Até o momento a gama psicrófila foi pouco estudada e, geralmente, concebe-se como pouco viável devido a que seria necessário fazer digestores de grande tamanho. No entanto, apresenta menos problemas de estabilidade do que as outras gamas de temperatura. A gama mais utilizada e a mesófica, ainda que atualmente esteja sendo cada vez mais utilizada a gama termófila para conseguir uma maior velocidade do processo e uma melhor eliminação de organismos patógenos. No entanto, a gama termófila costuma ser mais instável a qualquer mudança das condições de operação e apresenta também maiores problemas de inibição do processo pela maior toxicidade de determinados compostos a elevadas temperaturas, como o nitrogênio amoniacal ou os ácidos graxos de cadeia longa.

3.6.7. Nutrientes

Uma das vantagens inerentes ao processo de digestão anaeróbica, frente aos processos aeróbicos, é sua baixa necessidade de nutrientes derivada de seus baixos índices de produção de biomassa apresentados pelos microrganismos anaeróbicos. Os principais nutrientes necessários para o crescimento dos microrganismos são o carbono, o nitrogênio e o fósforo, e uma série de elementos minerais como enxofre, potássio, sódio, cálcio, magnésio e ferro que devem estar presentes a baixas concentrações.

O **carbono** é a principal fonte de alimentação das bactérias e componente principal do biogás. Procede especialmente dos hidratos de carbono contidos na biomassa (celulose e açúcares), que serão posteriormente degradados pelos microrganismos para seu crescimento. O problema se apresenta quando se combinam biomassa com lignina, já que não é digerida com facilidade, como poderia ser a celulose, já que este composto é escassamente atacável pelos microrganismos (apesar de ser também uma fonte de carbono), por esse motivo o período fermentativo teria que ser mais longo.

O **nitrogênio**, é uma fonte importante para a síntese de proteínas dos organismos vivos. A deficiência de nitrogênio não permite que as bactérias metabolizem todo o carbono presente, o que representa uma perda na eficácia da degradação. Por outro lado, um excesso de nitrogênio, por não poder ser utilizado totalmente, faz com que se acumule no meio, geralmente em forma de NH_3 (amoníaco), o que provoca uma redução de bactérias ou a inibição de seu crescimento, especialmente das metanogênicas.

Conforme comentado, a relação C/N é um índice significativo referente à capacidade de digestão e ao rendimento potencial da biomassa. Seu valor varia em função da qualidade ou origem do substrato da biomassa. Conforme visto na seção 2.1, o valor ideal está compreendido entre 20 e 30. A **Tabela 22** mostra os valores deste parâmetro para distintos resíduos.

Tabela 22: Relação C/N para diferentes substratos

Substrato	Relação C/N
Chorume suíno	18-20
Chorume bovino	15-24
Estrume	15
Resíduos de matadouro	2-8
Resíduos de cozinha	25
Resíduos de frutas	35
Lodos de depuradora	16
Peles de batata	25
Cevada, arroz, trigo	60-90

Fonte: Flotats, 2008.

Diversos autores estudaram a relação necessária entre os nutrientes principais, considerando adequado para a relação C/N um valor entre 15-30/1. No caso do **fósforo**, a relação C/P é de entre 75-113/1 e com relação ao nitrogênio se admite uma relação de 1/5 a 1/7.

Ademais, como valores orientativos podem ser indicados os seguintes (Fernández-Polanco e García 2000):

Tratamentos aeróbicos: $DBO_5/N/P = 100/5/1$

Tratamentos anaeróbicos: $DBO_5/N/P = 100/0,5/0,1$

As necessidades de **enxofre** são menores do que as do fósforo, a maior parte da biomassa contém quantidade suficiente. Mas um excesso de enxofre pode favorecer o desenvolvimento das sulfobactérias, que convertem os compostos de enxofre em sulfureto de hidrogênio (H_2S), gás tóxico e com mal cheiro, e produzir graves problemas de corrosão quando o biogás é queimado.

De modo geral, as águas procedentes da indústria agroalimentar, resíduos pecuários, lodos de depuradora de águas residuais urbanas ou a fração orgânica dos resíduos urbanos carecem da adição destes nutrientes em sistemas anaeróbicos. Algumas águas são deficitárias em algum destes nutrientes, principalmente fósforo, que deve ser adicionado ao tratamento. Esta circunstancia tem uma incidência econômica significativa, já que o fósforo solúvel é caro. Em alguma ocasião também podem ser necessários outros nutrientes (oligoelementos) como ferro, níquel, cobalto o molibdênio. Observou-se que a adição destes elementos em concentrações de 50 a 100 nM tem um efeito positivo na conversão do ácido acético (Sarasa, 2010).

3.6.8. Toxicidade e inibição

Conforme já visto, os principais indicadores que apresentam inibição no processo são:

- Diminuição na produção de metano
- Aumento da concentração de AGV no meio

O processo de digestão anaeróbica pode ser inibido pela presença de tóxicos no sistema e afetar o desenvolvimento da atividade bacteriana. Por outro lado, uma substancia pode ser considerada tóxica dependendo de sua concentração. A temperatura também desempenha um importante papel no efeito tóxico de determinados compostos (amônio, sulfureto, ácidos graxos voláteis, etc.). As

bactérias metanogênicas são geralmente as mais sensíveis, ainda que geralmente todos os grupos de microrganismos que participam no processo sejam afetados.

As mais importantes são:

- *Substâncias geradas como produtos intermediários: H_2 , AGV, H_2S , etc.* Um elevado nível de H_2 é capaz de bloquear a marcha da reação. Os AGV podem provocar uma redução do pH, enquanto a presença de H_2S , gerado a partir dos sulfatos contidos na alimentação, tem efeitos inibidores.
- *Substâncias que entram no digestor de forma acidental: O_2 e tóxicos.* Para evitar a entrada de oxigênio, os digestores trabalham com uma ligeira sobre-pressão. A entrada massiva de oxigênio por causas acidentais inibe o processo, que se recupera sem dificuldades quando se elimina o oxigênio, por extração com um gás, ou por ação de microrganismos facultativos.
- *Substâncias que acompanham a alimentação: antibióticos, metais.*

Além dos comentados, os principais compostos tóxicos são os seguintes:

- cátions de metais alcalinos e alcalino-terrosos
- amoníaco e amônio (em função do pH)
- metais pesados
- compostos com ligações carbono-carbono insaturadas
- compostos clorados
- cianetos

Nas **Tabelas 23 e 24** mostra-se o efeito da concentração de amoníaco e as concentrações estimulantes e inibidoras de alguns cátions no processo anaeróbico, respectivamente.

Tabela 23: Efeito da concentração de nitrogênio amoniacal em digestores anaeróbicos

Concentração de amoníaco (mg N/l)	Efeito
50 a 200	Benéfico
200 a 1000	Sem efeitos adversos
1500 a 3000	Inibidor a pH entre 7,4 e 7,6
>3000	Tóxico

Fonte: Water Environment Federation, 1996.

Tabela 24: Concentrações estimulantes e inibidoras de cátions

Cátion	Estimulantes	Concentração (mg/l)	
		Inibidor moderado	Forte inibidor
Cálcio	100 a 200	2.500 a 4.500	8.000
Magnésio	75 a 150	1.000 a 1.500	3.000
Potássio	200 a 400	2.500 a 4.500	12.000
Sódio	100 a 200	3.500 a 5.500	8.000

Fonte: Water Environment Federation, 1996, 1998.

A **Tabela 25** apresenta alguns inibidores comuns (Varnero, 2011), no entanto estes valores são orientativos, porque as bactérias têm a capacidade de adaptar-se a condições que a princípio as afetavam notavelmente.

Tabela 25: Inibidores mais comuns no processo microbiológico da digestão

Inibidores	Concentração inibidora
SO₄⁼	5000 ppm
NaCl	40.000 ppm
Nitrato (segundo o conteúdo de nitrogênio)	0,05 mg/ml
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200 - 500 mg/l
ABS (detergente sintético)	20 - 40 mg/l
Na	3.500 - 5.500 mg/l
K	2.500 - 4.500 mg/l
Ca	2.500 - 4.500 mg/l
Mg	1.000 - 1.500 mg/l

Fonte: Gene e Owen, 1986.

B) Manter uma concentração mínima de produtos intermediários.

A concentração de produtos intermediários é um indicador do equilíbrio existente entre os microrganismos implicados nas diferentes fases do processo. Para manter baixa a concentração destes compostos intermediários os seguintes fatores devem ser considerados: a homogeneização da mescla, o tempo de residência hidráulico, o tempo de retenção de sólidos, a velocidade de carga orgânica e a produção e composição do biogás.

3.6.9. Homogeneização

A homogeneização é outro parâmetro importante a considerar no desenho de um digestor anaeróbico. A homogeneização aumenta a cinética da velocidade de digestão anaeróbica, acelerando o processo de conversão biológica. Ademais, permite um aquecimento uniforme da mescla do digestor (Tchobanoglous et al., 2003).

Os objetivos perseguidos com uma homogeneização adequada é misturar o meio para conseguir valores uniformes de concentração e temperatura; facilitar os processos de transferência de matéria, já que as moléculas de substrato devem ser absorvidas pela superfície dos microrganismos e os produtos intermediários e finais devem ser transportados; e prevenir áreas mortas, impedindo que parte do substrato original deixe o digestor sem entrar em contato com os microrganismos.

Uma boa mescla é conseguida através da agitação mecânica com rotores convencionais imersos no digestor girando a baixa velocidade, pela recirculação do biogás através de injetores, na parte inferior do digestor (Tchobanoglous et al., 2003) ou pela recirculação do efluentes, pela parte inferior. Para digestores grandes, a agitação por gás apresenta mais vantagens (Baraza et al., 2003).

3.6.10. Tempo de residência hidráulico

O tempo de residência hidráulico (TRH ou HRT, siglas em inglês) é o tempo que o afluente permanece no digestor submetido à ação dos microrganismos. Define-se como o quociente entre o volume do digestor e o volume diário de carga, velocidade volumétrica de fluxo ou vazão. A definição numérica é: $TRH = V/Q$

Onde: TRH = tempo de retenção hidráulico (d)
V = volume de reator (m³)

$$Q = \text{vazão afluyente (m}^3/\text{d)}$$

É o parâmetro que nos permite controlar a vazão do efluente tratado. É fundamental determinar o tempo ideal. Se ocorre a acumulação de produtos intermediários, como a alimentação de substrato é maior do que a de sua degradação, é conveniente reduzir o tempo de resistência apropriadamente.

O tempo de retenção hidráulico é importante para o funcionamento e o desenho do digestor porque define o período de tempo em que o substrato e em particular os constituintes específicos, estarão em contato com a biomassa dentro do reator para sua degradação. A metanogênese e a hidrólise são as cinéticas limitantes da velocidade na digestão anaeróbica (Khanal, 2009). Normalmente, a metanogênese é a velocidade limitante do processo. É importante para o desenho de digestores considerar tempos de retenção suficientemente largos para que ocorra a degradação dos sólidos voláteis (Vesilind, 1998).

A quantidade de matéria orgânica degradada aumenta ao aumentar o TRH, enquanto a produção volumétrica de metano (produção por unidade de volume do digestor) diminui uma vez superado o ideal. Portanto, é necessário determinar, para cada tipo de resíduo e de digestor, o tempo de retenção que otimiza o processo.

Os TRH se relacionam com dois fatores, o tipo de substrato e a temperatura do mesmo. A escolha de uma gama de temperaturas mais altas levaria a uma redução nos tempos de retenção requeridos e, portanto, serão menores os volumes de digestor necessários para um determinado volume de material.

A **Tabela 26** mostra valores de TRH para diferentes resíduos animais.

Tabela 26: Valores de TRH para diferentes resíduos animais

Matéria Prima	TRH
Esterco bovino líquido	20-30 dias
Esterco suíno líquido	15-25 dias
Esterco de ave líquido	20-40 dias

Fonte: Instituto de Engenharia rural. I.N.T.A.- Castelar (Dela Torre, 2008)

Como já se afirmou, a temperatura afeta o processo da digestão anaeróbica. Existem diferentes etapas do processo microbiológico afetadas diretamente pela temperatura e inversamente pelo TRH, como mostra a **Tabela 27**.

Tabela 27: Gamas de Temperaturas e de Tempos de retenção na fermentação anaeróbica

Fermentação	Gama de Temperatura			TRH (dias)
	Mínimo	ideal	Máximo	
Psicrofílica	4-10	15-18	25-30	>100
Mesofílica	25-20	28-33	35-45	30-60
Termofílica	25-45	50-60	75-80	10-16

Fonte: Instituto de Investigación Suína, 2003 (De a Torre, 2008)

3.6.11. Tempo de Retenção de Sólidos (TRS)

O tempo de retenção de sólidos (TRS ou SRT, siglas em inglês), é definido como "a massa de microrganismos no digestor dividida pela massa de microrganismos eliminada do sistema a cada dia" (Rittmann e McCarty, 2001).

É importante controlar o TRS já que quando é muito curto, produz-se uma lavagem de microrganismos. Quando, do contrario, é muito longo, pode acontecer que o sistema seja limitado pelos nutrientes. O TRS faz com que os microrganismos tenham condições ideais de crescimento dentro do digestor, e muda a ecologia microbiana do sistema. O TRS é igual ao TRH quando não ocorre a reciclagem de sólidos (Vesilind, 1998). Aumentando o TRS, aumentam-se as reações implicadas na digestão anaeróbica (Vesilind, 1998). Um TRS mais longo estabiliza o processo, reduz a quantidade de lodos produzidos e aumenta a produção de biogás (Rittmann e McCarty, 2001).

3.6.12. Velocidade de carga orgânica (VCO)

A Velocidade de carga orgânica ou Taxa de carga orgânica (OLR, siglas em inglês) define-se como a massa de sólidos voláteis adicionada todos os dias por volume de digestor (Vesilind, 1998) ou a quantidade de DBO ou DQO aplicada ao volume do digestor por dia (Tchobanoglous et al., 2003). A taxa de carga orgânica se relaciona com o tempo de retenção hidráulica pela seguinte equação:

$$OLR = (Q) (C_{VS}) / V_{dig} = C_{VS} / TRH$$

Onde: OLR = velocidade de carga orgânica
Q = vazão (m³/d)
C_{VS} = concentração de sólidos voláteis (kg SV/m³)
V_{dig} = volume do digestor (m³)
TRH = tempo de retenção hidráulica.

No caso de não recirculação, TRH = TRS e então: OLR = C_{VS} / TRS

OLR depende, portanto, da composição do resíduo e do tempo de residência. É um dos parâmetros mais utilizados para caracterizar a capacidade de tratamento dos digestores anaeróbicos. Como base são considerados indistintamente o volume do digestor ou a quantidade de biomassa, de modo que as unidades resultam ser: kg DQO/m³.dia; kg DQO/kg biomassa.dia ou kg DQO/kg SSV.dia.

A velocidade de carga orgânica não pode ser considerada em valor absoluto, mas com relação à carga orgânica de afluente (kg DQO/m³). Ambas estão relacionadas através do tempo de residência hidráulico.

$$\frac{\text{kg DQO/m}^3_{\text{digestor}} \cdot \text{dia}}{\text{kg DQO/m}^3_{\text{afluente}}} = \frac{\text{m}^3_{\text{afluente}}}{\text{m}^3_{\text{digestor}} \cdot \text{dia}} = \frac{Q}{V} = \frac{1}{TRH}$$

A cada digestor e afluente corresponde um valor máximo da velocidade de carga orgânica. Quando ultrapassado, o digestor perde estabilidade e reduz o rendimento da depuração. Este parâmetro tem grande importância, já que para um grande numero de águas residuais o fator determinante do tamanho do digestor é a velocidade de carga orgânica admissível.

Segundo Rittmann e McCarty (2001), a taxa de carga orgânica recomendada para a digestão anaeróbica de alta velocidade é de 1,6 a 4,8 kg SSV/(m³.d), e a taxa de carga orgânica recomendada para a digestão anaeróbica de baixa velocidade (digestão sem calor e sem mistura) é de 0,5 a 1,6 kg (dVSS)/(m³.d). Speece (1996) aconselha velocidades de carga orgânica de 5 a 10 kg SSV/(m³.d). Vesilind (1998) recomenda que a velocidade de carga orgânica pico para a digestão anaeróbica de alta taxa deve ser de 1,9 a 2.5 kg SV/(m³.d).

Se a taxa de carga na digestão anaeróbica é muito alta para as condições do sistema, as duas vias de metanogênese podem ser inibidas, o que pode resultar na acumulação de ácidos graxos voláteis no digestor. A presença de AGV reduz o pH no digestor e pode conduzir à acidificação ou parada do mesmo. Portanto, é muito importante que a velocidade de carga orgânica de desenho seja conservadora.

3.6.13. Produção e composição do biogás

A velocidade de produção do biogás pode ser utilizada não apenas como parâmetro de controle, mas também como variável para estabelecer a estabilidade do digestor. Variações de produção de CO₂ no biogás são sintomas de variações de comportamento do digestor, e a persistência da variação é sintoma claro de instabilidade. Como é um parâmetro de resposta rápida e de fácil análise, a porcentagem de CO₂ pode ser interpretada como índice de estabilidade.

C) Aumentar a velocidade da etapa que limita globalmente o processo.

A etapa controladora da degradação anaeróbica corresponde às bactérias metanogênicas. Esta possibilidade pode ser conseguida com uma separação de fases, favorecendo a cada uma de maneira independente. A separação de fases refere-se a manutenção dos digestores em série, realizando-se a fase de hidrólise e acidogênese no primeiro e a metanogênese no segundo. Seu objetivo é conseguir um tempo de retenção global inferior ao correspondente a um único digestor. A separação é de tipo cinético, controlando o tempo de retenção de cada digestor que será inferior no primeiro, devido as mais taxas de crescimento das bactérias acidogênicas. Este tipo de sistema foi aplicado com sucesso na digestão de resíduos com alta concentração de açúcares e baixo conteúdo de sólidos, mas não para resíduos fibras e, geralmente, substratos complexos cujo limitante é a hidrólise. Esta tecnologia será abordada no próximo capítulo. A **Tabela 28** apresenta os requisitos de um processo de produção de biogás em duas fases.

Tabela 28: Requisitos das fases hidrólise/acidificação e metanogênese

Medida variável	Hidrólise/Acidificação	Metanogênese
Temperatura	25-35°C	Mesofílico: 32-42°C Termofílico: 50-58°C
pH	5,2-6,3	6,7-7,5
Relação C/N	10-45	20-30
Conteúdo em sólidos	<40% M.S.	<30% M.S.
Potencial Redox	+400 -300 mV	<-250 mV
Demanda de nutrientes (C, N, P, S)	500:15:5:3	600:15:5:3
Oligoelementos	Não há requisitos específicos	Essencial: Ni, Co, Mo, Se

Fonte: MAGRAMA, 2010.

Como síntese, a **Tabela 29** resume a informação e as gamas dos principais parâmetros de operação da digestão anaeróbica.

Tabela 29: Parâmetros de operação da Digestão Anaeróbica

Parâmetro	Rango	Informação
Temperatura	35-40°C Mesofílico 50-60°C Termofílico	O extremo superior da gama mesófila é ideal para a produção máxima de biogás
pH	6,5-7,6	O pH ideal é neutro a 7,0. Auto-regulável por micróbios anaeróbicos; os metanógenos têm pouca probabilidade de crescer com pH <6,5
Alcalinidade	1 g/l	Auto-regulação por hidrogênio na conversão do resíduo a bicarbonato
Acidez/Alcalinidade	0,3 a 0,5	Mais fácil de medir do que AGV ou alcalinidade
AGV	<0,013 oz/galão	Concentrações mais altas inibirão o acetato e a produção de biogás
C/N	20 a 30	Relações mais altas de C/N levam a um consumo de nitrogênio pelas metanogênicas; diminui a produção de biogás.
Carga orgânica	Taxa de 3-5 kg de sólidos voláteis por metro cúbico de volume de digestor e dia	Os microrganismos geralmente se inibem quando a taxa de carga excede 6,4 kg/m ³ dia
TRH	9 – 95 dias	Varia muito em função do substrato, a temperatura e o desenho do sistema

Fonte: EPA, 2010; NREL, 2013).

3.7. A Digestão Anaeróbia nos SIDS

A digestão anaeróbica tem sido amplamente pesquisada tanto pela sua produção de energia como pelo seu potencial de gerenciamento de resíduos e, como será visto nas próximas seções, foi implementada em muitos países. Atualmente existem milhões de digestores em operação no mundo, o que mostra que é uma tecnologia madura, embora o processo ainda esteja sendo pesquisado de forma a obter o melhor projeto possível em cada caso e assim obter o máximo retorno energético, ambiental e econômico.

Em princípio, a digestão anaeróbica é uma tecnologia simples. Nenhum conhecimento específico é necessário para gerar o biogás, qualquer um pode produzi-lo, basta colocar a matéria orgânica biodegradável em condições anaeróbicas (ausência de oxigênio) para obtê-lo depois de um tempo. No entanto, apesar de sua simplicidade, o treinamento é necessário para que o processo ocorra de forma otimizada e eficiente. Experiências foram realizadas em alguns SIDS, como será visto abaixo, e nem sempre com bons resultados. Isto pode ser devido à falta de conhecimento, capacidade e experiência das pessoas que gerenciaram os digestores (UNEP, 1998). Um grande problema nos SIDS é a falta de pessoal devidamente treinado. Para que essas plantas de biogás sejam bem-sucedidas, um dos fatores limitantes básicos é o gerenciamento correto da tecnologia pelas comunidades onde elas são implementadas (Gómez et al., 2010), o que é um desafio para o futuro próximo em o caso da adoção de tecnologias de gerenciamento de resíduos, como a digestão anaeróbica. O treinamento é, portanto, de extrema importância e os especialistas devem ser recrutados para ajudar no treinamento dos locais para lidar com qualquer tecnologia de gerenciamento de resíduos, como a digestão anaeróbica.

Esta tecnologia foi introduzida nos SIDS do Caribe na década de 1980 pela Deutsch Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Sociedade Alemã para a Cooperação Técnica) (Consigny et al., 2005). Na Jamaica, 89 unidades de biogás foram construídos a partir de 1988 a 1992, mas 15 destas plantas

foram eliminados e, desde 1993, começou uma outra fase de construção de plantas de biogás onde 120 unidades foram construídos (Kranert et al, 2012 citado por Mohee et al, 2015). Em Cuba, digestão anaeróbia foi introduzida nos anos 1940 e conta actualmente com cerca de 700 unidades de biogás (Kranert et al., 2012 citado por Mohee et al, 2015). Também em 2009, um biodigestor de polietileno de baixo custo foi instalado em Belmonte (Belize) para a produção de biogás a partir de resíduos animais (UCA, 2009 citado por Mohee et al, 2015). Na República Dominicana, Brugal tem digestores de 1,93 milhões de galões para tratar vinhaça e usa o biogás em uma de suas duas caldeiras (Del Toro, 2001). Além disso, através da Iniciativa Global de Metano (Eastern Research Group Inc. e Tetra Tech 2011 citado por Mohee et al, 2015), está siendo investigado o potencial de capturar as emissões de metano a partir de resíduos agrícolas e pecuárias para uso como um combustível renovável. No Haiti, a digestão anaeróbia é usado para o tratamento de resíduos agrícolas, resíduos animais e águas residuais domésticas para produção de biogás (Faculdade de Agricultura e Recursos Naturais, 2015; Toussaint e Wilkie, 2011). Em Porto Rico, a Bacardi tem digestores anaeróbios com o que evita as muitas emissões de gases de efeito estufa e, ao mesmo tempo, usa o biogás na caldeira; Também em Yauco foi planteada a construção de uma planta de biogás que será alimentada com resíduos de alimentos de residências e cantinas escolares (Figuerola, 2015). Uma instalação de biomassa/biogás foi desenvolvida nas Ilhas Virgens dos Estados Unidos para a produção de biogás da Giant King Grass (Tibbar Construction Services Inc., 2014).

Nos SIDS do Pacífico, a situação não é diferente. Em Samoa, por exemplo, plantas de biogás foram construídas nos anos 80, mas depois foram gradualmente eliminados (Isaka et al., 2013). Em 2005-2006, plantas de biogás foram construídas em grande escala, mas também eram ineficazes (Isaka et al., 2013). Mais recentemente, no âmbito do Projecto de Redução de gases de efeito estufa através de energia renovável (PIGGAREP), esperava-se que a construção de duas plantas de biogás estariam prontos e operacionais em setembro de 2014 (PNUD, 2014). Em Fiji, existem nove plantas de biogás operacionais (Tudreu, 2011, citado em Prasad, 2012), enquanto em Papua Nova Guiné, a digestão anaeróbica em escala piloto foi investigada por Jenangi (2001). Em Tuvalu, uma usina de biogás foi contratada para tratar águas residuais de porcos e seres humanos, mas atualmente o projeto está paralisado devido a problemas de manejo (Rosillo-Calle e Woods, 2003, citado por Mohee et al, 2015).

Nas SIDS da AIMS, existem poucas plantas de digestão anaeróbica. Em Cingapura, a construção da primeira usina de biogás começou em 2008 com o investimento da Advanced Environmental Technologies Pte Ltd., uma subsidiária da avançada Holdings Ltd. (Advanced Holdings Ltd., 2008, citado por Mohee, 2015). Nas Seychelles, o governo chinês e o Ministério da Agricultura das Seychelles estão financiando a construção de plantas-piloto de biogás em quatro fazendas de criação de animais na ilha (REEEP Policy Database, 2012). Nas Maurícias, existe uma instalação de biogás em grande escala, na estação de tratamento de águas residuais de St. Martin, onde as lamas do tratamento preliminar, primário e secundário são digeridas para a produção de biogás, que é posteriormente utilizado para a geração de eletricidade (Joysury e Abeeluck, 2013 citado por Mohee 2015)). Além disso, há uma usina de biogás em pequena escala em fazendas de criação de animais, como na Fazenda Védica ISKCON (ISKCON, 2004). Espera-se também que a criação da empresa Kievnov Ciência e Ambiental Technologies Co. Ltd. irá contribuir para o desenvolvimento e aplicação de digestão anaeróbia nas Maurícias (KSET, 2012; mega Negócios, 2011). Embora pesquisas substanciais tenham sido realizadas sobre a doença de Aujeszky no contexto das Ilhas Maurício, a implementação de plantas de biogás em grande escala ainda não foi considerada uma prioridade pelo governo ou por setores privados. Em contraste, processos termoquímicos como a gaseificação estão sendo propostos como potenciais plantas WTE de larga escala em Maurício (GIS, 2014) em detrimento de uma digestão anaeróbica mais sustentável.

Resumo do Capítulo 3

A digestão anaeróbica é o processo biológico mediante o qual a matéria orgânica na ausência de oxigênio e por meio de um grupo de bactérias específicas se degrada em uma série de compostos gasosos, conhecidos como biogás, constituído principalmente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e um subproduto rico em nutrientes.

A geração de Biogás a partir da digestão anaeróbica é um dos processos mais comuns utilizado pela natureza para degradar a matéria orgânica. A pesquisa do processo é tão antiga quanto a pesquisa científica, e inclui nomes de pesquisadores muito famosos. A primeira nota científica sobre o biogás é atribuída a Jan Baptista Van Helmont, em 1630, que determinou que a decomposição da matéria orgânica é obtida a partir de gases inflamáveis (Abbasi et al, 2012). Ao longo dos anos o conhecimento do processo avançou, mas a partir da metade do século XX houve mais progresso, existindo atualmente um grande conhecimento da reações.

Os estudos bioquímicos e microbiológicos indicam que o processo de degradação anaeróbica é realizado em quatro etapas principais (hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese) e nele intervêm muitas famílias de microrganismos. Especificamente, são as bactérias metanogênicas as que produzem o biogás. Desta forma, a digestão anaeróbica como método de tratamento de resíduos permite obter um gás com alto conteúdo energético que pode ser facilmente aproveitável, bem como um produto final mais estabilizado (digestores ou biol), com inferior conteúdo de matéria orgânica, que pode ser utilizado como fertilizante.

O objetivo básico da tecnologia é manter a maior atividade bacteriana possível no digestor, porque estes microrganismos são os maiores responsáveis pela transformação. Para tanto é fundamental controlar os parâmetros de operação e controle do processo, a fim de que se mantenham dentro das gamas adequadas.

A digestão anaeróbica constitui, portanto, uma boa alternativa para tratar resíduos com elevada matéria orgânica biodegradável (Nallathambi, 1997; Mata-Álvarez et al., 2000; Baraza et al., 2003) como os vistos no capítulo 2. Portanto, este tratamento está indicado para águas residuais agroindustriais, com alta carga de matéria orgânica biodegradável (resíduos procedentes de açucareiras, alcooleiras, destilarias, conservas, papeleiras, etc.) (Do Toro, 2001), resíduos agrícolas e pecuários (chorume, esterco, resíduos de matadouro, etc.) (Gannon, et al., 1994; Mahony, et al., 2002) e resíduos urbanos que compreendem tanto a fração orgânica dos resíduos sólidos (Tchobanoglous et al., 1994), quanto os lodos de depuradora de águas residuais urbanas (Choi, 1997). Ademais, este tratamento também está indicado para mesclas de resíduos orgânicos de diferente origem e composição, aproveitando a sinergia das mesclas e compensando as carências de cada resíduo separadamente, no que se conhece como codigestão anaeróbica (Sosnowski et al., 2003).

Ademais, sua utilização implica uma série de benefícios não só ambientais e energéticos, mas outros que estão implícitos nas características da própria tecnologia e que tornam atrativa sua aplicação no meio rural.

A digestão anaeróbica tem sido amplamente pesquisada tanto pela sua produção de energia como pelo seu potencial na gestão de resíduos e, como será visto nas próximas seções, foi implementada em muitos países. Atualmente existem milhões de digestores em operação no mundo, o que mostra que é uma tecnologia madura, embora o processo ainda esteja sendo pesquisado de forma a obter o melhor projeto possível em cada caso e assim obter o máximo retorno energético, ambiental e econômico.

As experiências foram realizadas em alguns SIDS e nem sempre com bons resultados. Isto pode ser devido à falta de conhecimento, capacidade e experiência das pessoas que gerenciaram os digestores (UNEP, 1998). Um grande problema nos SIDS é a falta de pessoal devidamente treinado. Para que essas plantas de biogás sejam bem-sucedidas, um dos fatores limitantes básicos é o gerenciamento correto da tecnologia pelas comunidades onde elas são implementadas (Gómez et al., 2010), o que é um desafio para o futuro próximo em o caso da adoção de tecnologias de gerenciamento de resíduos, como a digestão anaeróbica. O treinamento é, portanto, de extrema importância e os especialistas devem ser recrutados para ajudar no treinamento dos locais para lidar com qualquer tecnologia de gerenciamento de resíduos, como a digestão anaeróbica.

4. Tecnologias anaeróbicas. Digestores no meio rural de países em desenvolvimento

A transformação em energia dos resíduos orgânicos mediante a fermentação anaeróbica é um processo praticado há mais de cem anos e que tinha uma função energética muito importante. Com o passar dos anos, a tecnologia foi evoluindo graças aos avanços na pesquisa, chegando a um conhecimento mais profundo do processo tanto a nível microbiológico, quanto dos parâmetros que regulam esta fermentação, o que permitiu progredir muito em aspectos tecnológicos e melhorar consideravelmente sua eficácia. Uma das classificações dos digestores é em função da frequência de carga. Por outro lado, existe atualmente um grande número de tecnologias adaptadas ao tratamento de resíduos por digestão anaeróbica, a escolha de uma ou outra depende principalmente das características do resíduo a ser tratado. As tecnologias podem ser divididas em função de seu grau de complexidade, assim temos tecnologias de pequeno tamanho e baixo custo, e tecnologias mais avançadas que costumam ser aplicadas em digestores maiores. No presente capítulo são tratados os aspectos relacionados com as tecnologias de pequeno tamanho e baixo custo, que são as mais utilizadas no meio rural, fornecendo-se informação para a construção e desenho de um digestor com estas características.

4.1. Síntese histórica: Evolução da tecnologia

A Ásia é pioneira no tratamento por digestão anaeróbica. A China é um dos primeiros países no mundo a descobrir e utilizar o biogás. Já nos anos 1890-1920, desenvolveram-se digestores em algumas províncias chinesas. Em 1921 Luo Guorui construiu um tanque de biogás de oito metros cúbicos e fundou a companhia "Guorui Biogas Lamp".

Por outro lado, alguns autores atribuem à Índia a construção do primeiro digestor anaeróbico, em 1897, por Matunga Leper Matunga em Bombay (Mumbai), utilizando resíduos humanos para gerar gás a fim de satisfazer suas necessidades de iluminação (Khanal 2008). Já em 1900, foram construídos na Índia os primeiros digestores para a produção de biogás a partir de resíduos orgânicos.

Na Europa, o francês Mouras, em 1881, aplicou a digestão anaeróbica pela primeira vez no tratamento de águas residuais, em uma versão rude de um tranque séptico por ele inventado, ao que chamou "tesouro automático" (McCarty et al. 1982). Posteriormente, em 1895, o inglês Cameron construiu um tanque semelhante, mas melhorando a eficácia do tratamento, e o qualificou como "tanque séptico". Em 1897, devido aos bons resultados obtidos com o uso deste tanque, o governo local de Exeter (Grã Bretanha) aprovou o tratamento das águas residuais de toda a cidade por este sistema. Cameron reconheceu o valor do gás metano gerado durante a decomposição dos lodos nos tanques sépticos e uma parte do gás foi utilizado para fins de iluminação e aquecimento (Chawla 1986).

No século XX surgiram os primeiros progressos na pesquisa e tecnologia, sendo que em 1911 começaram a operar digestores em fazendas de Grã Bretanha.

Em 1920 o engenheiro alemão Karl Imhoff, desenvolveu um tipo de tanque com função dupla: recepção e processamento de águas residuais (Imhoff, 1956). Possuía uma câmara superior pela qual

passavam as águas residuais com seu período de sedimentação e outra câmara inferior, na qual a matéria caía por gravidade, na qual se realizava a digestão anaeróbica. O tanque digestor foi chamado "tanque Imhoff".

Em 1921, em Birmingham (Inglaterra), foi instalado o primeiro motor para utilizar o gás de lodos de 25 HP e teve tanto sucesso que em 1927 instalou-se um motor de 150 HP, outro em 1928, e dois motores mais de 400 HP em 1930, na mesma cidade (Greeley e Velzy, 1936).

Em 1939, em Kampur (Índia), o Instituto Indiano de Investigação Agrícola desenvolveu a primeira planta de biogás a partir de esterco.

Durante grande parte do século XX o desenvolvimento da tecnologia de digestão anaeróbica se manteve exclusivamente ligada à estabilização dos sólidos biodegradáveis das águas residuais urbanas. Isto levou ao desenho de reatores do tipo mescla completas em gama mesófila, amplamente utilizados ainda hoje em dia para a digestão dos lodos de águas residuais e defecções de animais. Entre os anos 1927 e 1950 foram realizados diversos trabalhos experimentais sobre a produção de gás a partir de resíduos pecuários. Na década de 1950 foram desenvolvidos na Índia modelos de digestores simples, adequados para os lares rurais. Estes primeiros modelos indicaram claramente que as plantas de biogás poderiam: proporcionar luz e calor nas vilas rurais, eliminando a necessidade de importar combustíveis, queimar esterco de vaca ou desflorestar a terra; proporcionar um fertilizante rico em resíduos digeridos; e melhorar as condições de saúde, proporcionando recipientes digestores herméticos, o que reduz as doenças para esterco exposto (Fry, 1973).

É a partir dos anos 40 quando surge um maior interesse na digestão anaeróbica na Europa porque, em razão da II Guerra Mundial, as fontes de energia se tornaram escassas (Fry, 1973). Assim, desenvolveu-se na Alemanha um grande número de instalações de digestão anaeróbica a fim de potencializar novas fontes de energias renováveis. Em 1951 foi construído um digestor que gerou mais de 16 milhões de m³ de biogás a partir de lodos de depuradora, que foram utilizados de formas diversas como: produção de energia para o consumo interno da planta (3,4%), aquecimento do digestor (16,7%), sistema fornecedor de gás municipal (28,5%), carburante para veículos com motor (51,4%). Ainda que a tecnologia fosse transferida a outros países da Europa Ocidental, este interesse decaiu devido ao consumo crescente dos combustíveis fósseis. Quando as condições de escassez acabaram, somente funcionavam alguns digestores na Alemanha e na França.

A partir da crise do petróleo de 1973 ressurgiu o interesse por esta tecnologia nos países europeus. Estimularam-se programas de pesquisa e desenvolvimento e foram construídas plantas industriais. Até a crise do petróleo, o processo anaeróbico tinha sido considerado em países industrializados como os EUA, Canadá e parte da Europa como um tratamento para reduzir as altas cargas orgânicas de alguns resíduos, sem aproveitar os lodos como fertilizante ou o metano como combustível (Vallés, 1980).

Entre 1950 e 1970 a digestão anaeróbica desenvolveu-se na China e na Índia. Em ambos países as matérias primas eram os excrementos animais (800 milhões de toneladas ao ano de excremento de gado na Índia) e humanos, desperdícios domésticos e alguns resíduos agrícolas (Fry, 1973). Nos anos 70 a construção de digestores na região rural da China cresceu muito, atingindo em 1977 5 milhões de digestores em funcionamento devido ao uso de materiais mais econômicos, o que reduzia os custos do investimento (Pfeffer, 1974, Smill, 1977). Há autores que atribuem a cifra de 7 milhões em 1978. Nos 80 o líder chinês Deng Xiaoping continuou apoiando o projeto e atualmente a China é o país com maior número de digestores instalados no mundo.

A maturidade que ao longo dos anos esta tecnologia adquiriu se revela nos seguintes pontos:

- Reconhecimento dos microrganismos metanogênicos como um conjunto.
- Desenvolvimento do desenho de diversos digestores.

- Execução de digestores em fazendas e indústrias.
- Começo da exploração do biogás em aterros.

A aplicação dos sistemas de digestão anaeróbica para a descontaminação de águas residuais industriais não só foi estimulada pelo forte aumento dos preços dos combustíveis fósseis na década de 1970, quanto pelas normas de controle da contaminação, cada vez mais estritas. Para muitos governantes passou a ser um recurso energético viável e doméstico, com potencial para reduzir a dependência do petróleo (Klass, 1998).

Por outro lado, a falta de adequação da digestão do tipo mescla completa para o tratamento das águas residuais industriais de baixa carga e de composição orgânica principalmente solúvel, conduziu ao conceito de reciclagem de sólidos biológicos e retenção de biomassa ativa no digestor. Esta evolução dos desenhos de digestores melhorou consideravelmente o uso da digestão anaeróbica como processo de tratamento de águas residuais. Na última década a China estabeleceu sistemas administrativo para realizar projetos sobre biogás (por exemplo, nas fazendas administradas pelo estado), pesquisa, etc.

A investigação básica é liderada pelos Estados Unidos, China, Índia e diversos países europeus com pesquisadores dedicados a estudar muitos aspectos da complexa fermentação anaeróbica em suas fases ácida e metanogênica, a fim de poder otimizar os processos de produção de biogás. Estes países, por sua vez, desenvolvem pesquisas aplicadas a digestores e aterros de grande tamanho, equipados com sistemas de controle automático, purificação e armazenamento e biogás, além da produção de energia, o que permite obter elevadas eficiências.

Ainda que nos últimos anos o objetivo energético inicial que estimulou o desenvolvimento da digestão anaeróbica tenha sido transformado em um objetivo de depuração, atualmente volta a adquirir importância o aspecto energético do processo.

Atualmente os Estados Unidos estimulam a produção de biogás de aterro, através da construção de aterros biorreatores.

Com relação aos países em desenvolvimento, a China continua tendo o maior número de digestores, estimado em milhões. Geralmente são digestores de tecnologia simples implantados em áreas rurais; sua capacidade média é de 10m³ e fornecem a energia utilizada para fins domésticos, utilizando-se o efluente na agricultura.

O aumento do preço dos combustíveis fósseis tornou o biogás uma aplicação muito atrativa. Esta, que antes se limitava à avaliação energética dos resíduos, ampliou-se com o uso da codigestão com outros resíduos e/ou com cultivos energéticos.

Da perspectiva dos países desenvolvidos e em desenvolvimento, a biotecnologia anaeróbica contribui com três necessidades básicas: a) Melhorar as condições sanitárias mediante o controle da contaminação; b) geração de energias renováveis para atividades domésticas; e c) fornecer materiais estabilizados (digestores ou biol) como um biofertilizante para os cultivos. Portanto, a biotecnologia anaeróbica tem um importante papel no controle da contaminação e para a obtenção de valiosos recursos como: energia e produtos com valor agregado.

Mais recentemente a crescente preocupação sobre as possíveis consequências da mudança climática e as evidências da relação entre estas e o uso dos combustíveis fósseis reforçaram o interesse em ampliar a participação das fontes de energia renovável.

Nos países em desenvolvimento o aproveitamento do biogás a escala comercial aumentou consideravelmente com a possibilidade de obtenção de Certificados de Redução de Emissões (CER's), os chamados "créditos de carbono", através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Este é um mecanismo estabelecido no Protocolo de Kyoto, que tem como objetivo ajudar os países em

desenvolvimento a alcançar um desenvolvimento sustentável através da promoção de investimentos ambientalmente amigáveis dos governos ou empresas de países industrializados. Os bônus de carbono – CER, são tratados pelos mercados na América Latina como “produtos”, o que quer dizer que seu valor tem maior relação com o direito do proprietário a comercializá-los do que de usá-los. Por ser um mercado relativamente novo, os operadores aprendem com a experiência, resgatando e anotando a situação daqueles fatores externos que possam influenciar em suas cotizações.

4.2. Tipos de digestores em função da frequência de carga

De acordo com a frequência de carga, os digestores se classificam em:

4.2.1. Digestor Batch ou descontínuo

Caracteriza-se por carregar-se uma vez de forma total e descarregar-se uma vez concluído o processo de digestão. Isso é, o digestor se carrega, a matéria orgânica se digere e, depois de seu respectivo TRH, descarrega-se e torna a alimentar-se. A taxa de produção de biogás neste tipo de digestor é alta a princípio, chegando a um máximo, mas logo decai bruscamente devido a que as bactérias não podem desenvolver-se.

Este sistema é recomendável quando a matéria a ser processada é produzida de maneira intermitente. A vantagem deste tipo de digestor está em que serve para a digestão de materiais celulósicos ou com conteúdos de lignina que não podem ser tratados nos digestores de tipo contínuo devido ao possível entupimento dos condutos de alimentação e saída. Ademais, pode trabalhar com substratos com alto conteúdo de sólidos, reduzindo assim a necessidade de utilizar água para mesclar a biomassa.

Utilizam-se mais com tecnologias menos desenvolvidas, de baixo custo.

Para poder explorar a produção se usa uma linha de digestores de modo que se carregam em diferentes tempos para que a produção de biogás, em termos gerais, permaneça constante. Estes digestores são utilizados na Guatemala (De la Torre, N., 2008).

4.2.2. Digestores de tipo contínuo

Este tipo de digestores consiste em, uma vez alimentado com a primeira carga, manter a alimentação regularmente. A biomassa a ser utilizada deve estar mesclada com água, esta mescla deve ocorrer fora do digestor, antes da alimentação, e é necessário um elemento na saída do digestor que colete os lodos já digeridos.

Uma vez que o processo de digestão foi estabilizado, a taxa de produção é bastante constante, sempre que se mantenha a velocidade de alimentação e a temperatura. Deve-se cuidar para que a entrada e a saída dos tubos não estejam bloqueadas como consequência da digestão.

Este tipo de digestores são desenvolvidos principalmente para o tratamento de águas residuais, isso é, de aplicação industrial. Geralmente são plantas grandes, de modo que se utilizam equipamentos comerciais para alimentá-los, proporcionar aquecimento e agitação, bem como para o controle. Utilizam-se mais em tecnologias avançadas.

4.2.3. Digestores de tipo semicontínuo

Estes digestores são uma combinação do tipo de digestor descontínuo, ou tipo batch, e o contínuo. Neste tipo de digestor, o volume que ingressa desloca uma quantidade equivalente de efluente que é evacuada pela saída. Como consequência o volume do substrato que alimenta o digestor permanece constante. A carga geralmente é feita diariamente, mas a descarga total, diferentemente do tipo Batch, só ocorre uma ou duas vezes por ano, que geralmente coincide com o período de semeadura para poder aproveitar o poder fertilizante dos resíduos da digestão e dos lodos fermentados. Parte destes lodos são novamente utilizados como alimento para o digestor. Este tipo de digestor é o mais usado mundialmente no meio rural, quando se trata de digestores pequenos ou para uso doméstico. Os desenhos mais representativos são o modelo hindu, o modelo chinês e o modelo taiwanês, que serão vistos neste capítulo.

4.3. A Digestão Anaeróbica em áreas rurais de países em desenvolvimento.

A utilização da digestão anaeróbica em áreas rurais de países em desenvolvimento dá-se através de dois tipos de tecnologias em função de seu grau de desenvolvimento:

- Tecnologias básicas:

O objetivo buscado é proporcionar energia, saúde e fertilizantes orgânicos a agricultores de áreas marginais ou a produtores médios de países com setores rurais de baixa renda e difícil acesso a fontes convencionais de energia. A tecnologia desenvolvida visa obter digestores de mínimo custo e fácil manutenção, mas com eficiências pobres e baixos níveis de produção de energia.

- Tecnologias mais avançadas:

Estão orientadas ao setor agrícola e agroindustrial de renda média-alta. O objetivo, neste caso, é fornecer energia e resolver graves problemas de contaminação. Os digestores de alta eficiência desenvolvidos para esta aplicação têm maior custo inicial e possuem sistemas que tornam mais complexa sua gestão e manutenção. O impacto que produzem no meio rural é:

- Aumento da sustentabilidade ambiental da produção agrícola e pecuária.
- Intensificação da economia regional.
- Redução dos gastos por consumo de energia.
- Aumento de a produção/oferta nacional de fertilizantes para a agricultura.
- Preservação ambiental da redução das emissões de gases efeito estufa.
- Criação de novas fontes de renda, com a venda de biofertilizantes e créditos de carbono.
- Avaliação de subprodutos da produção agropecuária.

Por outro lado, com relação a sua capacidade, existe uma classificação geral para as plantas de produção de biogás: as instalações de alta capacidade ou instalações industriais, e as de pequena capacidade ou também chamadas, "mini digestores". Neste capítulo serão abordadas as tecnologias básicas que costuma ser de pequena capacidade e de baixo custo.

As tecnologias avançadas, que normalmente estão associadas a instalações de alta capacidade, não estão apenas no meio rural. Delas falaremos no seguinte capítulo.

4.3.1. Integração da tecnologia

Atividades que em muitos casos são consideradas rotineiras e simples como cozinhar, iluminar ou dispor de eletricidade, podem ser convertidas para muitos habitantes do planeta em um objetivo diário para dispor do combustível necessário. Os sistemas baseados na produção e utilização do biogás gerado a partir dos resíduos biodegradáveis podem resolver muitos destes problemas e ajudar a melhorar a qualidade e o nível de vida dos habitantes de muitas áreas.

Os custos crescentes e a limitada disponibilidade das fontes não renováveis de energia, somados à dificuldade que representa sua distribuição no meio rural e os altos custos dos fertilizantes químicos, tornam necessário continuar desenvolvendo e adaptando tecnologias mais eficientes e baratas para o aproveitamento ideal dos resíduos animais e a produção de combustível e fertilizantes nos sistemas agropecuários. Uma delas consiste na utilização de biodigestores para degradar resíduos gerados em comunidades rurais, gerando biogás para satisfazer algumas demandas de energia e um fertilizante melhorado.

Para que estas plantas tenham sucesso, devem pelo menos satisfazer três fatores básicos limitadores: a disponibilidade de água para fazer a mescla com esterco, que será introduzida no biodigestor, a quantidade de matéria prima e a correta gestão da tecnologia por parte das comunidades em que se implantem. De fato, um dos requisitos exigidos no desenho dos biodigestores é a simplicidade, tanto na execução da obra, quanto em seu manejo e manutenção.

A operação satisfatória destes digestores permitirá melhorar, a curto e médio prazo, tanto a qualidade quanto o nível de vida de muitos habitantes do planeta, enquanto a longo prazo contribuirá para desenvolver um setor de atividade econômica associado a estes sistemas. Para que isto seja possível, devem-se integrar muitos fatores tanto ambientais e sociais, quanto técnicos e econômicos. Apenas quando se trabalha considerando todos estes, serão satisfeitos os objetivos pretendidos com este tipo de instalações.

4.3.2. Vantagens e inconvenientes da aplicação dos biodigestores básicos no meio rural

Dentre as vantagens da utilização dos biodigestores básicos de baixo custo, no meio rural se destacam:

1. Permite diminuir a deflorestação, por não ser necessário o uso da lenha para cozinhar.
2. Humaniza o trabalho dos camponeses, que antes tinham que buscar a lenha em lugares cada vez mais distantes.
3. Diversidade de usos (iluminação, cozimento de alimentos, produção de energia eléctrica, transporte automotor e outros).
4. Produz biofertilizante rico em nitrogênio, fósforo e potássio, capaz de competir com os fertilizantes químicos, que são mais caros e danificam o meio ambiente.
5. Elimina os resíduos orgânicos, por exemplo, o excremento animal, contaminante do meio ambiente e fonte de doenças para o homem e os animais.
6. Melhora a economia familiar.

Os inconvenientes ou desvantagens se resumem em dois:

1. Precisa acumular os resíduos orgânicos perto do biodigestor.
2. Risco de explosão, no caso de que não sejam cumpridas as normas de segurança para gases combustíveis.

4.4. Digestores de pequena escala e baixo custo

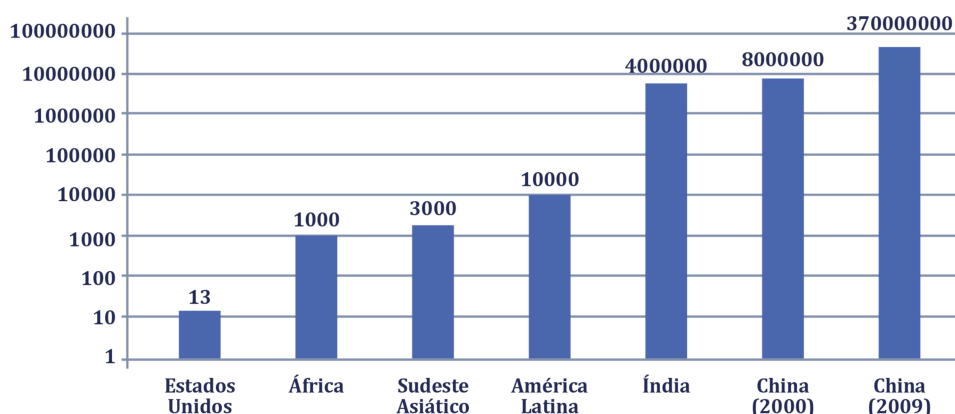
Como já se afirmou, a digestão anaeróbica ou biodigestão é uma tecnologia que permite melhorar o aproveitamento energético tradicional da biomassa, tanto do ponto de vista ambiental, quanto social e econômico. Ao mesmo tempo, permite uma gestão sustentável dos resíduos orgânicos, convertendo-os em um recurso para gerar biogás (energia renovável) e digerido (fertilizante natural). Os resultados do processo de digestão produzem uma série de benefícios: 1. O metano capturado se converte em uma fonte de energia renovável; 2. As emissões de gases de efeito estufa, a contaminação de águas residuais e odores nocivos se reduzem drasticamente, e 3. Se cria um adubo orgânico, os microrganismos transformam os contaminantes orgânicos em nutrientes dissolvidos (Archer e Kirsop, 1990, Powers et al., 1999 e USEPA, 2004). Ademais, os digestores agrícolas de pequena escala são baratos e fáceis de construir, o que os torna uma tecnologia apropriada para melhorar o meio ambiente e os meios de subsistência dos agricultores (Botero e Preston, 1987, Chará et al., 1999, Xiaohua e Jingfei de 2005 e Lansing et al., 2008).

A biodigestão à escala familiar foi muito difundida em países como a China e a Índia desde o século passado e, mais recentemente, no Nepal (Biogas Support Programme). O desenvolvimento da tecnologia do biogás "caseiro" tem mais de 70 anos na Índia (Myles, 2001) e é muito utilizado em países e regiões como a China, Tailândia, América Latina e África do Sul Gómez et al., 2010).

A **Figura 9** mostra os digestores de pequena escala instalados no mundo (Burns, 2009). A América Latina é, depois da China e da Índia, a região com mais digestores com estas características.

O número de biodigestores na Ásia e na África está aumentando, principalmente devido aos programas nacionais de biogás, como a ABPP. A **Tabela 30** mostra uma visão geral das plantas de biogás instaladas através do apoio da SNS e/ou Hivos até o final de 2013. Além disso, esta tabela revela o número de digestores que foram construídos nos países participantes. Vê-se que em alguns países dezenas de milhares e até centenas de milhares de digestores foram construídos. Por exemplo, desde 2009, o Quênia construiu 11.579 biodigestores por meio dessa iniciativa. A taxa de instalação na Ásia em comparação com a taxa de instalação na África é ainda maior. O Vietnã construiu 173.905 unidades desde 2003 e o Nepal alcançou a maior quantidade de biodigestores: 292.979 plantas de biogás desde 1992. O Programa Nacional de Biogás da Indonésia, apoiado pela Hivos, alcançou um marco de 11.331 instalações de plantas de biogás até o final de 2013 (Hivos, 2013).

Nº de digestores



Fonte: Burns, 2009.

Figura 9: Digestores de pequena escala instalados no mundo

Tabela 30: Número de digestores construídos na Ásia e na África através de HIVOS e/ou SNV até 2013.

	Data de Início	Nº de biodigestores construídos no âmbito dos programas até 2013
Nepal	1992	292927
Vietnam	2003	173905
Camboja	2006	20288
Rep. Democ. Popular Lao	2007	2888
Indonésia	2009	11331
Paquistão	2009	334
Bangladesh	2006	31886
Burkina Faso	2010	4014
Etiópia	2009	8161
Quênia	2009	11579
Ruanda	2007	3517
Tanzânia	2009	8799
Uganda	2009	5168
Butão	2011	839
Camarões	2009	198
Benin	2010	72
Senegal	2010	334

Fonte: SNV, 2014.

Na ALC, concretamente na Costa Rica, existem aproximadamente 1.000 digestores de baixo custo que tratam resíduos agrícolas e humanos. Ainda que os sistemas de digestão de baixo custo sejam muito utilizados, a pesquisa sobre o rendimento do digestor é escassa. A pesquisa e desenvolvimento na tecnologia da digestão anaeróbica nos Estados Unidos e na Europa focou-se em sistemas de grande escala, de grande investimento de capital, que são apropriados para as explorações a escala industrial, mas com um custo médio de 1.5 milhões de dólares, quase sempre inacessível para o agricultor de pequeno porte (Inglis, 2006 e USEPA, 2006).

Os digestores anaeróbicos de pequena escala geralmente funcionam como processos semicontínuos. Uma quantidade fixa de esterco é mesclada com uma quantidade fixa de água e introduzida no digestor uma vez ao dia.

Atualmente existem três tipos de digestores anaeróbicos de pequena escala que são os mais utilizados pelos países em desenvolvimento, estes são: os digestores de cúpula fixa, digestores de tambor flutuante e os digestores tubulares de polietileno. A biodigestão de escala familiar foi amplamente difundida em países como a China e a Índia, e os digestores mais utilizados foram, respectivamente, os de cúpula fixa e os de cúpula flutuante. Sem embargo, a complexidade de sua construção e o custo relativamente elevado podem limitar sua implantação em outros países. Os biodigestores tubulares de plástico, de construção simples e econômica, permitem uma maior expansão desta tecnologia.

Por outra parte, a disponibilidade local de peças para o digestor também é um tema muito importante a ser considerado na hora de escolher o desenho. Quando uma peça quebra e é preciso repô-la, os membros da comunidade devem ter acesso a mesma para que o digestor possa continuar funcionando. Outras considerações importantes na escolha do desenho são: o clima local durante todo o ano, a quantidade de resíduos e de água disponíveis diariamente, se é necessária mão de obra especializada para a construção de um digestor anaeróbio e, principalmente, a facilidade de operação do digestor.

Os digestores, uma vez terminados, devem permanecer herméticos, bem como todas as juntas existentes, a fim de evitar a entrada de oxigênio. O biogás produzido, que têm uma concentração de 60-70% de metano, pode ser utilizado diretamente como fonte de calor, eliminando a necessidade de queimar madeira, comprar o gás natural para cozinhar, ou para o aquecimento. Com um custo adicional, é possível instalar um gerador elétrico para produzir eletricidade (Rajabapaiah et al., 1993).

A tendência mundial no desenvolvimento destes digestores de baixo custo e pequeno tamanho é diminuir os custos e aumentar a vida útil destas instalações, com o objetivo de angariar mais e usuários para esta tecnologia.

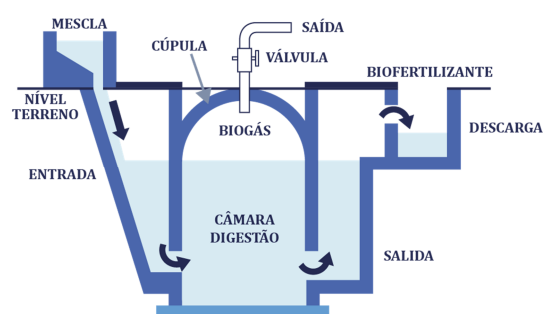
Para que estas plantas sejam bem sucedidas, pelo menos três fatores limitantes básicos devem ser satisfeitos: a disponibilidade de água para fazer a mistura com o esterco que será introduzida no digestor, a quantidade de matéria-prima bem como a aceitação e manuseio correto da tecnologia pelas comunidades onde elas são implementadas. De fato, um dos requisitos necessários para o projeto de biodigestores é a simplicidade, tanto na execução do trabalho como na sua gestão e manutenção (Gómez et al, 2010).

4.4.1. Digestor anaeróbico de cúpula fixa

O digestor anaeróbico de cúpula fixa, também conhecido como digestor "modelo chinês" por sua origem, data de 1936 (Buxton, D. and Reed, B., 2010). Possui um compartimento de alvenaria subterrânea (que pode ser de tijolo ou de elementos pré-fabricados de concreto), também conhecido como câmara de fermentação, e uma cúpula fixa para o armazenamento do biogás (**Figura 10 e Ilustração 1**). A estrutura de peça única reduz a complexidade de manutenção. Os digestores de cúpula fixa funcionam com esterco misturado com água, como um lodo em um tubo de entrada. Este lodo flui por gravidade na parte inferior do digestor. Esta contém uma capa de biosólidos e uma capa de líquido acima destes (Rowse, 2011).

Quando ocorrem os processos microbiológicos, os sólidos voláteis são consumidos e se produz o biogás (metano e dióxido de carbono). Este é armazenado dentro do digestor, criando um aumento gradual da pressão. A medida em que a pressão do gás aumenta mais do que o ponto de equilíbrio, esta desloca o lodo digerido da parte inferior ao tubo de saída do digestor e ao depósito de coleta. A massa de lodo, reduzida com relação ao resíduo anterior, acumula-se no depósito de coleta que deve ser esvaziado quando estiver cheio (Oćwieja, 2010).

Os digestores de cúpula fixa geralmente são construídos com alvenaria e devem ser impermeáveis aos gases. São construídos dentro de um buraco cavado no solo, que protege a estrutura e proporciona isolamento. A alvenaria se veda com uma pintura de polímero, para vedar o interior do digestor (GTZ / GTZ, 1999).



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de informações coletadas.

Figura 10: Digestor anaeróbico de cúpula fixa



Ilustração 1: Digestor de cúpula fixa

As principais vantagens dos digestores de cúpula fixa são: 1. Os digestores não têm partes móveis; 2. Os custos são relativamente baixos, ainda que superiores a outras tecnologias e 3. A vida útil do desenho é de 20 anos (GTZ / GTZ, 1999), mas há autores que dão uma durabilidade de 20 a 50 anos com uma manutenção sistemática

As desvantagens destes digestores são: 1. A necessidade de vedações especiais, 2. Requer-se altos conhecimentos técnicos para sua construção, 3. As pressões de gás flutuam, o que torna complicado o uso do gás (GTZ / GTZ, 1999), 4. Apesar de ser econômico, tem um alto custo de investimento comparado com outras tecnologias. Esta circunstância impediu sua generalização na América Latina e 5. A operação não é fácil de entender a nível familiar, já que não é possível ver a quantidade de gás presente no digestor (Oćwieja, 2010).

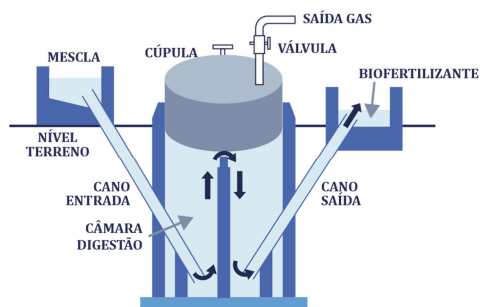
4.4.2. Digestor anaeróbico de tambor flutuante

Este tipo de digestor, também conhecido como digestor "modelo hindu" por sua origem, foi desenvolvido em 1956 (Buxton, D. and Reed, B., 2010). Distingue-se do modelo chinês porque neste caso se utiliza um tambor móvel. Na ausência de biogás o tambor flutua, seja em uma camisa de água que rodeia o digestor, ou diretamente na suspensão a digerir. Quando o biogás é produzido, o tambor, que está montado sobre uma armação móvel, sobe conforme aumenta a pressão do gás sobre ele (GTZ / GIZ, 1999).

O tambor pode ser de metal, concreto ou plástico (Buxton & Reed, 2010; Munasingha & Wijesuriya, 2007; Lawbuay, 2006; Singh & Sooch, 2003). Ademais, o digestor está composto por um tanque de armazenamento em forma cilíndrica, que pode ser construído com pedra, tijolo ou concreto. Para permitir a entrada da matéria orgânica e a saída do biofertilizante, utilizam-se dois tubos (de plástico, fibrocimento, cerâmica ou outros) que conectam o tanque de armazenamento com o de carga e descarga (**Figura 11** e **Ilustração 2**). Também possui tubulações, válvulas de corte e segurança que garantem o bom funcionamento do biodigestor. Os digestores de tambor flutuante funcionam com esterco misturado com água através do tubo de entrada do digestor.

Como o digestor de cúpula fixa, a suspensão flui pela a tubulação de entrada e chega à parte inferior do digestor. Há uma capa de biosólidos na parte inferior e uma capa de efluentes líquidos acima desse (Rowse, 2011).

Uma das vantagens deste digestor frente ao modelo chinês é que o operador pode ver e entender melhor como funciona o digestor, já que a cúpula se eleva e descende, respectivamente, com a maior ou menor pressão do gás (Oćwieja, 2010). Outra vantagem deste digestor é que são fáceis de operar (GTZ / GIZ, 1999) e que a pressão do gás é mais fácil de ser mantida neste desenho, eliminando o óxido e com uma pintura regular (GTZ / GTZ, 1999).



Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.



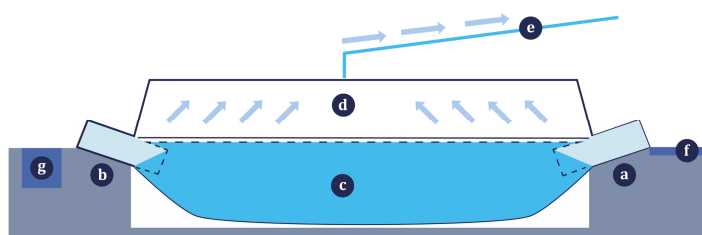
Figura 11: Digestor anaeróbico de tambor flutuante

Ilustração 2: Digestor tambor flutuante

As desvantagens do digestor tambor-flutuante são: 1. O tambor de aço é relativamente caro e requer uma manutenção frequente; 2. A vida útil é de 5 a 15 anos; 3. Ademais, o tambor pode ficar preso na armação, o que requer manutenção (GTZ / GIZ, 1999), e 4. Segundo Oćwieja (2010), estes digestores são mais difíceis de conseguir, o que aumenta seu custo.

4.4.3. Digestor anaeróbico tubular de polietileno

Atualmente foram testados desenhos que conseguiram reduzir consideravelmente os custos iniciais dos biodigestores. A limitação econômico motivou os engenheiros taiwaneses a pesquisar e construir digestores com materiais flexíveis (FAO, 1992), que representam um custo menor. Inicialmente foram utilizados materiais como nylon e neopreno, mas os resultados foram negativos, pois eram muito caros. Através dos anos os materiais foram sendo desenvolvidos e hoje as comunidades usam digestores com plástico. Possíveis materiais para sua construção são o polietileno e o PVC (geomembrana), sendo o último mais resistente, mas também mais caro (Pedraza, 2002). Assim, geralmente são feitos de polietileno. No digestor anaeróbico tubular de polietileno, também conhecido como digestor "modelo taiwanês", a construção e a mão de obra são fáceis e tem baixo custo, já que os materiais são muito simples. Os componentes fundamentais deste biodigestor são: uma bolsa de polietileno de espessura fina, normalmente com duas capas, capaz de suportar as pressões normais de trabalho do biogás e na qual se armazena o resíduo mesclado com água. Sempre se deve deixar o volume necessário para armazenar o biogás (**Figura 12 e Ilustração 3**).



Fonte: Elaborado pelo autor a partir de informações coletadas.

Figura 12: Digestor anaeróbico tubular de polietileno



Ilustração 3: Digestor tubular

Um digestor tubular é colocado em uma vala com uma inclinação de 2.5% para facilitar o fluxo por gravidade. As águas residuais fluem através do tubo de polietileno com fluxo semicontínuo como os anteriores (C). O lodo alimenta-se no digestor através de um recipiente de carga (F) pela tubulação de entrada (A). Quando o digestor está em equilíbrio, uma massa igual de líquido concentrado sai do digestor através da tubulação de saída (B) e é coletada em um recipiente de coleta de digestores (G). Quando se acumulam muitos biosólidos no digestor, estes devem ser esvaziados periodicamente (GTZ/EnDev, 2010). O gás é armazenado acima do lodo em digestão (D) e não existe armazenamento e gás externo adicional (GTZ/EnDev, 2010). A tubulação de saída (E) conduz o biogás ao aproveitamento.

Para que a instalação funcione bem, são necessários outros acessórios como: válvulas de corte, de segurança, tubulações e adaptadores. Normalmente, para proteção, constrói-se uma vala, revestida de concreto ou outro material, com as dimensões adequadas para que possa caber o digestor. Um digestor de 8m de comprimento (25m³) pode tratar os resíduos de 55 porcos (50 kg) e produzir até 6m³ de biogás por dia, com um conteúdo de metano superior a 60% (Lansing et al., 2008). De acordo com Lansing (Lansing, et al. 2010), a adição de pequenas quantidades de gordura de cozinha aumentou em 124% a produção de metano sem aquecimento em reatores de fluxo de pistão.

Ainda que seja barato e fácil de construir, dentre suas desvantagens está seu baixo tempo de vida útil, sua durabilidade é de apenas 2-10 anos (GTZ/EnDev, 2010), ainda que existam autores que

considerem necessário montar uma nova instalação a cada três anos. Também é muito vulnerável a sofrer fraturas por condições climáticas adversas, pelas ações do homem e dos animais.

4.5. Construção e desenho de um digestor tubular de polietileno

Escolheu-se para o desenho de um digestor anaeróbico de baixo custo o modelo tubular de polietileno pela simplicidade da tecnologia, o aspecto econômico e, principalmente, por ser o mais utilizado na região da ALC.

No momento de projetar e construir um digestor, deve-se considerar uma série de fatores em função de distintos critérios que serão descritos (CEDECAP, 2007).

4.5.1. Dimensionamento e desenho

A. Cálculo de quantidade de esterco: Não há unanimidade na bibliografia sobre a produção de resíduos pecuários. Para determinar a disponibilidade de matéria prima é possível estima-la a partir da informação já fornecida na Tabela 2 ou tendo como referência a **Tabela 31**.

Tabela 31: Produção de Esterco fresco diário por tipo de animal

Animal	Esterco (kg/100 kg de peso vivo)
Vaca	8
Porco	4
Cavalo	7
Cabra	4
Coelho	3

Fonte: Martí, J., 2008.

Em função do número de animais disponíveis é possível fazer uma estimação da quantidade diária de resíduo a digerir. Por exemplo, uma vaca de 400 kg produzirá por dia 32 kg de esterco fresco.

Por outro lado, a quantidade de esterco disponível depende da gestão do gado na região. No caso do gado tabulado, aproveita-se totalmente o esterco produzido e no caso de gado tabulado somente no período noturno, seria aproveitado somente 25%.

B. Matéria a digerir: Como já se referiu, para a obtenção de biogás a partir de resíduos de animais, a mescla mais adequada é a relação esterco/água de 1:4. Isto se chama mescla de carga diária.

C. Tempo de retenção: Como já foi visto, a velocidade de degradação depende em grande parte da temperatura ambiente, pois quanto maior temperatura, o tempo de retenção requerido é menor. A **Tabela 32** mostra uma estimação do TRH em função da temperatura ambiente.

Tabela 32: TRH em função da temperatura ambiente

Região característica	Temperatura (°C)	TRH (dias)
Altiplano	10	55
Vale	20	25
Trópico	30	10

Fonte: CEDECAP, 2007.

D. Dimensões do digestor: O volume total do digestor deve albergar uma parte líquida e outra gasosa. Normalmente, 75% é ocupado pela fase líquida e 25% pela gasosa.

O volume total é a soma do volume gasoso e o volume líquido: $V_T = V_G + V_L$

E, portanto, o volume líquido corresponde a três quartos do total: $V_L = V_T \times 3/4$

O volume gasoso corresponde a uma quarta parte do total: $V_G = V_T \times 1/4 = V_L / 3$

O polietileno tubular é vendido em rolos de 50m, com uma largura que varia normalmente entre 1, 1,25, 1,50, 1,75 e 2 m. No caso de biodigestores de polietileno, a fórmula base é a do volume de um cilindro, isso é:

$$V_T = \pi \times r^2 \times L \quad \text{onde: } \pi = 3,1415; \quad r = \text{razão}; \quad L = \text{Longitude}$$

Sabendo qual é o volume total do biodigestor e os cortes eficazes dos plásticos disponíveis (conforme a largura do rolo), é fácil determinar a longitude necessária. Se o volume do biodigestor é $V_T = \pi \times r^2 \times L$, e conhecemos todos os parâmetros, exceto a longitude, da anterior fórmula se obtém: $L = V_T / (\pi \times r^2)$.

Desta maneira se gera um quadro no qual se apresentam os resultados da longitude para cada largura de rolo. A **Tabela 33** relaciona a largura do rolo com a longitude do digestor.

Tabela 33: Relações entre o diâmetro e a longitude

Largura do rolo (m)	Rádio (m)	Diâmetro (m)	Corte πr^2 (m ²)	Longitude (m)
1	0,32	0,64	0,32	$V/0,32$
1,25	0,40	0,80	0,50	$V/0,50$
1,50	0,48	0,96	0,72	$V/0,72$
1,75	0,56	1,12	0,97	$V/0,97$
2	0,64	1,28	1,27	$V/1,27$

Para determinar as dimensões do digestor, deve-se considerar que o conveniente é que a relação entre o diâmetro e a longitude tenham uma relação entre 1:5 e 1:10, sendo mais recomendável que esta seja dentre 1:7 e 1:8 (Martí, J., 2002; CEDECAP, 2007). Para digestores com longitudes maiores de 10 m, dever-se-á considerar a colocação de correntes que ajudem a agitar a mescla e, assim, evitar a formação de crostas na superfície.

4.5.2. Materiais para a construção

O biodigestor que considerado é bastante simples e econômico. No entanto, para sua construção requer-se mão de obra pesada e algumas capacidades no momento de fazer o muro e colocar isolantes. Os materiais necessários são os apresentados na **Tabela 34**.

Tabela 34: Materiais necessários para a construção de um digestor anaeróbico tubular

Material	Descrição
Filme negro UV (2x50) 300 micr.	Polietileno UV que serve para fazer o biodigestor
Filme translúcido (2x50) 300 micr	Polietileno UV, que servirá para fazer a estufa.
Tubulações de PEAD	Tubulação para fazer conexão de gás.
Cotovelos	Para emenda nas conexões
Uma "T"	Conexão para a distribuição do biogás
Torneira de bola	Conexão para controlar saída de gás
Falange	Para emenda entre tubos.
Adaptadores	Para emenda entre tubos
Tubo 16 cm	Conexão para a saída de biogás na cozinha.
Ferramentas	Flexo 5m, Fita adesiva. Arame/barbantes. Alicates. Borrachas (3 pneus /biodigestor). Selador manual. Esponja de aço. Teflon. Tesouras. Pregos. Tarraxa ½"

Fonte: CEDECAP, 2007.

4.5.3. Região de trabalho

Em função de onde se construa o digestor, deve-se considerar uma série de fatores:

- É recomendável que a instalação do digestor esteja o mais próximo possível do lugar onde está localizada a região de coleta de defecções animais ou humanas.
- As dimensões do biodigestor se ajustam de acordo à disponibilidade de espaço.
- Pode-se considerar a instalação de um estufa solar, em regiões com temperaturas iguais ou inferiores a 10°C.
- Para manter a estabilidade da temperatura, é conveniente enterrar parcialmente o digestor ou cerca-lo com um muro e utilizar isolantes.
- É conveniente ter em conta a trajetória do sol para posicionar o biodigestor.

4.5.4. Construção da estrutura para o digestor

Dimensões da vala para o biodigestor

O desenho final do digestor requer que se saibam as dimensões da vala onde se acomodará o plástico tubular. O comprimento da vala está determinado pelo comprimento do digestor, e a profundidade e largura do mesmo dependerão da largura do rolo utilizado na construção do biodigestor. De modo geral, podem ser utilizadas as dimensões presentes na **Tabela 35**, em função da largura do rolo.

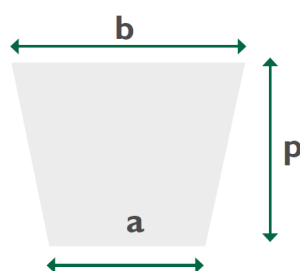


Tabela 35: Dimensões para a vala

Largura do rolo (m)	a (m)	b (m)	P (m)
1	0,3	0,5	0,6
1,25	0,4	0,6	0,7
1,50	0,5	0,7	0,8
1,75	0,6	0,8	0,9
2	0,7	0,9	1,0

Fonte: Martí, J., 2008.

Deve-se considerar que ao alojar o digestor na vala, as paredes desta sustentarão toda a pressão do volume líquido do biodigestor. A cúpula de biogás estará na parte superior e ocupará 25% do volume total.

Quando se constrói uma vala sem considerar a largura utilizada, pode acontecer que a cúpula de biogás seja muito pequena ou, inclusive, grande. No caso de que a cúpula ocupe mais do que 25% do volume, reduz-se o volume da fase líquida e, portanto, o tempo de retenção.

Construção da vala

Para construir a estrutura que albergará o digestor deve-se seguir os seguintes passos:

- Cavar um buraco com as mesmas dimensões do digestor, com a base em forma de "U" ou de "V".
- No caso de encontrar-se em regiões frias, abaixo de 10°C, será construída uma cerca em volta do biodigestor (tijolo ou adobe) para preservá-lo da temperatura. No caso de construções de adobe e para comprimentos maiores que 7m, na estrutura devem existir suportes de segurança localizados em trechos determinados.
- Devem ser cavados duas valas, uma para o tubo de entrada e outra para o tubo de saída. A vala de entrada terá um ângulo de, aproximadamente, 45°, e entrará o mais próximo possível do fundo, deixando não mais do que 30cm entre o ponto da entrada e o fundo do tanque. O tubo de entrada deve estar acima do tanque pelo menos 40cm. O tubo de saída deve ter um ângulo de 30°.

4.5.5. Instalação do digestor e primeira carga

Uma vez pronta a estrutura, proceder-se-á à instalação do biodigestor e à colocação de recipientes que facilitem a carga do material e a descarga do digerido. Os seguintes passos são (CEDECAP, 2007):

- Recortar o polietileno de acordo com as dimensões estabelecidas. Instalar a válvula de saída de gás.
- Instalar a mangueira e a válvula para a saída de gás.
- Instalar os tubos de entrada e saída. O comprimento dos tubos oscila entre 1 e 1.20 m. É necessário forrá-los por fora com uma fita de borracha de 3 a 4 cm. de espessura, a fim de proteger o biodigestor das estilhas produzidas no corte do tubo.
- No caso de que seja necessária a instalação de uma estufa, a estrutura deverá ser preparada para o suporte da cobertura antes de colocar o biodigestor.
- Trasladar o biodigestor até a estrutura de adobe ou tijolo. Antes de coloca-lo, a superfície da estrutura deverá estar coberta com capas de material isolante e de proteção a fendas (sacos de ráfia, palha,...).
- Instalado o biodigestor, medir o grau de inclinação de cada tubo. Recomenda-se que o ângulo de inclinação oscile entre 30° e 45°. Uma vez posicionado, prender os tubos em postes de madeira, deixando passar pelo centro do tubo um barbante ou arame, a fim de manter esta posição.
- Colocar os recipientes de entrada da mescla e de saída de digestores.
- Instalar a tubulação de conexão do biodigestor até o recipiente de coleta de gás, e deste até o ponto de consumo. Sugere-se prever uma distância não maior a 20 m. A quantidade de válvulas e cotovelos dependerá da distribuição do uso: quantidade de queimadores para cocção, iluminação, etc.
- Uma vez instalado o biodigestor, pode-se proceder à carga. A carga inicial deverá ser realizado com água até a quarta parte do sistema. Posteriormente, introduzir a carga de

esterco correspondente. A segunda carga se realizará respeitando a equivalência 1:4, um de água para 4 de esterco. Será enchido até que as bocas interiores dos tubos de entrada e saída fiquem tapadas pelo lodo, para que não entre ar no digestor e esteja em condições anaeróbicas.

4.5.6. Construção da Estufa

A construção da estrutura da estufa é importante para ajudar a manter uma temperatura constante e elevada dentro do biodigestor. A estrutura da estufa será presa com tubos de plástico nas paredes da cerca de 40 cm de altura. O biodigestor ficará totalmente vedado pela parte dianteira e traseira com paredes de adobe.

4.5.7. Construção da Linha de gás

Com relação à construção das conduções de gás, na maioria das instalações utiliza-se um diâmetro de 1/2" polegadas. A melhor solução respeito à segurança e vida útil é utilizar tubulações de ferro galvanizado, mas se seu custo é muito elevado, pode ser substituído por material plástico. Pode-se usar tubos de PVC para água ou para sistemas de irrigação, mas de alta qualidade, para evitar fissuras que deverão ser protegidas do sol. Para as conexões utiliza-se cimento para PVC de qualidade, ou através de fios e teflon.

Para o desenho das tubulações deve-se considerar: 1. Não utilizar tubos e cotovelos usados. 2. Colocar pelo menos uma válvula de segurança. 3. Nunca instalar os tubos na horizontal, sempre inclinados (em cada ponto baixo instalar um separador de água) para evitar os problemas de condensação da água nas tubulações.

Na saída da condução de biogás, depois da primeira torneira de bola, coloca-se um "T", de modo que o biogás possa fluir até a cozinha, mas à terceira saída da "T" é unicamente uma peça de tubulação introduzida na garrafa cheia de água. A tubulação deve ficar submersa na água de 8 a 13 cm, dependendo da altura sobre o nível do mar do lugar e da distância à cozinha, bem como do tipo de cozinha. Quanto maior for a altura, menor será a pressão necessária, e menos terá que estar submerso o tubo na água. Quanto maior for a distância à cozinha, maior pressão será necessária e mais submerso deverá estar o tubo. Para determinar a pressão idônea é preciso realizar testes da combustão de biogás na cozinha até o que o usuário esteja de acordo.

A válvula de segurança permite que o gás escape quando a pressão do digestor atinge um valor limite ou equivalente à coluna de água na qual o tubo está submerso (10 cm de coluna de água = 10 mbar = 0,98 kPa).

4.5.8. Produção de Biogás

A mescla de esterco com água no interior do biodigestor, na ausência de ar, produzirá biogás. Esta produção não é constante e é um processo que dura, mais o menos, o tempo de retenção estimado segundo a temperatura de trabalho. Desta forma, um quilo de esterco produzirá biogás pouco a pouco ao longo do tempo de retenção ao que está submetido.

Existem diferentes métodos para estimar a produção de biogás de um biodigestor segundo sua carga diária de esterco. A forma mais simples é aplicar dados bibliográficos como, por exemplo, valores médios da Tabela 19.

Também é possível fazer, de maneira mais exata quando os dados são conhecidos, aplicando os conceitos de "sólidos totais" e "sólidos voláteis".

A produção diária de biogás depende da quantidade de sólidos voláteis na carga de esterco e purinas, já que os sólidos voláteis representam a parte de sólidos totais suscetíveis de ser biodegradados e converter-se em biogás. Assim, para saber qual é a produção teórica de biogás é preciso saber previamente qual é a quantidade de esterco e purinas que será introduzida diariamente no biodigestor e, a partir destes valores, determinar o conteúdo de sólidos totais e sólidos voláteis. Portanto, partindo da quantidade de esterco já determinada para calcular o desenho do digestor, determinam-se os sólidos totais e os sólidos voláteis

Determinação do conteúdo de sólidos totais e voláteis: Existe uma ampla bibliografia que pode ser consultada acerca o conteúdo de sólidos totais dos esterco e purinas. Segundo os dados da Tabela 18, correspondentes à produção de biogás por kg de SV, podemos saber quanto biogás é possível produzir diariamente.

Quando se dispõe de dois tipos de animais é necessário determinar a produção de cada tipo e somá-la.

Para determinar a produção de biogás por unidade de volume do digestor, deve-se dividir a quantidade obtida entre o volume do líquido no digestor e determinar os m³ de biogás por unidade de volume de digestor e dia.

Desta forma, é possível estimar o volume de biogás que pode ser obtido por dia sempre que os tempos de retenção adequados a cada temperatura de trabalho sejam cumpridos.

4.6. Fatores que influenciam na operação e controle deste tipo de digestores

Como já foi comentado no capítulo anterior, há uma série de fatores que são importantes no funcionamento de um digestor anaeróbico. Neste somente faremos considerações de alguns desses fatores com relação a este tipo de digestores.

Com relação ao tempo de residência hidráulico, Garfi estudou a digestão anaeróbica psicrófila a temperaturas tão baixas como de 10°C e recomendou um TRH de 70 dias para um digestor anaeróbico tubular de polietileno sem homogeneização. A temperaturas próximas a 30°C, recomenda um TRH de 20 a 30 dias (Garfi et al., 2011). É importante para o desenho dos digestores que os TRH sejam suficientemente longos para que possa ocorrer a destruição dos sólidos voláteis (Vesilind, 1998).

A taxa de carga orgânica recomendada para a digestão anaeróbica de baixa velocidade (digestão sem calor e sem mescla) é de 0,5-1,6 kg VSS/(m³.d). Sharma e Pellizzi (1991) recomendam que a velocidade de carga orgânica padrão para este tipo de digestores anaeróbicos deve ser de 1,0-3,5 kg SV/(m³.d). Deve-se considerar que se a taxa de carga for muito alta para as condições do sistema, pode ocorrer a acumulação de ácidos graxos voláteis (AGV) no digestor e a parada do processo. Portanto, é muito importante que a velocidade de carga orgânica de desenho seja conservadora.

Com relação ao Fator de Segurança, concretamente nas regiões rurais dos países em desenvolvimento, pode haver flutuações na temperatura ambiente e o tempo de alimentação do substrato, limitações na supervisão do operador e falta de controle do processo. Se o digestor anaeróbico falha, provavelmente resultará no fracasso do projeto de desenvolvimento da digestão anaeróbica e a comunidade perderá a fé na tecnologia. A perda de fé em uma tecnologia pode ser importante e obstaculizar outros projetos de digestão anaeróbica futuros. É recomendável, portanto, um fator de segurança de 10 (Rittmann e McCarty, 2001; Speece, 1996).

Por outro lado, com relação à homogeneização ou mescla, nos digestores anaeróbicos de cúpula fixa e de tambor flutuante não ocorre nenhuma mescla, exceto a que resulta da formação de gás no processo da digestão, que logo se eleva a parte superior do digestor (Tchobanoglous et al., 2003). No digestor tubular, bem como em geral nos de fluxo pistão, há concentrações uniformes de substrato e microrganismos e, no caso ideal, não se produzem misturas mais adiante.

Os parâmetros de funcionamento recomendados por distintos autores para este tipo de digestores estão na **Tabela 36**.

Tabela 36: Parâmetros de funcionamento recomendados para aplicações no mundo em desenvolvimento rural

Parâmetros de Operação	Valor	Fonte
$TRS_{lim}^{min} (d)$	4	Tchobanoglous et al., 2003
Fator de Segurança	10-30	Rittmann and McCarty, 2001
TRS (d)	20-70	Garfi et al., 2011
pH	6,6-7,6	Tchobanoglous et al., 2003
OLR (kg SV/m³.d)	1,0-3,5	Sharma and Pellizzi, 1991

4.7. Programas para o desenvolvimento. Experiências de produção de biogás a partir de resíduos orgânicos em Digestores de baixo custo.

Nos países em desenvolvimento, onde a energia é escassa e cara, a digestão anaeróbica focou-se principalmente na produção de energia através das plantas de biogás.

Nos últimos anos foram realizados distintos programas de implementação de digestores, principalmente na China e na Índia, mas também em áreas como o Nepal, Tanzânia ou a região dos Andes (Peru, Bolívia).

Nos anos oitenta o ITINTEC (Instituto de Investigación Tecnológica Industrial de normas Técnicas) desenvolveu, junto com o CIPENC (Centro de Investigación e Promoção de Energias Não Convencionais), o primeiro *Programa de Investigación do Biogás no Peru*, instalando um total de 51 biodigestores, a maioria de tipo chinês, em regiões rurais. Segundo o estudo de avaliação de impacto realizado pelo ITDG (Instituto Técnico Diversificado Grajales) e o ISF (Engenheiros Sem Fronteiras), o fracasso deste projeto está no tipo de biodigestor escolhido e seu incorreto dimensionamento em função dos recursos pecuários e, principalmente, na falta de capacitação e acompanhamento dos beneficiários das instalações (Spagnoletta, 2008).

Na Bolívia, através da cooperação técnica alemã, desenvolveram-se projetos de implementação da tecnologia da biometanização como alternativa energética, cujo objetivo era beneficiar diretamente a aproximadamente 1000 famílias em 2010. Sob o conceito de democratização da tecnologia e através de várias oficinas de formação, conseguiu-se capacitar dezenas de técnicos, Organizações Não Governamentais para o Desenvolvimento (ONGD) e famílias.

Outro exemplo desta transferência tecnológica é a desenvolvida na região norte dos Andes peruanos, na qual através de um programa piloto de implementação de biodigestores familiares de baixo custo, conseguiu-se demonstrar a adaptabilidade desta tecnologia com a ajuda dos Engenheiros Sem Fronteira e da ITDG Soluções Práticas.

Com as conclusões destas experiências definiu-se o tipo de tecnologia a ser desenvolvida, um modelo de digestor tubular adaptado às condições da região andina em função da altura, temperatura, recursos pecuários e fatores socioeconômicos das diversas áreas de implementação. Trata-se de um digestor com 8 a 10m³ alimentado diariamente com 10kg de esterco fresco e 60 litros de água, produzindo 80 litros de fertilizante (digerido) diários. Em razão da climatologia local, são instalados sob uma cobertura que funciona como estufa, a fim de manter a temperatura constante. As instalações básicas possuem, também, um tanque de armazenamento (reservatório ou gasômetro) com 1 a 2 m³, uma válvula de segurança e dois fogareiros.

O INIA (Instituto Nacional de Inovação Agrária de Cajamarca – Peru), junto com i ITDG e seus sócios (ISF, UPC, Green Empowerment), apostaram na construção de uma pequena planta piloto com 4 sistemas para desenvolver trabalhos de pesquisa, a fim de estudar e parametrizar o processo de criação de modelos mais adaptados às distintas condições climatológicas e caracterizar os diversos tipos de fertilizantes. Os resultados, junto com os modelos de gestão apropriados às características socioeconômicas da região, permitirão uma apropriação tecnologia por parte das famílias das áreas mais desfavorecidas.

Ademais, conseguiu-se criar uma rede sul-americana de fortalecimento tecnológico na qual estão envolvidos diversos agentes internacionais especializados na pesquisa e cooperação ao desenvolvimento de mais de 10 países, cuja missão é promover a pesquisa aplicada à biodigestão anaeróbica como ferramenta para melhorar o bem-estar da população da América Latina e do Caribe.

4.7.1. Experiências em SIDS. Tomando o biogás para Samoa (SIDS Action Platform)

Em Samoa, uma ideia de projeto inovadora, transformou um desafio ambiental em uma fonte de energia. Samoa fez um projeto para transformar Merremia invasiva, outras ervas daninhas invasoras e resíduos agrícolas verdes em energia renovável na forma de biogás.

Como muitos estados das ilhas do Pacífico, Samoa depende fortemente de combustíveis fósseis para geração de energia; aproximadamente 69% da produção nacional de energia vem de geradores a diesel. Esta é uma solução cara para os países insulares que pagam altos preços para enviar combustível para as costas locais. Além disso, a energia baseada em combustíveis fósseis é altamente poluente e as emissões de CO₂ contribuem para a mudança climática, para a qual os Estados insulares, como Samoa, são vulneráveis; aumento do clima extremo e aumento do nível do mar. Esta é a razão pela qual Samoa está procurando soluções de energia sustentável que sejam acessíveis para sua população e com baixo impacto ambiental e baixas emissões de gases de efeito estufa.

Samoa enfrentou a rápida disseminação da invasora Merrimia, uma videira que já matou mais de 60% das florestas de Samoa. Mas a videira, como a biomassa que é, também pode ser potencialmente combustível para a bioenergia. Samoa desenvolveu sistemas de energia de biogás alimentados pela vinha e outros resíduos verdes que foram eliminados pela queima. O objetivo foi demonstrar a viabilidade das soluções de biogás na ilha e, ao mesmo tempo, impedir a propagação da videira invasora.

Sala Sagato, sub diretor executivo da Divisão de Energia Renovável do Ministério de Recursos Naturais e Meio Ambiente de Samoa, tinha grandes expectativas em relação ao projeto de biogás da Merremia. *"Ser capaz de oferecer soluções de biogás para as famílias e o setor privado aqui em Samoa é uma maneira de fornecer às pessoas soluções energéticas limpas e acessíveis que ao mesmo tempo resolvem o problema da videira invasora Merremia. O projeto também oferecerá gerenciamento alternativo para resíduos, reduzirá a queima de resíduos verdes e fornecerá fertilizantes orgânicos para o setor agrícola"*(UNDP, 2014).

O projeto de biogás surgiu do projeto regional chamado PIGGAREP - Redução de gases de efeito estufa nas Ilhas do Pacífico através do Projeto de Energia Renovável. O projeto foi financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) como a agência executora e o Secretariado do Programa Regional do Meio Ambiente do Pacífico (SPREP) como associado na execução. O projeto cobriu onze países insulares do Pacífico e forneceu estudos de viabilidade, treinamento, conscientização e projetos de energia renovável em todo o Pacífico desde 2008.

Em 2012, foram fornecidos fundos para um projeto de demonstração em Piu Village para mostrar que uma videira invasora (merremia) poderia ser um recurso para produzir biogás que poderia ser usado na culinária e na iluminação de casas de aldeia. Este sistema de demonstração foi instalado no início de 2013 pela BioEnceptionz Ltd de Wellington, Nova Zelândia. (BioEnceptionz é uma empresa social sem fins lucrativos especializada em mostrar o potencial dos sistemas de bioenergia nas ilhas do Pacífico). Este projeto cumpriu com sucesso seus objetivos e desde então tem crescido com o aumento do investimento de outros parceiros do governo.

Em 2013, iniciou-se a construção do Resource Testing and Community Engagement Center para realizar pesquisas sobre biodigestores. O Centro fornece a Samoa a capacidade de testar e catalogar metodicamente o potencial do biogás a partir de uma ampla gama de possíveis materiais que podem ser usados em biodigestores para produzir biogás, mesmo para operações em escala comercial. Essas matérias-primas incluem "resíduos verdes", como gramíneas, videiras, folhas e restos de comida e, além disso, resíduos de culturas (como folhas de taro), resíduos de processamento de culturas e abundantes produtos agrícolas com baixo valor de mercado. O aspecto "engajamento da comunidade" deste centro está em ver as tecnologias de biodigestores em operação e no uso do biogás. O biogás pode ser usado como um recurso de combustível gratuito para cozinhar para o local de acolhimento e grupos comunitários de caridade. Para manter um fornecimento constante de biogás, além das células de teste de biogás, o centro incluirá um digestor que pode ser alimentado com resíduos de alimentos do próprio centro e alguns restaurantes locais. O setor do turismo é crucial para a economia de Samoa e para seu desenvolvimento econômico. No entanto, isso é dificultado pelo alto custo de energia em Samoa. Apoiar a apresentação de abordagens viáveis para que o setor do turismo tenha energia renovável acessível é de grande interesse para a Autoridade de Turismo de Samoa. Este projeto é sobre desenvolvimento sustentável, energias renováveis e melhoria dos meios de subsistência. O objetivo é conseguir um projeto comercialmente viável para atrair mais parceiros e ser capaz de fazê-lo nos SIDS. O objetivo estratégico é apoiar o desenvolvimento sustentável, proporcionar crescimento às empresas, melhorar o sustento das pessoas e garantir que o meio ambiente não seja danificado. O projeto Biodigester cumpre isso.

A próxima etapa do projeto foi estendida de abril de 2014 a 2015 e seu objetivo foi dobro. Por um lado, fornecer um biodigestor de resíduos verdes em um tanque de plástico de 5000 litros que produza biogás que pode ser usado para alguns fins no próprio local, por exemplo, cozinhar e aquecer a água em um viveiro de Women in Business (WIB). WIB é uma organização que ajuda agricultores sustentáveis a exportar produtos orgânicos e a contribuir para o PIB de Samoa. Por outro lado, poderia ser um passo em direção a um projeto mais grande, construir um biodigestor que armazene pelo menos 60 metros cúbicos de biogás. Uma questão fundamental foi saber quantos metros cúbicos por dia de biogás podem ser produzidos a partir de um determinado tamanho de digestor para as matérias-primas que provavelmente serão misturadas nesta aplicação. Para isso, um bom conhecimento foi obtido a partir dos resultados do maior digestor do Resource Testing Center. O desejo é atrair parceiros para outros SIDS na segunda fase do projeto.

O Ministério de Recursos Naturais e Meio Ambiente de Samoa tem um grande interesse na aplicação de tecnologias de biodigestores. Eles dirigiram dois estudos de viabilidade apoiados pelo programa de água e saneamento financiados pela UE e pelo setor de operações da FAO na ONU em Samoa. Os dados do "potencial de biogás", que virão do programa de análise de recursos, fornecerão informações muito necessárias sobre as circunstâncias de Samoa para uma ampla gama de possíveis aplicações dos biodigestores. Samoa Biogas Systems, chamada BioEnceptionz, é uma entidade com

sede na Nova Zelândia que opera sob os princípios de uma empresa social sem fins lucrativos. Eles concebem, planejam com governos e doadores anfitriões e implementam estudos de viabilidade que envolvem sistemas avançados de biomassa e energia baseados em resíduos adequados para as ilhas do Pacífico e outros países em desenvolvimento. Eles fornecem evidências da aplicabilidade técnica e econômica das tecnologias. Estão envolvidos no desenvolvimento de modelos de negócios financeiros que podem ser usados por empresas locais quando esses novos sistemas são implementados.

Resumo do Capítulo 4

Desde que Luo Guou (1921), Matunga Leper (1987) e Jean-Louis Mouras (1881) construíram os primeiros digestores na China, Índia e França, respectivamente, com o passar dos anos a tecnologia foi evoluindo muito graças aos avanços na pesquisa, levando a um conhecimento mais profundo do processo tanto a nível microbiológico, quanto dos parâmetros que regulam esta fermentação, o que permitiu progredir muito em aspectos tecnológicos e melhorar consideravelmente sua eficácia.

Uma primeira classificação dos digestores atende à frequência de carga, de modo que os digestores podem ser descontínuos, semi-contínuos e contínuos. Estes últimos são os mais desenvolvidos.

Atendendo ao grau de desenvolvimento tecnológico, podem ser estabelecidos dois grupos, os digestores de pequena escala e baixo custo, que são utilizados principalmente em regiões rurais de países em desenvolvimento, e o grupo constituído por digestores de tecnologias mais avançadas, que serão abordados no capítulo posterior.

O grupo de digestores de pequena escala e baixo custo está constituído por três modelos de digestor: os digestores de cúpula fixa (modelo chinês), digestores de tambor flutuantes (modelo hindu) e digestores tubulares de polietileno (modelo taiwanês). Para que estas plantas sejam bem sucedidas, pelo menos três fatores básicos limitantes devem ser atendidos: a disponibilidade de água para fazer a mistura com o esterco que será introduzido no digestor, a quantidade de matéria-prima, e a aceitação e gestão correcta da tecnologia pelas comunidades onde são implementadas. De fato, um dos requisitos necessários para o design dos biodigestores é a simplicidade, tanto na execução do trabalho como na sua gestão e manutenção (Gómez et al, 2010). Do ponto de vista prático, aportou-se informação sobre o desenho e construção de um digestor tubular de polietileno. Escolheu-se este modelo por ser de construção simples e econômica (Preston, 2002), e por o mais utilizado na ALC.

A biodigestão a escala familiar difundiu-se muito em países como a China e a Índia desde o século passado, e mais recentemente no Nepal, Tailândia, América Latina e África do Sul. Nos últimos anos foram realizadas experiências em alguns países, principalmente na China e na Índia, mas também em outras regiões como Nepal, Tanzânia e a Região Andina (Peru-Bolívia), nas quais se desenvolveram programas de implementação de biodigestores. Especificamente, muitos programas e projetos, através de organizações de cooperação internacional, desenvolvem alternativas tecnológicas apropriadas que possibilitam o acesso a uma energia limpa e segura na região andina (Peru-Bolívia).

No que diz respeito aos SIDS, em Samoa, uma ideia de projeto inovadora transformou um desafio ambiental em um ativo energético. Samoa realizou um projeto para converter a videira invasora Merremia, outras ervas daninhas invasoras e resíduos agrícolas verdes em energia renovável na forma de biogás.

Samoa enfrentou a rápida disseminação da invasora Merremia, uma videira que já matou mais de 60% das florestas de Samoa. Mas a videira, como a biomassa que é, também pode ser potencialmente combustível para a bioenergia. Samoa desenvolveu sistemas de energia de biogás

alimentados pela vinha e outros resíduos verdes que foram eliminados pela queima. O objetivo foi demonstrar a viabilidade de soluções energéticas na ilha, através da produção de biogás, e, ao mesmo tempo, impedir a propagação da vinha invasora.

Em 2012, foram destinados fundos para um projeto de demonstração no Piu Village para mostrar que uma videira invasora (merremia) poderia ser um recurso para produzir biogás que poderia ser usado para cozinhar e a iluminação de casas das aldeias. Em 2013, a construção do Centro de Testes de Recursos e Engajamento Comunitário começou a realizar pesquisas sobre biodigestores. O centro fornece a Samoa a capacidade de testar e catalogar metodicamente o potencial de biogás de uma ampla gama de matérias-primas possíveis que podem ser usadas em biodigestores para produzir biogás, e mesmo em operações de escala comercial.

A próxima etapa do projeto foi estendida de abril de 2014 a 2015 e seu objetivo foi dobro. Por um lado, fornecer um biodigestor de resíduos verde que produza biogás que possa ser usado para alguns fins no próprio local, por exemplo, cozinhar e aquecer a água em um viveiro de Women in Business (WIB). A WIB é uma organização que ajuda mulheres agricultoras sustentáveis a exportar produtos orgânicos e a contribuir para o PIB de Samoa. Por outro lado, poderia ser um passo em direção a um projeto mais grande, construindo um biodigestor que armazene pelo menos 60 metros cúbicos de biogás. Uma questão fundamental foi saber quantos metros cúbicos por dia de gás podem ser produzidos a partir de um determinado tamanho de digestor para as matérias-primas que provavelmente serão misturadas nesta aplicação. Para isso, um bom conhecimento foi obtido a partir dos resultados do maior digestor do Resource Testing Center. O desejo é atrair parceiros para outros SIDS na segunda fase do projeto.

5. Tecnologias anaeróbicas avançadas

Como visto, em função do sistema de carga os digestores anaeróbicos podem ser classificados em descontínuos, semi-contínuos e contínuos. Nestes últimos, a carga e descarga são realizadas de forma contínua. Por não existir paradas, apresentam um rendimento muito maior. Estes sistemas foram os mais estudados, desenvolvendo-se novas tecnologias.

Nos últimos anos ocorreu um grande avanço no conhecimento do processo, tanto a nível microbiológico, quanto dos parâmetros que regulam a degradação, o que produziu consideráveis avanços na melhoria da eficácia do processo. O principal objetivo destes digestores, também chamados Alta Velocidade, é tratar os resíduos de forma eficiente e econômica. Atualmente existe um grande número de tecnologias adaptadas ao tratamento dos resíduos por digestão anaeróbica. A escolha de uma ou outra depende principalmente do resíduo a ser tratado.

Como já foi visto, em função do sistema de carga os digestores anaeróbicos podem ser classificados em descontínuos, semi-contínuos e contínuos. Nestes últimos, a carga e descarga são realizadas de forma contínua. Por não existir paradas, têm um rendimento muito maior. Estes sistemas foram os mais estudados dos últimos anos, desenvolvendo-se novas tecnologias.

No presente capítulo são apresentadas as principais tecnologias anaeróbicas avançadas, isso é, que tem maior velocidade de degradação. Estas, por sua vez, se dividem com base em como estão os microrganismos no digestor e a separação de fases. Mostram-se seus desenhos e características, bem como suas aplicações em função do resíduo.

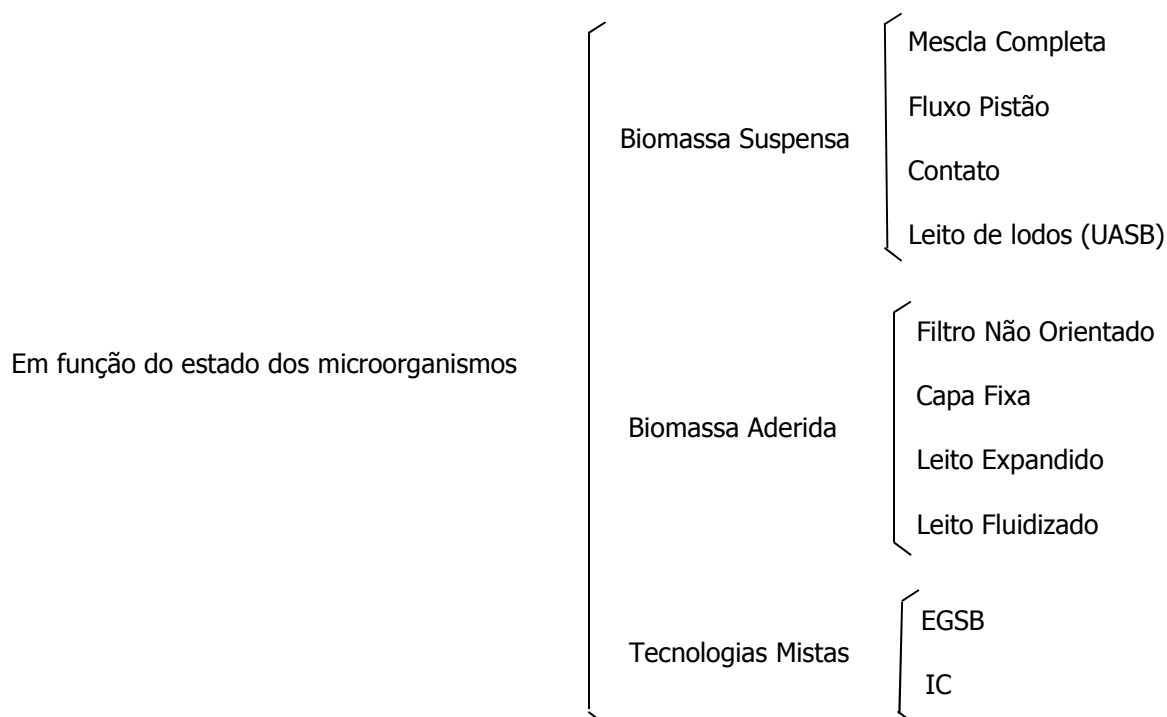
5.1. Interação entre substrato, nutrientes e microrganismos

Devido à complexidade apresentada por muitas águas residuais, por sua composição química e a presença de organismos diversos na maior parte dos casos, é conveniente para o estudo racional do tratamento considerar vários aspectos fundamentais dentre os quais cabe destacar as interações microbianas. O objetivo primário do tratamento da água residual é eliminar a matéria orgânica presente, e isto é possível facilitando o desenvolvimento, em condições naturais, de populações microbianas, e não de um microrganismo específico.

Ainda que exista a possibilidade de um plantio selecionado, em certos casos de tratamentos deve-se considerar quase sempre que existem populações microbianas heterogêneas. Estas são normalmente uma mistura muito complexa de diferentes gêneros e espécies de bactérias. A concentração dos componentes biológicos destas populações não é constante. Há flutuações no tempo que podem ser muito drásticas. Ainda que os processos de tratamento biológico possam tolerar certas variações, existem limites que produzem, quando excedidos, fracassos no processo. Por outro lado, no que se refere à interação entre substratos, está sendo desenvolvida a codigestão de resíduos orgânicos, o que permite o tratamento de misturas com outros resíduos para otimizar a produção energética, facilitando assim a gestão integral de resíduos orgânicos na região de aplicação. A principal vantagem da codigestão está em aproveitar a sinergia das misturas e compensar carências de cada um dos substratos separadamente.

As tecnologias dos digestores anaeróbicos variam muito com relação à complexidade e desenho. Demonstrou-se que apenas um desenho não é adequada para distintos efluentes. A velocidade de carga orgânica máxima de um processo anaeróbico está limitada pelo tempo de retenção e pela atividade dos microrganismos envolvidos nos mecanismos bioquímicos de degradação da matéria orgânica. Já que as bactérias que formam o metano têm uma velocidade de crescimento baixa, a

retenção dos microrganismos é a chave da operação dos digestores anaeróbicos avançados, que permitem operar com baixos tempos de retenção hidráulicos (TRH) e elevados tempos de retenção sólidos (TRS). As técnicas utilizadas atualmente se baseiam na propriedade das bactérias de formar flocos por união com outras bactérias, ou de aderir-se sobre superfícies sólidas. Cada um destes grupos está constituído, por sua vez, por distintos tipos de digestores. Por outra parte, já que o processo de digestão anaeróbica ocorre em varias fases nas que intervêm diferentes microrganismos, que atuam com distintas velocidades, também surgiu a tecnologia de digestores em Duas Fases com o fim de favorecer cada etapa por separado. A **Figura 13** mostra as principais tecnologias existentes.



Realiza-se a separação de fases do processo: Digestores em Duas Fases (dois digestores)

Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

Figura 13: Classificação das tecnologias dos digestores anaeróbicos

Alguns autores classificam estas Tecnologias de Alta Velocidade como: Digestores de Primeira Geração (Mescla Completa, Fluxo Pistão e Contato), de Segunda Geração (UASB, Filtro Não Orientado, Camada Fixa, Leito Expandido e Leito Fluidizado) e de Terceira Geração (híbridos dos digestores de segunda geração – alguns com mais funções) (Abassi et Tauseef, 2012).

5.2. Tecnologia dos digestores anaeróbicos de Biomassa Suspensa

Os digestores de biomassa suspensa são os que se desenvolvem primeiro. Neles os microrganismos (a biomassa microbiana) estão em crescimento livre ou suspenso e "flutuando", isso é, não estão fixos a nenhum suporte. Por sua vez, este grupo está constituído por distintos tipos de digestores que podem ser classificados, de menor a maior grau de complexidade técnica, em digestores de: Mescla Completa, Fluxo Pistão, Contato anaeróbico e Leito de Lodos. A seguir se descreve cada um deles.

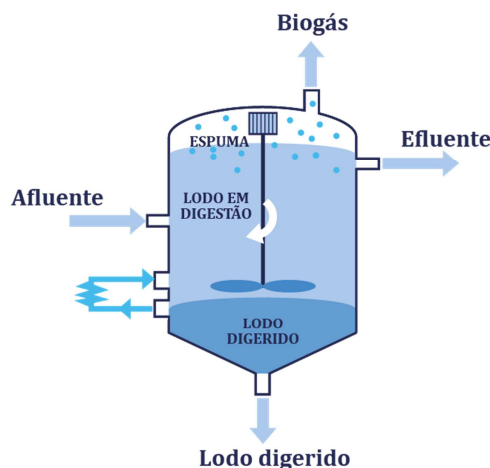
5.2.1. Digestor de Mescla Completa ou CSRT

Os digestores de Mescla Completa, ou também chamados CSTR (continuously stirred tank reator), em inglês, são tecnicamente simples. Caracterizam-se por dispor de um sistema para mesclar o conteúdo do digestor de forma contínua ou periodicamente. A mescla pode ser produzida de forma mecânica, hidráulica ou pneumaticamente, neste último caso ocorre a compressão e aborbulhamento do biogás. A mescla por gás é preferível em grandes digestores. A eficiência do tratamento de um CSTR melhor através do aquecimento do conteúdo do digestor com um sistema de controle de temperatura adequado (Abbasi et al, 2012). Geralmente possuem calefação para manter a temperatura do lodo em digestão na gama mesófila (35-37°C). Estes digestores funcionam de forma semi-contínua ou contínua, isso é, o resíduo é alimentado de forma periódica (semi-contínuo) ou continuamente ao digestor. Em alguns casos, dependendo do resíduo a ser tratado, são periodicamente expurgados. Ao isolar o digestor e misturar o conteúdo, é possível instalar digestores de grandes capacidades, por exemplo, até 5.000m³ (Walfer, 2008).

Não há retenção da biomassa suspensa, nem recirculação de lodos, o que representa que seus tempos de retenção de sólidos (TRS), o tempo que os sólidos permanecem dentro do digestor, são iguais a seus tempos de resistência hidráulica (TRH) e, portanto, estes devem ser altos (15-30 dias). Segundo Rittman e MacCarty (2001), o mínimo TRH para um digestor de mescla completa anaeróbico a 35°C é de 10 dias. O tempo de arranque oscila entre 30 e 90 dias.

Na superfície se costuma formar uma camada de espuma favorecida pelo biogás que sobe arrastando lodos e flutuantes. Normalmente, para misturar o conteúdo do digestor e romper ou evitar as crostas que podem ser formadas, utilizam-se agitadores mecânicos e/ou uma recirculação de biogás. Os segundos têm a vantagem de que não precisam abrir o digestor para sua manutenção. Geralmente possuem aquecimento para manter a temperatura do lodo em digestão na gama mesófila (35-37°C). Periodicamente são removidos o sobrenadante e o lodo digerido.

Um esquema de um digestor com estas características está na **Figura 14**.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

Figura 14: Esquema de um digestor de Mescla Completa

As concentrações de biomassa ativa (anaeróbica) que podem ser conseguidas são limitadas, o que representa que as cargas volumétricas e as produções de gás nestes digestores são baixas. Conseguem-se cargas volumétricas no processo de 1-6kg DQO/m³/d. A concentração de sólidos oscila

entre 2-5 g SSV/l, no interior, e 25-100 g SS/l, no efluente. Utilizam-se principalmente para resíduos com alta concentração de sólidos em suspensão (2-8%) como, por exemplo, resíduos pecuários e lodos de depuradoras.

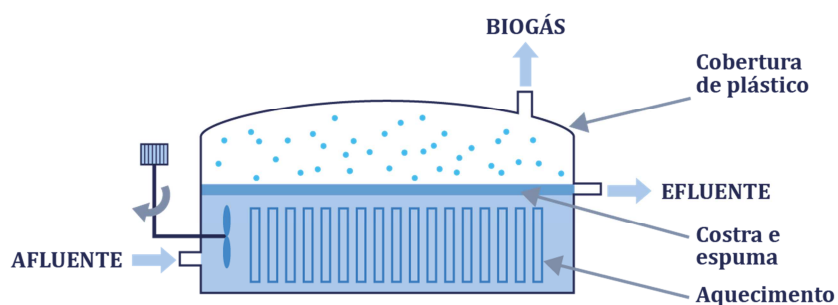
5.2.2. Digestor de Fluxo Pistão

Os digestores de fluxo pistão estão constituídos por canais escavados no terreno e cobertos geralmente com plástico, que serve ao mesmo tempo como depósito do biogás e como isolamento térmico (veja-se a **Figura 15**).

Tecnicamente são parecidos aos de mescla completa e seus parâmetros de operação são similares a estes. São digestores simples que não têm retenção de biomassa suspensa, nem recirculação de lodos, o que representa que os TRH são altos (20-30 dias) e iguais aos TRS.

Nestes digestores existe um fluxo horizontal das substâncias dentro do digestor através de agitação mecânica lateral ou de injeção, devido à entrada do afluente, seja pulsante ou contínua. Possuem aquecimento,

Possuem aquecimento, bobina interior para manter a biomassa a 35-37°C. Um problema típico destes digestores é a formação de espumas e crostas que dificultam o desprendimento do biogás e a degradação dos sólidos em suspensão. Este tipo de digestor é utilizado no tratamento de resíduos pecuários, isso é, resíduos que já contém um inoculo de microrganismos anaeróbicos (Carreras, 2010).



Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

Figura 15: Esquema de um digestor de Fluxo Pistão

5.2.3. Digestor de Contato

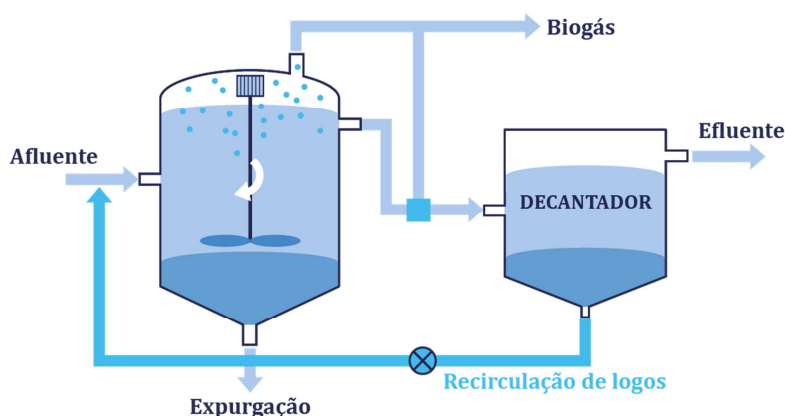
Nos digestores CSTR (como nos de baixa velocidade descritos no Capítulo 5) parte da população microbiana sai do digestor junto ao efluente. Acredita-se que se a perda de população microbiana pudesse ser compensada, em outras palavras, se o tempo de residência de sólidos (TRS) pudesse ser melhorado, inclusive quando o tempo de residência hidráulico fosse menor (TRH), ocorreria uma maior concentração de microorganismos no digestor, tornando a digestão muito mais eficiente.

Para conseguir isso, nos digestores de contato existe uma separação e recirculação de população microbiana (lodos) do efluente com a alimentação do digestor por meio de um decantador (**Figura 16**). Assim, consegue-se aumentar a concentração de biomassa (sólidos) no digestor e reduzir, portanto, o TRH. Consequentemente, como o TRS é superior ao TRH, aumenta a eficácia do processo. O rendimento do digestor depende principalmente da eficiência com a qual os microrganismos e as SS são decantados. Por outro lado, periodicamente, em função das

características do resíduos, pode ser necessário expurgar o digestor para evitar a acumulação de sólidos não biodegradáveis.

Os tempos de residência hidráulicos destes digestores oscilam entre 2 e 6 dias. A concentração de biomassa no digestor é de 4-6 g/L, com concentrações máximas que podem chegar a 25-30 g/L, dependendo da decantação do lodo. A velocidade de carga é de 0,5-10 kg DQO/m³.día (Abbasi et al., 2012). O TRS requerido poderia ser mantido através do controle da velocidade de reciclagem. O tempo de arranque oscila entre 20 e 60 dias, a concentração de sólidos é de 5 e 10 g SSV/L no interior e de 0,5 e 20 g de SS/L no efluente (Carreras, 2010).

O processo é adequado para os resíduos de leite, resíduos de beterraba, etc.. A dificuldade na obtenção de uma boa sedimentación (Steffe 1961; Van den Berg y Lentz 1979).



Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

Figura 16: Esquema de um digestor de Contato

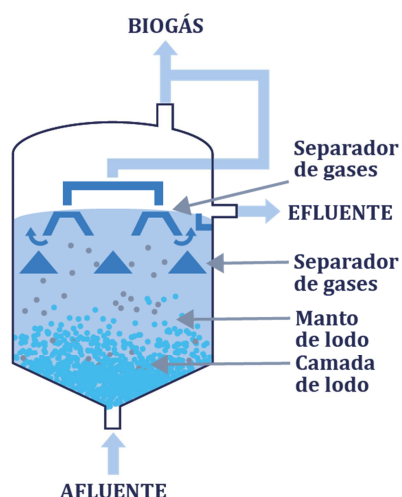
5.2.4. Digestor de Leito de lodos ou UASB

Desenvolvimentos posteriores do desenho de digestores anaeróbicos concentraram-se na retenção da microfibras ativa dentro do digestor, independente do fluxo, e sem o uso de procedimentos de reciclagem (Colleran et al., 1983). Estes reatores de biomassa "retida" incluem o digestor Leito de Iodos ou UASB e os digestores: filtro anaeróbico e fluxo ascendente (FAFA), capa fixa de fluxo descendente (PFFD), leito fluidizado (LF) e leito expandido (LE). Os digestores FAFA, PFFD, LF e LE se baseiam na propensão das bactérias, especialmente os metanógenos, para aderir-se à superfície de materiais de suportes inertes que asseguram sua retenção dentro do digestor (Evans et al., 2009) e serão visto na seguinte seção. O desenho UASB depende da agregação da flora de ativos em grãos densos que é retida no reator durante períodos extremamente longos, pela operação de um dispositivo separador de gás – líquido – eficiente (Lettinga et al., 1980).

O principal problema associado com os digestores de Filtro Anaeróbico é a obstrução dos filtros pelo crescimento das bactérias em suspensão. A fim de superar esta situação, desenvolveu-se o digestor UASV. Seu descobridor foi Gaetze Lettinga, que substituiu os suportes sólidos dos digestores de Filtro Anaeróbico (FA) por um dispositivo de coleta de gases (**Figura 17**) para evitar o tipo de tamponamento do suporte pelo crescimento das bactérias em suspensão que ocorre nos digestores FA (Lettinga, et., al 1983). Nos digestores de Leito de Lodos, também conhecidos como UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) por suas siglas em inglês, a biomassa microbiana ativa forma grãos densos, que são muito sedimentáveis (Abbasi e Abbasi, 2010). O resultado é que é alcançada uma concentração muito alta de biomassa ativa por unidade de volume do digestor.

Os digestores UASB podem operar em altas velocidades de carga de DQO e proporcionar o tratamento adequado a menores TRH do que os que podem ser obtidos com os digestores FA. Os principais requisitos a serem reunidos neste tipo de digestor são: lodos com boas características de sedimentabilidade, dispositivos de separação gás-líquido-sólido e um sistema que uniformize a entrada do afluente na base do digestor, um adequado coletor de efluente. A alimentação entra através da parte inferior do reator e flui até a parte de cima. Depois de passar através do lodo granulado ativo, a água residual tratada passa através de um dispositivo de separação de gás-líquido-sólido. Este dispositivo separa os sólidos (grãos) a partir do efluente líquido e também separa as bolhas de gás a partir do efluente. Do digestor sai o efluente líquido enquanto os lodos sólidos se assentam novamente no digestor e o gás é coletado pelo coletor de gás.

A chave do rendimento dos digestores UASB é a qualidade dos grãos do lodo (Hulshoff Pol, et al., 2004; Aiyuk, et al., 2006; Durai y Rajasimman, 2011). Enquanto alguns resíduos produzem um lodo granulado com bastante facilidade (resíduos que contém principalmente ácidos voláteis e resíduos da elaboração de açúcar), outros resíduos desenvolvem este lodo granulado muito lentamente e alguns não o desenvolvem. Portanto, isto constitui o principal objetivo desta tecnologia UASB. Quando se inocula uma grande quantidade de lodo granular em um digestor que não funciona bem, costuma ajudar. O lodo conserva suas características na maior parte das vezes com um determinado tipo de resíduos, mas nem sempre quando se troca um resíduo por outro (O'Flaherty et al 2006; Ward et al 2008).



Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

Figura 17: Esquema de um digestor UASB ou Leito de lodos

Os mecanismos de formação de grãos de alta densidade encontrados nos digestores UASB podem ser biológicos ou físico-químicos. No primeiro caso, escolhem-se bactérias que granulam e, no segundo, utilizam-se precipitantes (sulfuroso, carbonatos). Na zona inferior se desenvolve uma camada de lodo concentrado (4-10%) com boas características de sedimentabilidade. Sobre essa camada se desenvolve uma camada de crescimento bacteriano mais disperso (manto de lodos) na qual os sólidos apresentam velocidades de sedimentação mais baixas. A concentração de lodos nessa zona é de 1,5 a 3%. O sistema de agitação dá-se por auto-mescla, pelo movimento ascendente das bolhas de gás e do fluxo do influente através do digestor. A velocidade de subida do influente é de 0,05 a 3m/h.

O digestor UASB é essencialmente um sistema de crescimento em suspensão no qual se mantém uma adequada taxa de cargas hidráulicas e orgânicas a fim de facilitar a agregação da biomassa densa, processo conhecido como granulação. O tamanho dos grãos é de aproximadamente 1-3mm

de diâmetro. Devido a que os grãos são maiores em tamanho e peso, sedimentam-se e são mantidos dentro do digestor. A concentração de biomassa no digestor pode chegar a 50 g/L. Portanto, é possível conseguir um TRS muito alto, inclusive a um TRH muito baixo, de 4 horas.

O tempo de residência hidráulica para estes digestores é de 1 a 2 dias. É possível conseguir cargas volumétricas maiores do que no processo de contato (de 10 a 30 kg DQO/m³d). O tempo de arranque oscila entre 30 e 60 dias e a concentração de sólidos é de 20 a 40 g SSV/l no interior e de 0 a 5 g SS/l no efluente (Carreras, 2010).

Utilizam-se para o tratamento de distintas águas residuais agroindustriais como: alcooleiras, fábrica de leveduras, cervejarias, fábricas de café, fábricas de conserva, elaboração de açúcar, destilarias, laticínios, papelarias, etc.

5.3. Tecnologia dos digestores anaeróbicos de Biomassa Aderida

Estes digestores se caracterizam por ter em seu interior um manto de material inerte que serve como suporte aos microrganismos. Estes formam uma camada de biomassa aderida e, parte deles, ficam retidos nos interstícios do manto. O fluxo do afluente, através destes interstícios, gera a mistura e o contato entre afluente e biomassa, produzindo a depuração da água residual.

Os requisitos do suporte são:

- Estruturalmente resistente: para suportar seu próprio peso, mais o peso dos sólidos.
- Biológica e quimicamente inertes: para que não existam reações entre o leito e os microrganismos.
- Alta superfície específica: para que haja maior aderência de sólidos biológicos, o que permite a acumulação de grande quantidade de biomassa, melhorar o contato entre o afluente e os sólidos biológicos e, portanto, o incremento do TRS.
- Elevada porosidade: com o que se reduz a possibilidade de obstrução.
- Forma não achatada ou lisa: para garantir uma porosidade elevada e atuar como barreira física evitando a saída de sólidos com o efluente.
- Baixo custo: já que do ponto de vista econômico, dá maior viabilidade ao processo.

Estes digestores podem ser classificados conforme se em seu interior o suporte está fixo ou não: superfícies fixas ou móveis. A **Ilustração 4** mostra distintos tipos de suportes fixos utilizados.



Ilustração 4: Alguns suportes fixos utilizados.

5.3.1. Biomassa aderida a superfícies fixas

Os materiais utilizados como suporte são variados. O mais utilizado é o PVC (policloruro de vinilo) ainda que também se utilizem materiais cerâmicos, esferas de polietileno, granito, etc. Devem ter muita porosidade e uma superfície específica com 100 a 200 m²/m³ (Carreras, 2010). Uma vez introduzidas as águas residuais no digestor, desenvolve-se uma capa de micróbios na superfície do suporte. Ainda que não sejam possíveis cargas muito elevadas (5-15 kg DQO/m³.d) são digestores muito estáveis. Os tempos de residência hidráulica se parecem aos de tecnologia UASB, oscilam entre 0,5 e 3 dias. O tempo de arranque é de 20 a 70 dias e a concentração de sólidos é de 10 a 20 g SSV/l no interior do digestor e de 0 a 10 g SS/l no efluente.

Por sua vez, dentre estes podemos diferenciar dois tipos: Filtros Não Orientados e Filtros Orientados ou de Camada Fixa.

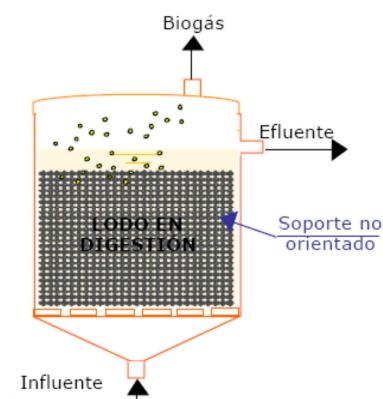
Filtros anaeróbicos Não Orientados

Estes digestores estão constituídos por uma coluna vertical preenchida com material inerte (suporte) colocado de modo aleatório. A granulometria deve ser uniforme, com diâmetros de 4 a 7 cm. A **Ilustração 5** mostra um tipo de suporte fixo utilizado em digestores espanhóis.



Ilustração 5: Suporte fixo utilizado em digestores espanhóis.

São de fluxo ascendente, isso é, têm a entrada do afluente pela parte inferior do digestor, o que permite uma melhor retenção dos microrganismos (**Figura 18**).



Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

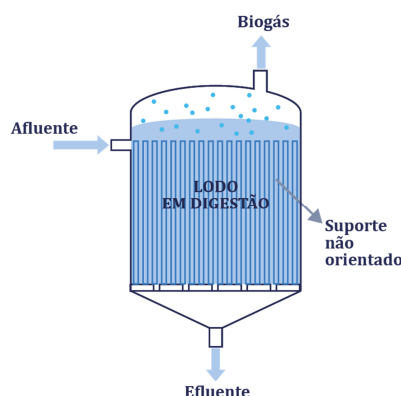
Figura 18: Esquema de um digestor de Filtro Não Orientado

O processo é particularmente adequado para resíduos solúveis diluídos ou resíduos com materiais suspensos facilmente degradáveis. As vezes apresentam problemas de colmatção e de caminhos preferenciais (Young, J.C., and Dahab, M.F., 1983).

Filtros Orientados ou de Camada Fixa

Este digestor foi desenvolvido para evitar os problemas que tinham os FA devidos à acumulação de sólidos no suporte e a consequente colmatagem do digestor. O suporte é semelhante aos FA, mas neste caso o suporte inerte forma blocos e é colocado em uma posição orientada, não aleatória, dentro do digestor (**Figura 19**). São de fluxo descendente, os resíduos entram pela parte superior e fluem para baixo.

A formação e estabilidade da capa de biomassa ativa na superfície do suporte do digestor é importante (Murray, WD y Van Den Berg, L., 1981).. Os digestores PF são capazes de tratar uma ampla variedade de resíduos, dos diluídos aos razoavelmente concentrados (Kennedy, KJ y Vander Berg, I., 1982; Sharma, K., et al 2009).



Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

Figura 19: Esquema de um digestor de Camada Fixa

5.3.2. Biomassa aderida a superfícies móveis

Estes digestores contêm um manto de material inerte de pequeno tamanho (de 0,3 a 3 mm) que se estende pela velocidade de ascensão do afluente (Van Haandel, A. et al. 2006). O material inerte pode estar composto por diversos materiais, como areia ou PVC, e deve ter uma superfície muito elevada, entre 1.000 e 4.000 m²/m³ (Carreras, 2010). A **Ilustração 6** mostra um tipo de suporte móvel utilizado em digestores espanhóis. A sepiolita é um dos materiais mais utilizados. Nestes digestores as bactérias colonizam estas pequenas partículas formando um leito através do qual circula o líquido que será depurado. Na parte superior do digestor se localiza um sedimentador para evitar a saída de partículas de lodo com o efluente.

Estas tecnologias podem suportar cargas elevadas (10-40 kg DQO/m³.d) e utilizam tempos de residência hidráulica de 5 a 20 horas. Estes digestores têm um tempo de arranque de 30 a 70 dias e uma concentração de sólidos no efluente de 0 a 5 g SS/L. A expansão do leito melhora o contato afluente-biomassa e evita problemas de obstruções, como as vezes ocorre nos Filtros anaeróbicos. O preenchimento não expandido ocupa cerca de 10% do volume do digestor. Para conseguir uma melhor expansão, o desenho destes digestores é mais estilizado do que os anteriores, sendo menor a relação diâmetro/altura.

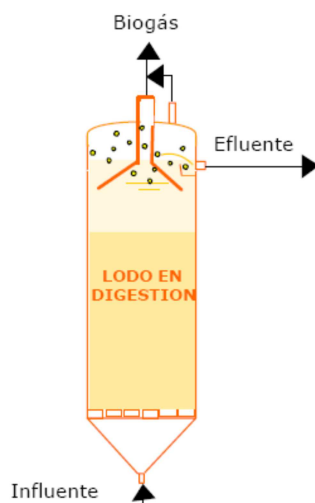
Em função do grau de expansão das partículas no interior do digestor, em virtude da velocidade de ascensão aplicada ao afluente, existem dois tipos de digestores: Leito Expandido e Leito Fluidizado.



Ilustração 6: suporte móvel utilizado em digestores espanhóis.

Leito Expandido

Considera-se de leito expandido quando possui uma expansão de 15-30% (**Figura 20**). Nestes digestores a velocidade de ascensão do afluente é de 2 a 10 m/h e a concentração de sólidos no interior do digestor, de 10 a 30 g SSV/L (Carreras, 2010).

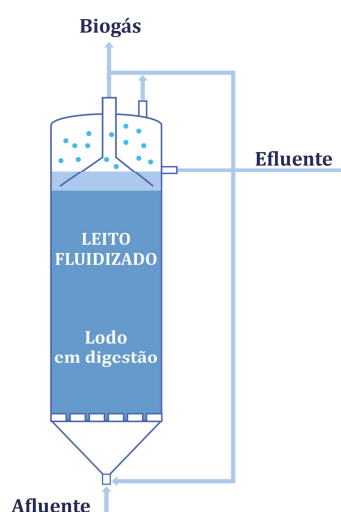


Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

Figura 20: Esquema de um digestor de Leito Expandido

Leito Fluidizado

Nestes digestores a expansão é superior ao 30%, podendo chegar a alcançar 100% e inclusive mais. Nestes digestores a concentração de sólidos no interior do digestor é de 10 a 40 g SSV/l e a velocidade de ascensão do afluente é de 6 a 20 m/h (Carreras, 2010). Para atingir estas elevadas velocidades de fluxo, geralmente é necessário recircular parte do efluente. A **Figura 21** mostra um esquema deste tipo de digestores.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

Figura 21: Esquema de um digestor de Leito Fluidizado

5.4. Tecnologias Mistas

As dificuldades para o controle dos reatores e digestores de leito fluidizado, bem como suas necessidades de energia, levaram ao desenvolvimento dos digestores de Leito de Lama Granular Expandido ou EGSB (Expanded Granular Sludge Bed) e de Circulação Interna ou reatores IC (Internal Circulation), nos quais o suporte inerte para o biofilme é dispensado. Ou seja, novas gerações de UASBs surgiram. Existem autores que os consideram como de terceira geração.

A característica distintiva é um aumento na velocidade do fluxo das águas residuais que passam pelo leito de lama. O aumento do fluxo permite a expansão parcial (fluidificação) do leito de lama granular, melhorando o contato da lama com as águas residuais, bem como a melhoria da segregação das pequenas partículas inativas em suspensão do leito de lama.

O aumento da velocidade do fluxo é realizado pelo uso de digestores altos, pela incorporação da reciclagem do efluente ou por ambos.

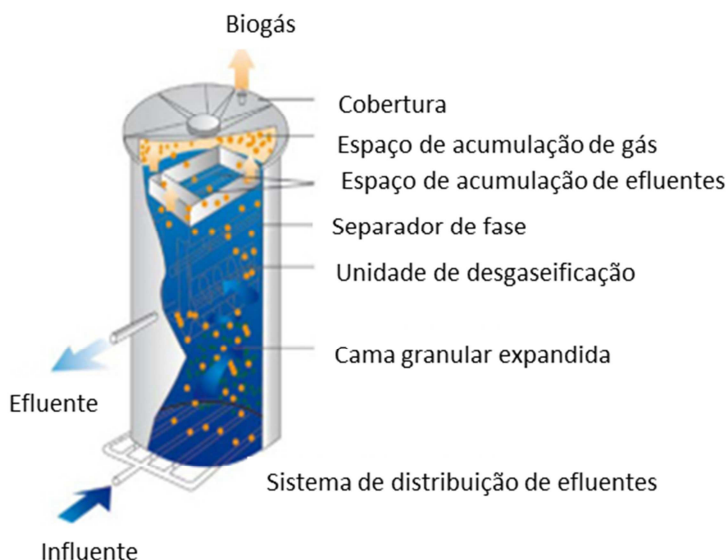
5.4.1. Digestores EGSB

Nestes digestores o sistema de separação de fases é um pouco mais sofisticado do que nos digestores UASB. O digestor EGSB (A **Figura 22** é um exemplo de digestor EGSB comercial) tem uma taxa de carregamento orgânico (OLR) de até 20 kg COD/m³.d e a recirculação permite trabalhar sem problemas com uma ampla gama de concentrações (Tshilumba, 2004).

Estes digestores aproveitam ao máximo a alta sedimentabilidade dos grânulos anaeróbios e operam com velocidades de elevação de mais de 8 m/h (até 30 m/h), aumentando a relação altura/diâmetro em relação aos UASBs tradicionais (altura entre 12 e 20 m) e uma recirculação externa.

A eliminação da resistência à transferência de massa para o biofilme, produzida pela turbulência, permite trabalhar em condições psicrófilas com bom êxito, bem como com efluentes de baixas concentrações de matéria orgânica (menos de 1g COD / L). Seu uso também tem sido indicado para efluentes que tendem a gerar problemas de espuma nos sistemas UASB.

O design EGSB é adequado para águas residuais solúveis de baixa carga (menos de 1 a 2 g COD solúvel/L) ou para águas residuais contendo partículas suspensas pouco biodegradáveis ou inertes, que não é conveniente que eles se acumulem no leito de lama .



Fonte: Pountal, 2015.

Figura 22: Esquema de um digestor EGSB

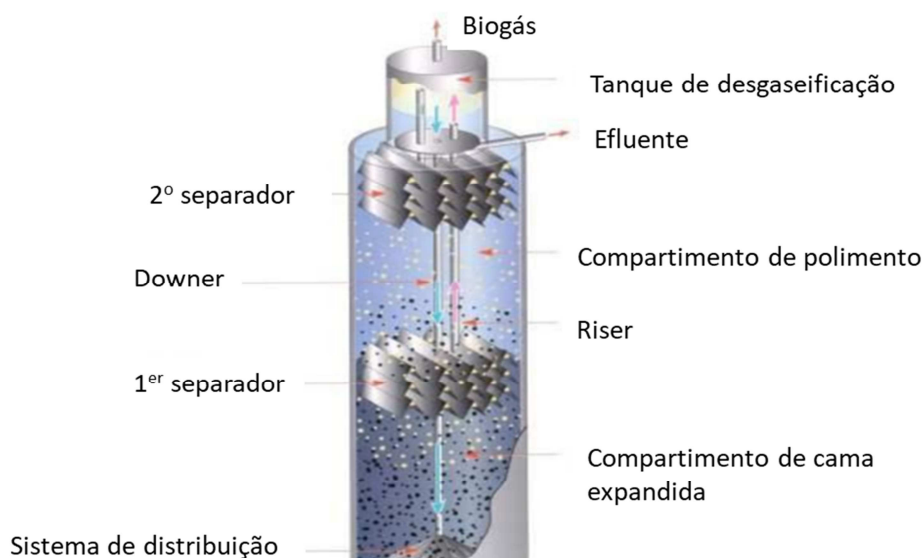
5.4.2. Digestores IC

Os digestores IC (**Figura 23** é um exemplo de digestor de IC comercial) ou de recirculação interna têm uma ORL de até 35 kg COD/m³ dia, maior que os digestores EGSB (Tshilumba, 2004). Essa alta taxa de carga orgânica se deve, principalmente, à sua recirculação interna que permite um melhor contato entre a biomassa e o influente da água residual, o que resulta em uma maior atividade da biomassa.

Além disso, o digestor IC possui 2 módulos de separação de 3 fases, que separam o gás, o líquido e a biomassa, um deles a metade da altura e outro na extremidade superior. A mistura gás-líquido coletada na zona intermediária é transportada até o topo, onde é desgaseificada. Em seguida, o líquido retorna para a extremidade inferior, onde se mistura com o fluxo de entrada. Isso melhora a retenção da biomassa e, conseqüentemente, permite uma maior atividade da biomassa e uma melhor qualidade final do efluente.

Este tipo de digestor tem sido aplicado nas seguintes indústrias: Indústria da celulose e o papel na indústria de cerveja e bebidas, indústria de destilação e fermentação, e indústria química e petroquímica.

Mais de 161 digestores IC foram construídos em todo o mundo nos últimos 10 anos anteriores a 2004, tornando o digestor de IC uma das tecnologias anaeróbias mais requisitadas no mundo (Tshilumba, 2004).



Fonte: Pountal, 2015.

Figura 23: Esquema de um digestor IC

5.5. Digestores de Duas Fases

O processo de digestão anaeróbica ocorre em varias etapas. Em cada uma delas intervém distintos tipos de microrganismos com características metabólicas diferentes. As últimas tecnologias de digestão anaeróbica avançada buscam separar as fases e otimiza-las separadamente.

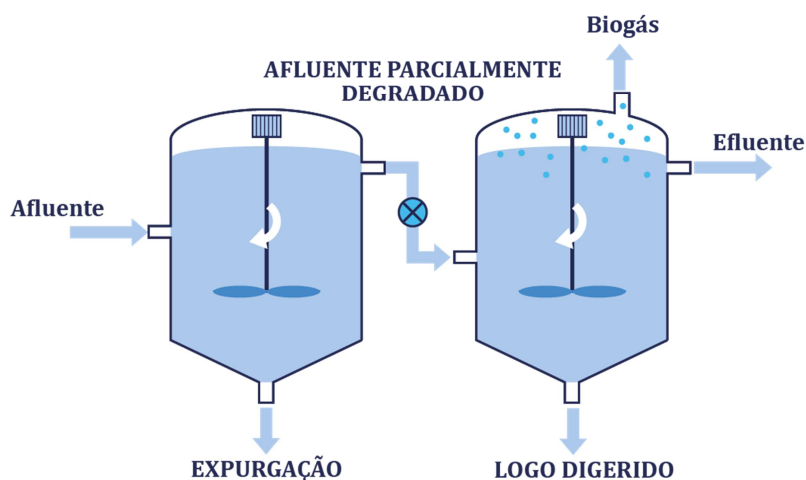
O digestor em Duas Fases está constituído por dois digestores. Em cada um se realiza uma parte do processo fermentativo (**Figura 24**). Esta separação de fases é muito interessante quando as condições ambientais ideais das diferentes populações bacterianas, que intervém no processo, não são as mesmas. Desta forma, pode-se favorecer ambas por separado (Abbasi e Abbasi, 2010).

Foram realizadas experiências separando a fase acidogênica da metanogênica e em algum caso, realizando a hidrólise no primeiro digestor e a acidogênese e metanogênese no segundo. As variantes destes sistemas de duas fases apresentam como desvantagem uma maior complicação da planta e possíveis situações desfavoráveis, ao impedir as inter-relações que existem entre os microrganismos das fases acidogênica e metanogênica.

Entre as vantagens que aporta este sistema cabe destacar:

- O primeiro digestor atua como amortizador à chegada de algum golpe de carga do afluente, aportando grande segurança e estabilidade ao sistema; este digestor também eliminará o oxigênio dissolvido do afluente, de modo que a eficácia no segundo digestor é alta.
- Permite conseguir um biogás com maior riqueza em metano, o que repercute no balanço econômico.
- Admite uma maior flexibilidade em variações de carga, pH e temperatura, ao tempo em que oferece maiores facilidades na atuação, acompanhamento e controle.

Esta tecnologia se desenvolveu muito em razão dos bons rendimentos que está alcançando.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

Figura 24: Esquema de um digestor de Duas Fases

5.6. Comparação entre as distintas tecnologias

A **Tabela 37** mostra os parâmetros característicos de cada tecnologia.

Tabela 37: Parâmetros característicos das tecnologias de digestão anaeróbica

Parâmetro	Mescla Completa	Contato	UASB	Filtro	Leito expandido	Leito Fluidizado
TRH (d)	15-30	2-6	1-3	1-4	0,3-1	0,3-1
Cargas aplicadas (kg DQO/m ³ .d)	1-6	2-7	10-20	5-15	10-40	10-40
SS em efluente (g SS/l)	25-100	0,5-20	0-5	0-10	0-5	0-5
Velocidade de ascensão (m/h)	-	-	0,05-3	0,01-0,1	2-10	6-10
Relação de recirculação de lodos	-	0,5-2	-	-	2-100	5-500

Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

Ademais, o comportamento e a resposta de cada uma das tecnologias no desenvolvimento do processo, ou ante imprevistos que possam ser produzidos, são apresentados na **Tabela 38**.

Tabela 38: Comportamento das tecnologias de digestão anaeróbica

Parâmetro	Mescla Completa	Contato	UASB	Filtro	Leito Fluidizado
Funcionamento	-	++++	+	+++	++
Operação	+	+	++	++++	++
Controle	-	++++	++	++	++
Resistência a choques:					
Temperatura	-	++	++++	++++	++++
Tóxicos	-	++	+++	++++	++++
Cargas orgânicas	-	+++	++++	++++	++++
Sólidos suspensos	+++	++	+	-	+
Processamento de lodos	++++	+++	-	-	-

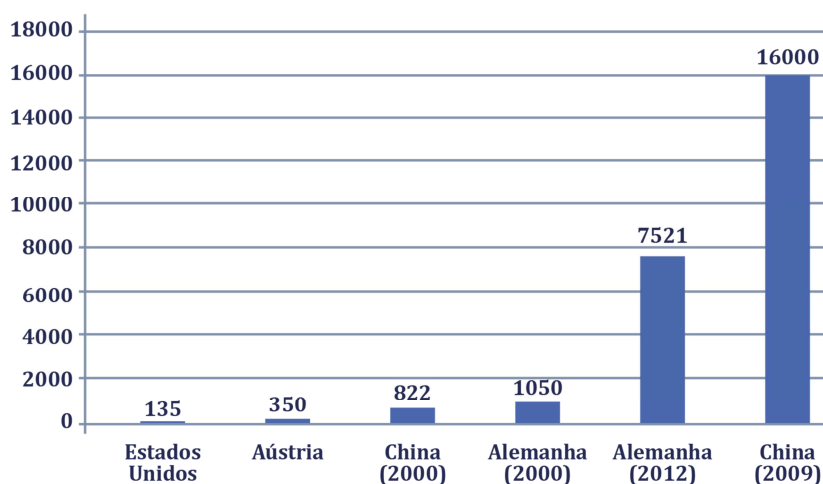
- = ruim; += aceitável; ++= bom; +++= muito bom; ++++ = excelente

Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

5.7. Evolução dos digestores industriais

Tanto a China quanto a Alemanha tiveram um crescimento espetacular em plantas de digestão anaeróbica de maior escala do que as vistas anteriormente, como mostra a **Figura 25**.

Nº digestores



Fonte: Burns, 2009.

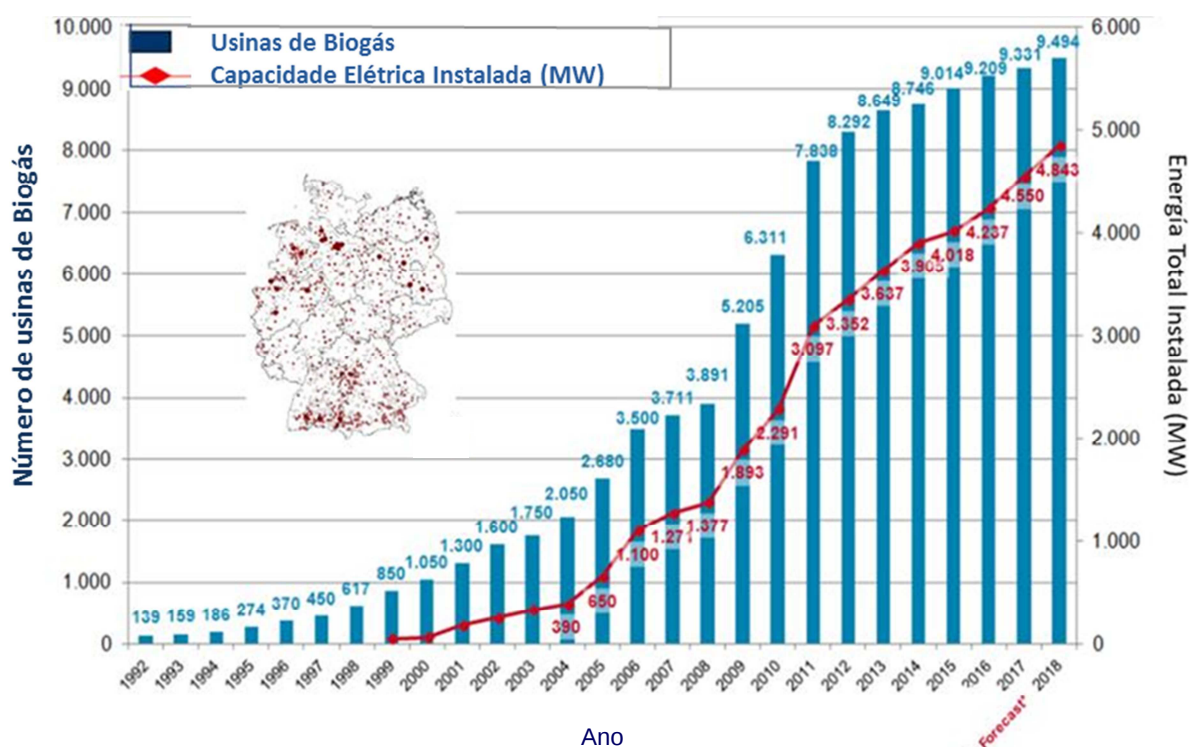
Figura 25: Distribuição dos digestores existentes no mundo

Alemanha é o país europeu que mais tem apoiado o biogás. Os dados oficiais aportados pela Fachverband Biogas (FvB), nome original da associação alemã de biogás, confirmam o aumento considerável no número de plantas de biogás, principalmente nas fazendas, nos últimos anos.

Neste país o processo foi melhorado através da codigestão de excrementos pecuários com quantidades importantes de ensilagem de milho, melhorando assim a relação C/N, pois nos purinas esta é baixa por seu elevado conteúdo de nitrogênio. Isto influenciou consideravelmente nas decisões

de plantio dos agricultores alemães. Segundo entrevistas sobre o plantio realizadas, em 2010 a superfície destinada para este fim aumento 12%, subindo a 1,86 milhões de hectares.

A FvB indicou que em 2011 entraram em funcionamento mais de 1.310 novas plantas, que equivaliam a 650 MW. Esta associação também constata que em 2009 a produção média das plantas diminuiu, devido provavelmente a que o setor agrícola utilizou quantidades importantes de esterco de origem animal nos digestores. A explicação é que os agricultores alemães se beneficiam ao cobrar uma bonificação adicional, que sobe a 4 centavos/kWh, com o aproveitamento deste tipo de substrato. Esta gratificação foi introduzida na Lei Alemã de Energias Renováveis para incentivar o aproveitamento de produtos de resíduos. A tendência não retrocedeu, já que a associação alemã estimam que para finais de 2018 poderia haver um total de 9.494 instalações e alcançar os 4.497 MW. **Figura 26** mostra a evolução das plantas de biogás na Alemanha de 1992 a 2018.



Fonte: Fachverband Biogas (FvB, 2018).

Figura 26: Evolução das plantas de biogás na Alemanha

5.8. Experiência prática em um SIDS da Região do Caribe: Planta de Digestión Anaerobia de Brugal en República Dominicana

A seguir, informações sobre a planta de digestão anaeróbica, localizada em um SIDS caribenho, especificamente na República Dominicana, que trata a vinhaça da destilaria Ron Brugal, produzindo ao mesmo tempo que purifica, uma quantidade significativa de biogás que é usada no processo industrial da própria empresa.

5.8.1. Introdução

O consórcio Brugal da República Dominicana é atualmente o maior produtor de álcool e rum da ilha. A destilaria está situada em San Pedro de Macorís, a 70 Km ao leste da cidade de Santo Domingo e a fábrica do Rum Brugal está localizada em Puerto Plata, a 215 km ao norte da cidade capital.

A capacidade da destilaria é de 55.000 L/d em dois jogos de colunas queimadora-concentradora e retificadora, respectivamente. As duas colunas queimadoras-concentradoras trabalham a vácuo e com calefadores. Das duas colunas retificadoras, uma tem calefator e a outra não.

A produção de vinhaças, que é de 12 a 13 vezes a produção de álcool, dá-se em uma planta de tratamento com digestor anaeróbico do tipo Filtro "Down-Flow" e o biogás produzido é queimado em uma caldeira instalada para aportar calor ao processo.

5.8.2. Processo

Nas plantações de açúcar da ilha se extraem o suco, que será transformado em melaço. Este é depois conduzido às destilarias de Brugal para ser armazenado em enormes depósitos e diluído com água. Durante o processo de fermentação, o açúcar se transforma em álcool e o produto resultante pode ser destilado.

Quando se destila o mosto fermentado de melaços para obter álcool, obtém-se um resíduo líquido de cor escura chamado vinhaça. Esta vinhaça contém 90% de água e 10% de sólidos. Destes sólidos, 95% são sólidos solúveis e 5% estão em suspensão. É uma água residual muito contaminante e deve ser tratada convenientemente, já que pode constituir um problema ambiental importante pois sua geração é elevada, de 12 a 13 vezes a quantidade de álcool produzido. Se uma empresa produz 55.000 litros de álcool por dia, deverá produzir de 660.000 a 715.000 litros de vinhaça por dia.

A composição média de a vinhaça gerada na destilaria de rum Brugal de San Pedro de Macorís é mostrada na **Tabela 39**. A variação da composição dependerá das características dos diferentes melaços usados na fermentação e do processo de fermentação em si.

Tabela 39: Composição média da vinhaça

Parâmetro	Valor	Unidade
DBO	36.000-42.000	mg/L
DQO	80.000-105.000	mg/L
SST	4.000-10.000	mg/L
pH	4,0-5,0	-
Alcalinidade (CaCO₃)	600-1.700	mg/L
Ácidos voláteis (Ácido acético)	4.000-7.000	mg/L
Gravidade específica	1,02-1,05	-
Sulfatos	4.000-10000	mg/L
Temperatura	80-90	°C

Fonte: Del Toro, 2001.

5.8.3. Planta de tratamento das vinhaças geradas no Rum Brugal

Desde 1974 a companhia Bacardi e seu especialista em biotecnologia, o Dr. Michael Szendrey, começou, a fazer experimentos na planta piloto com um digestor de fluxo descendente que continha em seu interior um enchimento plástico de PVC em forma de "favo de mel". Este enchimento servia de suporte às bactérias. Como inóculo se utilizou esterco de vaca previamente preparado.

Depois de vários anos de experimentos, e uma vez analisados todos os tipos de digestores disponíveis, decidiu-se instalar o digestor desenvolvido pela companhia Bacardi e o Dr. Szendrey, em Puerto Rico, pelo Dr. Szendrey. Em dezembro de 1981, a companhia Bacardi desenvolveu a planta de tratamento, com um digestor de 3 milhões de galões de capacidade. O projeto foi completado com a instalação de uma caldeira para queimar este biogás. Atualmente há dois digestores (**Ilustração 7**) em funcionamento e será construído um terceiro.

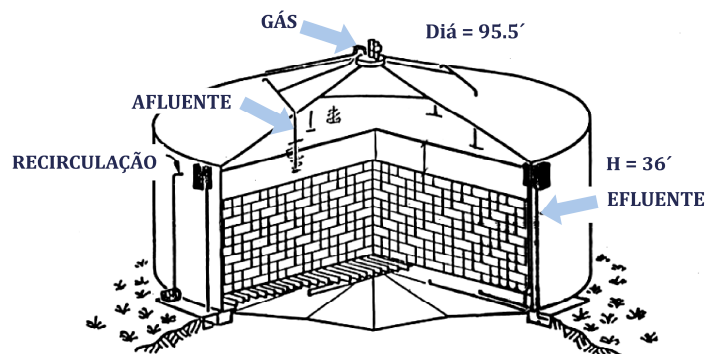


Ilustração 7: Digestores da planta de tratamento de vinhaças de Rum Brugal

5.8.4. Características da digestão anaeróbica de Brugal

A tecnologia escolhida foi digestores Filtro do tipo "Down-Flow", isso é, de fluxo descendente. A **Figura 27**, mostra um esquema do digestor. É um tanque de 1,93 milhões de galões de capacidade, no qual 75% de seu volume está ocupado por um suporte plástico de PVC, para que as bactérias fiquem retidas.

ESQUEMA DO DIGESTOR ANAERÓBICO DE BRUGAL EM RD



Fonte: Do Toro, 2001.

Figura 27: Esquema do Digestor anaeróbico de Brugal em RD

Arranque do digestor: Todo processo biológico necessita tempo para adaptar-se, é necessária uma fase inicial de adaptação das bactérias. Para arrancar o digestor, se carregou inicialmente com 100.000 lb de material do digestor de Bacardi. Este material tinha 20% de sólidos, o que equivale a 20.000 lb de matéria seca. Ademais, alimentá-lo com vinhaça, como todo processo biológico, precisou de tempo para adaptar-se. Depois de 3 a 5 meses, o digestor começou a se estabilizar, isso é, haveria suficiente bactérias nas células de PVC (Del Toro, A.G., 2001).

Operação do Digestor e Parâmetros: O digestor é alimentado pela parte de cima e constantemente há várias bombas recirculando material em fluxo descendente. O nível é controlado automaticamente e qualquer excesso de gás é queimado em uma tocha. Os parâmetros ideais de operação do processo são apresentados na **Tabela 40**.

Tabela 40: Parâmetros ideais de operação do processo

Parâmetro	Valor
Temperatura alimentação vinhaça	Máx. 37 °C
Temperatura no digestor	Máx. 39 °C
pH	7,0 - 7,2
Ácidos Voláteis	Máx. 3 500 mg/l
Alcalinidade	Máx. 3 000 mg/l
% Metano em biogás	50 - 57
% Redução	70 - 80

Fonte: Adaptado de Del Toro, 2001.

A porcentagem de redução varia em função da diferença entre a DQO de entrada ao digestor e a DQO de saída. Considera-se a DQO como referencia, porque é uma análise rápida (2 horas), ao contrario da DBO, que dura cinco dias. Qualquer variação nestes parâmetros, provoca a baixa produção de gás e/ou gás de má qualidade.

5.8.5. Características do Biogás obtido na planta

O digestor está desenhado para produzir 24.000 ft³/h de biogás com uma alimentação média de 28 m³/h. O biogás produzido tem a composição mostrada na **Tabela 41**.

Tabela 41: Composição do biogás da planta de digestão anaeróbica de rum Brugal

Composto	Concentração (%)
Metano (CH ₄)	50 - 55% (V/V)
Sulfureto de Hidrogênio (H ₂ S)	1 - 3%
Gás Carbônico (CO ₂)	35 - 49%
Poder Calorífico	500 Btu / ft ³
Produção de Biogás	9 ft ³ / lb.DQO _{eliminado}
Energia Disponível	4.500 Btu/lb.DQO _{eliminado}
Eficiência de Remoção	70 - 80%

Fonte: Del Toro, 2001.

5.9. O projeto singular e estratégico PROBIOGÁS

O projeto singular e estratégico PROBIOGÁS integrou um conjunto de atividades de caráter científico e tecnológico, que estão inter-relacionadas entre si e que têm como objetivo comum "o desenvolvimento de sistemas sustentáveis de produção e uso de biogás em ambientes agroindustriais, bem como a demonstração de sua viabilidade e promoção na Espanha". Da PROBIOGÁS participaram 15 centros de pesquisa e 16 empresas ou instituições relacionadas com as distintas áreas do biogás. Teve uma duração de 5 anos e foi financiado pelo Governo Espanhol, através de seu programa de ajudas a Projetos Singulares e Estratégicos e com Fundos Europeus. As atividades do projeto começaram a finais de 2007.

Os resíduos agroindustriais são especialmente importantes na Espanha, já que é o primeiro país europeu na superfície dedicada a cultivo, o quarto em produção pecuária e o quinto em produção alimentar industrial.

5.9.1. Objetivo

O principal objetivo do projeto foi o desenvolvimento de sistemas sustentáveis de produção e uso de biogás em meios agroindustriais, bem como a demonstração de sua viabilidade e promoção na Espanha.

Ademais, concebeu-se uma série de objetivos específicos dentre os quais se encontram os seguintes:

1. Facilitar o desenvolvimento e consolidação do "Biogás Agroindustrial" como Energia Renovável na Espanha, através de uma contribuição de carácter científico-técnico.
2. Demonstrar a capacidade das plantas de biogás para contribuir com a redução de emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa, bem como à sustentabilidade global dos meios agroindustriais (atividades agrícolas, pecuárias e das indústrias alimentícias).
3. Quantificar a quantidade e disponibilidade de matérias primas, principalmente resíduos orgânicos, seu potencial de produção de biogás e a sustentabilidade de sua utilização.
4. Desenvolver novas técnicas de codigestão anaeróbica para os resíduos agroindustriais mais frequentes e com maiores possibilidades na Espanha.
5. Caracterizar e melhorar os digestatos produzidos nos sistemas de codigestão anaeróbica para sua aplicação em cultivos autóctones.
6. Avaliar as alternativas de uso do biogás agroindustrial, incluindo sua utilização como combustível em motores de cogeração, veículos de automação, mescla em redes de gás natural natural e pilhas de combustível, dentre outros.
7. Demonstrar a viabilidade e sustentabilidade a escala industrial das plantas de codigestão anaeróbica de resíduos agroindustriais através de vários projetos de demonstração.
8. Difundir os resultados do projeto através de panfletos, guias, páginas da internet (www.probiogas.es), presença em jornadas, seminários, congressos, meios de comunicação, etc., tanto nos setores profissionais relacionados, quanto na sociedade em geral.

5.9.2. Alcance

As atividades do PROBIOGAS focam-se no biogás obtido com materiais de origem agroindustrial, diferentemente do que se origina de aterro ou depuradoras urbanas e, inclusive, do biogás produzido com a fração orgânica de resíduos municipais. O "meio agroindustrial" definido no PROBIOGAS envolve principalmente atividades de tipo agrícola, pecuária e das indústrias alimentícias, bem como outras atividades que poderiam compartilhar este cenário futuramente (cultivos energéticos ou as indústrias bioenergéticas)(Carreras, 2011b).

Outro aspecto relevante a destacar, no alcance do projeto PROBIOGÁS, é que todas as técnicas de digestão anaeróbica estudadas utilizam sempre o conceito de "codigestão".

O projeto foi formado por 13 subprojetos e incluiu estudos de viabilidade, atividades de pesquisa e desenvolvimento, projetos de demonstração a escala industriais e ações complementares para a coordenação e difusão do projeto.

Dentro do subprojeto 1 foi desenvolvida uma ferramenta informática, METANIZA, que permite avaliar a sustentabilidade de plantas de biogás agroindustrial na Espanha a partir de três pontos de vista: econômico, energético e ambiental (Peña et al., 2012).

Ademais, dentro dos subprojetos de demonstração cabe destacar o projeto: Codigestão de resíduos cítricos e pecuários (SP8). Teve como objetivo avaliar resíduos pecuários (esterco procedente de 2000 cabeças de gado bovino) em codigestão com resíduos cítricos. Utilizou-se a tecnologia em Duas

Fases, um digestor de Fluxo Pistão (900m³) e outro de Mescla Completa (2.200m³) (**Ilustração 8**). O biogás é convertido em eletricidade através de um motor de cogeração de 499 kW (eletricidade verde), uma energia elétrica e térmica equivalente a 307 moradias e uma redução de emissões de 2.808 t de CO₂.

Encontra-se disponível informação do projeto PROBIOGÁS em sua página da internet: www.probiogas.es



Ilustração 8: Planta de biogás desenvolvida no PROBIOGÁS

Resumo do Capítulo 5

Como já foi comentado, o conhecimento mais profundo dos microrganismos envolvidos na degradação anaeróbica nos parâmetros regulados pelo processo, permitiu progredir notavelmente nos aspectos tecnológicos, melhorando muito o rendimento.

Existe atualmente um grande numero de tecnologias mais avançadas do que as vistas no capítulo anterior, aplicadas ao tratamento de resíduos por digestão anaeróbica.

O objetivo primário do tratamento de um resíduo é diminuir o conteúdo de matéria orgânica, o que se consegue facilitando o desenvolvimento das populações microbianas implicadas.

O desenho dos digestores evoluiu a fim de conseguir elevadas concentrações de biomassa (microrganismos) nos digestores e uma maior permanência da mesma neles (alto tempo de retenção de sólidos), inclusive trabalhando com elevadas velocidades de carga (baixo tempo de residência hidráulico).

Os digestores anaeróbicos de tecnologias mais avançadas podem ser divididos em dois grandes grupos: os digestores com os microrganismos (biomassa microbiana) não unidos a um suporte, isso é, de crescimento livre o suspenso (*biomassa non attached*), e os digestores com os microrganismos (biomassa) unidos a um suporte inerte (*biomassa attached*). Cada um destes grupos está constituído, por sua vez, por distintos tipos de digestores. O primeiro grupo está formado pelos digestores: Mescla Completa, Fluxo Pistão, Contato e UASB, enquanto o segundo grupo, dependendo se os suportes são fixos ou não, os digestores podem ser classificados em: Digeridores de Filtro anaeróbico e de Camada Fixa, se o suporte permanecer fixo, e Leito Expandido e Leito Fluidizado se o suporte se

move. No entanto, há relativamente pouco tempo, uma nova geração de digestores que têm características do UASB e do leito fluidizado surgiram. Estes são os digestores EGSB e IC. Há autores que os consideram de terceira geração. A característica distintiva é um aumento na velocidade do fluxo das águas residuais que passam pelo leito de lama. O aumento do fluxo permite a expansão parcial (fluidificação) do leito de lama, melhorando o contato da lama com o efluente, bem como o aprimoramento da segregação das pequenas partículas inativas em suspensão do leito de lama. Por outro lado, já que o processo de digestão anaeróbica ocorre em várias fases, nas quais intervêm diferentes microrganismos que atuam com distintas velocidades, também surgiu a tecnologia de digestores em Duas Fases, a fim de favorecer cada etapa separadamente. A escolha do tipo de digestor dependerá, principalmente, das características do resíduo a ser tratado.

Destaca-se o espetacular crescimento da China e Alemanha com relação ao número de digestores instalados.

Os países se desenvolvem na medida em que se desenvolve sua capacidade tecnológica, isso é, a capacidade de identificar e avaliar a oferta de componentes tecnológicos transferíveis, de endossar e escolher uma tecnologia, explorá-la, adaptá-la, melhorá-la e desenvolver, por último, tecnologias próprias. Nesse sentido, tanto as empresas privadas, quanto o Estado, tem um papel importante.

Do ponto de vista privado, destaca-se a planta industrial de tratamento de vinhaças da empresa Brugal em San Pedro de Macorís (República Dominicana). Depois do necessário processo de caracterização e pesquisa, a destilaria possui dois digestores de três milhões de galões de capacidade de tecnologia Filtro. A planta tem uma eficiência de eliminação de 70-80%, uma produção de biogás de $9 \text{ ft}^3/\text{DQO}_{\text{eliminada}}$, uma energia disponível de $4.500 \text{ Btu/lb.DQO}_{\text{eliminada}}$ e uma porcentagem de metano do biogás de 50-55%, o que representa um poder calorífico de 500 Btu/ft^3 . Todo biogás obtido é utilizado em uma das duas caldeiras da planta para produzir calor no processo. Os dados da planta demonstram que a digestão anaeróbica é uma tecnologia consolidada e que pode representar benefícios ambientais e econômicos através da produção de biogás.

A fim de potencializar o desenvolvimento destes digestores para tratar os resíduos agroindustriais na Espanha, realizou-se o projeto singular estratégico PROBIOGAS, subvencionado pelo Ministério da Ciência e Inovação e do qual participaram 31 sócios (15 centros de P&D e 16 empresas/instituições) de 9 Comunidades Autônomas. PSE PROBIOGAS foi constituída como um conjunto de atividades de carácter científico-tecnológico, inter-relacionadas entre si com o objetivo comum do desenvolvimento de modelos sustentáveis de produção e uso de biogás em meios agroindustriais, bem como a demonstração de sua viabilidade e difusão na Espanha. Um dos resultados obtidos é a construção de um digestor de Duas Fases, um digestor Fluxo Pistão (900 m^3) e outro de Mescla Completa (2.200 m^3) para tratar esterco bovino em codigestão com resíduos agroindustriais. A produção de biogás se converte em eletricidade através de um motor de co-geração.

6. Biogás de aterro sanitário de RSU

Dentre os métodos atualmente existentes para o tratamento dos resíduos, o resíduo líquido continua sendo a opção mais utilizado, devido aos baixos custos econômicos implicados, à rejeição social à incineração e às limitações existentes para reciclar ou guardar resíduos. De acordo com uma publicação do Banco Mundial em uma revisão global da gestão de RSU, 59% dos resíduos no mundo são aterrados (Hoorweg e Bhada-Tata, 2012).

O conceito de aterro controlado surgiu na descrição de uma operação de “cortar e cobrir” utilizada para os resíduos depositados na Califórnia nos anos 30. Na Europa esta técnica foi introduzida em Bradfor (Inglaterra) em 1935, pouco depois na França e, na Espanha, depois de 1945. Com o tempo este sistema foi sendo aperfeiçoado e nos últimos anos ocorreram consideráveis avanços científicos e técnicos, tanto no conhecimento do processo de decomposição sofrido pelos resíduos depositados, quanto na realização de obras de engenharia adequadas na maquinaria utilizada.

Em um aterro controlado os resíduos urbanos são descarregados sobre o terreno, formando camadas finas. Logo são compactados para reduzir seu volume e cobertos com materiais adequados para minimizar os riscos de contaminação ambiental e favorecer as transformações biológicas dos materiais fermentáveis. Estas camadas são limitadas por encostas, a fim de que as chuvas não as arrastem.

Quando os resíduos são depositados ocorre a degradação biológica da matéria orgânica neles contida. O processo produzido se denomina digestão anaeróbia. De modo geral, é possível admitir que um aterro controlado se comporta como um digestor anaeróbico que, através de uma série de processos fisiológicos e principalmente microbiológicos (fermentação anaeróbica) que ocorrem no interior das plataformas de resíduos, resulta no surgimento de uma mescla de gases ou “biogás”, e de um líquido com uma elevada carga orgânica e, portanto, alto poder contaminante. Ao mesmo tempo surge o fedido “lixiviado”. O biogás é facilmente aproveitável energeticamente.

Quando a capacidade de um aterro para receber resíduos é completada, é necessário fechá-lo e vedá-lo segundo as especificações do projeto inicial. Devem ser realizados sistemas de controle e acompanhamento ambiental (controle de gases, controle e tratamento de lixiviados...) e adequar o espaço ocupado para que desempenhe a finalidade prevista na fase de planificação.

Apesar de sua simplicidade, o que constitui uma de suas vantagens, o resíduo controlado não admite atos improvisados. Deve ser encarado como uma obra de engenharia, e como tal exige um projeto concreto que, baseado em estudos adequados, permita a escolha apropriada da solução mais conveniente. Um aterro é considerado controlado quando são tomadas as medidas oportunas para evitar tudo o que seja nocivo ao meio ambiente.

O Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID) está formulando um conjunto de diretrizes para setores e subsetores específicos de impacto sobre a mudança climática. Estas diretrizes têm como objetivo proporcionar os critérios mínimos, claros e quantitativos de desempenho em matéria de mudança climática que devem ser cumpridos para que o BID possa respaldar projetos. A finalidade das diretrizes sobre aterros consiste em estabelecer, para o financiamento de novos aterros e plantas de biogás, um enfoque que esteja em consonância com o compromisso do BID de proteger o meio ambiente e reduzir os efeitos adversos da mudança climática. Dentro destas diretrizes, que somente são aplicadas às novas plantas de biogás, o BID estabelece normas inovadoras para financiar projetos de construção de aterros, ao requerer a redução das emissões de gases de efeito estufa através da captação e destruição do biogás (Boulet, et al., 2010).

6.1. Tratamento de RSU em SIDS

O aterro é o ato de disposição final de resíduos e é a opção menos desejada de acordo com a hierarquia de gestão de resíduos (WARR Act No 58, 2001). No entanto, é amplamente utilizado na maioria dos países, incluindo SIDS, principalmente devido ao fato de que o aterro é relativamente barato em comparação com outras opções de gestão de resíduos (Renou et al., 2008), especialmente se não é feito sob as condições certas, isto é, um aterro sanitário. Por esta razão, muitas vezes, a solução mais frequente para depositar os resíduos é o aterro não controlado. Como resultado do custo relativamente alto de aterros sanitários, as cidades tendem a fazer pouco progresso em direção à implementação controlada a menos que o marco regulatório e as agências ambientais pressionem (Banco Mundial, 2011). Enquanto isso, a disponibilidade de capacidade dos aterros em muitos países desenvolvidos tem diminuído devido a restrições regulatórias, localização e licenças ambientais para novos aterros sanitários e ampliação de aterros existentes. De acordo com a Diretiva de Aterro da União Europeia (UE), todos os países membros da UE devem reduzir a quantidade de resíduos biodegradáveis enviados para aterros sanitários (Diretiva 1999/31/CE). Por exemplo, a Espanha é obrigada a reduzir a quantidade de resíduos biodegradáveis enviados para aterros de acordo com a quantidade deste material descarregado em 1995, para 75 por cento em 2010, 50 por cento em 2013 e 35 por cento em 2016 (Real Decreto, 1481/2001). Como resultado, abordagens novas para a gestão de resíduos foram incorporadas nas políticas públicas e institucionais nos níveis local e nacional.

O objetivo do aterro sanitário é fornecer uma eliminação segura de resíduos, protegendo a saúde humana e o meio ambiente. Os aterros sanitários devem ser projetados e gerenciados para proteger o solo, as águas subterrâneas, as águas superficiais e o ar. Outros objetivos importantes do aterro sanitário são maximizar a quantidade de resíduos no espaço disponível, dadas as condições locais, a geometria, a consideração da estabilidade da encosta e os possíveis usos futuros.

Embora existam os aterros em muitos SIDS, a maioria deles estão mal localizados e mal administrados e, além disso, não são sanitários (UNEP, 1998). No entanto, isso não acontece em todos os casos, os SIDS tem uma economia baseada no turismo, economia como Cuba proíbe tanto o aterro quanto imersão no mar (Binder e Mosler, 2007) Nas Ilhas Cook do Pacífico, os resíduos são empacotados antes de serem depositados em aterros, a fim de prolongar a vida de aterros (ADB, 2014, citado por Moheer et al, 2015). Além disso, muitos SIDS como Fiji, Ilhas Cook e Tonga já estão se movendo em direção ao aterro sanitário devido devido aos impactos ambientais e sanitários negativos do despejo não controlado de resíduos (UNEP, 1999; ADB, 2014A). Um exemplo de um aterro sanitário bem gerida é o aterro sanitário Mare Chicose em Maurícia, com uma capacidade de 224.990 m², em que os resíduos são dispostos em células com duplo revestimento de de polietileno de alta densidade, gestão dos lixiviados, cobertura final e monitoramento das águas superficiais e subterrâneas, juntamente com a geração de 3,3 MW de electricidade a partir do biogás de aterro (Kowlessar, 2012; Beerachee, 2012 citado por Mohee et al, 2015). O gás do aterro tem um importante valor energético que pode ser facilmente aproveitável, como será visto adiante. Portanto, administrar bem os aterros apresenta benefícios ambientais incontestáveis, bem como benefícios econômicos que podem ser importantes.

No entanto, apesar do fato de o aterro sanitário representar a forma de eliminação de resíduos mais barata, continua a ser a opção menos desejável devido à perda de resíduos potencialmente úteis, como materiais recicláveis que poderiam ser reaproveitados.

Como foi demonstrado no preliminar da ONU (ONU, 2017), um dos problemas mais importantes que o SIDS tem está relacionado com o resíduo. A implementação do PAM (Programa Mundial de Ação para a Proteção do Meio Ambiente Marinho de Atividades Terrestres) é necessária para prevenir,

reduzir e controlar os resíduos e a poluição, assim como a necessidade de fornecer apoio para a criação de capacidade de reduzir e gerenciar resíduos e poluição.

A segurança alimentar gera preocupação em SIDS, porque a variabilidade climática afeta a agricultura. Os resíduos sólidos são uma fonte de gases de efeito estufa (GEE), não apenas por sua relação com a produção e o consumo, mas também por emissões de metano (CH₄) quando depositados em aterros que não cumprem as medidas adequadas de segurança. As emissões de CH₄ produzem aproximadamente 16% do efeito estufa total (IPCC, 2014). Globalmente, os aterros sanitários são a terceira maior fonte antropogênica de metano, respondendo por aproximadamente 11% das emissões globais estimadas de metano, quase 799 milhões de toneladas métricas de emissões equivalentes de dióxido de carbono, em 2010 (USEPA, 2011). Portanto, as emissões de metano do aterro representam a maior fonte de emissões de GEE no setor de resíduos.

O aterro sanitário continua a ser o método predominante de eliminação de resíduos, não só em SIDS, mas na maioria dos países. No entanto, como mencionado, às vezes, são chamados aterros sanitários a aterros que não atendem aos requisitos mínimos para serem considerados como eles. A captura de biogás reduz significativamente as emissões de metano e, quando o gás capturado é usado para gerar energia pode fazer uma contribuição financeira significativa. Deve-se notar que esse gás tem um importante valor energético que pode ser facilmente explorado, como será visto no próximo capítulo. Portanto, gerenciar bem os aterros sanitários tem indubitáveis benefícios ambientais, mas também benefícios econômicos que podem se tornar muito importantes.

A incorporação de melhores práticas integradas para o gerenciamento de resíduos sólidos e a recuperação da energia do biogás de aterros sanitários, também conhecido como LFG (Landfill Gas), pode ajudar a proteger a saúde humana e o meio ambiente contra os perigos de resíduos mal geridos, depositados indevidamente. Encontrar a combinação certa de práticas para atender aos meios e necessidades da comunidade local ajudará a garantir uma população e um ambiente mais saudáveis.

A quantidade de metano produzida depende principalmente de composição, quantidade e teor de umidade dos resíduos e do design e gestão do aterro. Os aterros sanitários, projectados a maximizar a decomposição anaeróbia de resíduos, produzem mais metano do que lixões e outras opções para disposição de resíduos sólidos que permitem decomposição aeróbia. À medida que os países em desenvolvimento realizem a transição e fizerem mais aterros sanitários, as emissões de metano aumentarão à medida que mais resíduos forem depositados. Como resultado, as medidas de extração e controle do gás de aterro estão se tornando cada vez mais importante para a gestão dessas emissões. Por exemplo, na década de 1990, várias grandes cidades da África do Sul enfrentaram problemas devido ao aumento da demanda por capacidade de aterro, o que representou uma oportunidade tanto para a coleta de biogás de aterros existentes quanto para o projeto de novas instalações de aterros sanitários que otimizaram a produção de biogás para fins comerciais (USAID, 2004). Vários municípios implementaram posteriormente a recuperação do biogás em aterros melhor geridos e novos aterros foram construídos.

A recuperação de metano em aterros sanitários, a minimização de resíduos, a reciclagem, a digestão anaeróbica, a compostagem e a incineração de resíduos com recuperação de energia podem reduzir as emissões de GEE. Mudanças nos padrões de estilo de vida e comportamento podem contribuir para a mitigação das mudanças climáticas.

Existe um acordo geral em todo o setor de resíduos que diz que o maior benefício para o clima é alcançado através de uma melhor gestão dos materiais mais importantes para a prevenção de resíduos (USEPA, 2012). A reciclagem da maioria dos materiais resulta em uma redução dos gases de efeito estufa. Em geral, a redução de resíduos e o aumento de materiais recuperados representam as principais atividades para as quais o setor de resíduos pode contribuir significativamente para a mitigação das mudanças climáticas.

A gestão de resíduos sólidos é uma ferramenta poderosa para reduzir as emissões de GEE em um mundo onde a responsabilidade compartilhada é fundamental para as mudanças necessárias na forma como fazemos as coisas agora.

6.2. Etapas do processo de formação de biogás em um aterro sanitário

O processo de formação de biogás em um aterro sanitário ocorre nas cinco etapas o fases demonstradas na **Figura 28**.

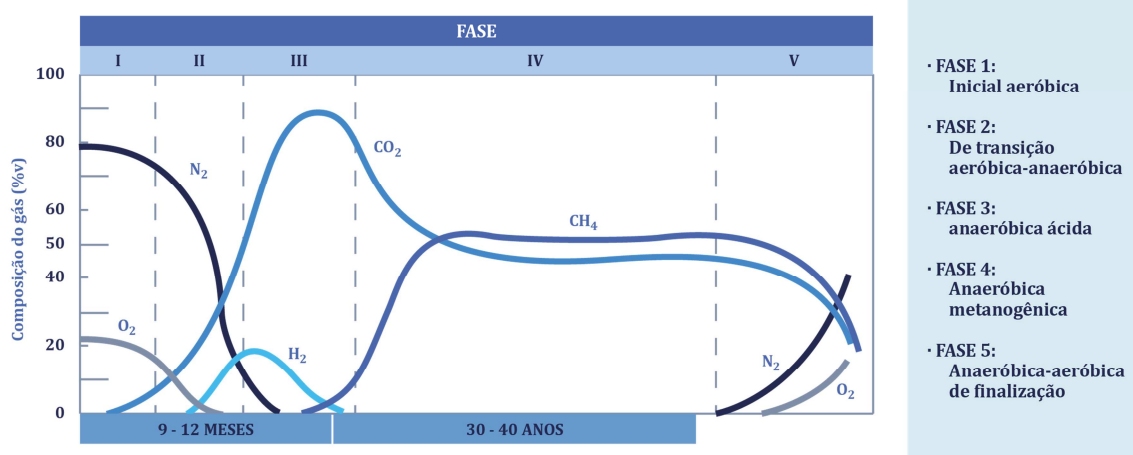


Figura 28: Processo de formação de gases em um aterro

As características destas etapas são as seguintes:

1. Fase aeróbica: É a fase imediata do resíduo. Inicia o processo de degradação, nela predomina o N_2 . Os microrganismos aeróbicos consomem o oxigênio disponível e é produzida uma crescente formação de CO_2 . Sua duração é curta, estima-se que de aproximadamente 15 dias.
2. Primeira fase anaeróbica (ausência de metano) ou também conhecida como fase de transição: Predomina a mudança de bactérias de aeróbicas a anaeróbicas. Esta etapa se caracteriza pela ausência de oxigênio e a formação de ácidos de fermentação. Ao final da mesma se alcança uma maior concentração de CO_2 , surge o H_2 e diminui a proporção de N_2 . Sua duração é de aproximadamente 2 meses.
3. Segunda fase anaeróbica (formação e aumento de metano): É uma fase anaeróbica em que surge o metano e os demais produtos diminuem. O pH começa a baixar ao mesmo tempo em que os resíduos se convertem em ácidos. Estima-se que têm uma duração de 2 anos.
4. Terceira fase anaeróbica ou de estabilização: Os ácidos produzidos nas fases anteriores se convertem em metano e dióxido de carbono. O pH volta a ter níveis mais neutros. A produção de biogás é máxima nesta fase. Começa aproximadamente depois de um ano do depósito dos resíduos. Tem uma duração de entre 10 e 20 anos, dependendo das condições do aterro. Caracteriza-se por manter as concentrações de CH_4 e CO_2 em torno a 60 e 40%, respectivamente.

5. Fase anaeróbica-aeróbica de finalização. Ocorre uma redução progressiva na geração de biogás. A disponibilidade de matéria orgânica e nutrientes chega a ser limitada. Estabiliza-se a composição do lixiviado. A degradação lenta da matéria orgânica mais recalcitrante continua.

6.3. Conveniências da extração do biogás

A extração do biogás é considerada necessária do ponto de vista ambiental e, em muitos casos, também do ponto de vista energético. Estes gases gerados se deslocam pela massa de resíduos, atingem a superfície e fluem ao exterior. Assim, sua extração do ponto de vista ambiental é importante porque:

- Eliminam-se compostos que contribuem de maneira importante ao efeito estufa. O fato de que o biogás esteja constituído principalmente pelo metano (CH₄), gás com importante efeito estufa, faz com que sua captação evite a liberação destes compostos à atmosfera e, portanto, reduza de maneira importante sua contribuição a este problema ambiental.
- Eliminam-se possíveis riscos de explosões (já ocorridas em alguns aterros) quando determinados gases que o compõem alcançam concentrações críticas (CH₄ neste caso), por serem reativos com o oxigênio do ar em determinadas proporções.
- Evitam-se possíveis riscos de incêndios, sobretudo em dias de elevadas temperaturas.
- Eliminam-se possíveis danos vegetação de a região, já que o biogás desloca o ar do solo e impede o correto desenvolvimento das plantas (não se deve plantar na superfície de um aterro quando previamente não foi desgaseificada).
- Evitam-se odores desagradáveis, devido à presença de compostos que, ainda que presentes em pequenas proporções, têm o inconveniente de ser extremamente fedidos, como é o caso do ácido sulfídrico e dos mercaptanos, principalmente.
- Evitam-se possíveis riscos de redução da concentração de ozônio. O possível conteúdo de hidrocarbonetos clorados e fluorados (fréons) do biogás representa um problema específico. Estes compostos estão presentes nas garrafas de spray e podem escapar ao exterior quando os envases de metal são corroídos. Devido a sua estabilidade química, especialmente dos hidrocarbonetos fluorados, alcançam a estratosfera na qual o átomo de cloro se separa e o radical provoca a ruptura da molécula de ozônio.

Do ponto de vista energético, também é importante sua recuperação, já que pode constituir um potencial de energia, como será visto posteriormente.

6.4. Infraestrutura de extração e aproveitamento do biogás em um aterro sanitário

Melhorar as condições de um aterro a nível de um aterro sanitário adequadamente projetado e operado provavelmente melhorará a coleta de biogás. É importante que as partes interessadas compreendam como os vários componentes de um aterro afetam a geração de biogás, o teor de metano e a eficiência do sistema de coleta de biogás; incluindo como as falhas comuns no projeto e

na operação geral podem afetar a geração de biogás. A implementação de oportunidades de treinamento pode ajudar a reduzir essas deficiências de projeto e operacionais. Aterros bem projetados e operados geram biogás, que pode ser coletado e usado de maneira viável, e proporcionam economia de custos ao longo da vida do projeto.

Uma maneira de reduzir os incômodos e riscos relacionados com emissões de gás e ao mesmo tempo aproveitá-lo para gerar energia é proceder à sua extração. Isto é possível realizando na plataforma do resíduo um sistema de poços aos quais se une um sistema de tubulações para transportar o gás ao lugar em que será processado.

Uma instalação de extração de biogás de aterro está constituída principalmente por poços de captação, tubulações associadas, conjunto de válvulas, equipamento de controle e monitorização, bomba de extração, sistemas de limpeza do biogás e equipamentos de aproveitamento e eliminação dos gases restantes e, além disso, dos fornecedores de energia que fazem com que tudo funcione. A seguir descrevem-se brevemente os elementos básicos de um sistema de extração com aproveitamento de biogás em um aterro sanitário.

6.4.1. Poços de captação e Linhas de condução

Através dos poços de captação regularmente distribuídos por toda a superfície do aterro é realizada a extração do biogás gerado no interior da plataforma de resíduo. Nos poços são introduzidos tubos perfurados (**Ilustração 9**), em aproximadamente 20% de sua área superficial, para permitir a captação do gás, enquanto na parte superior, no último trecho de 2-3m aproximadamente, estes não estão presentes, para evitar fugas. Geralmente utiliza-se polietileno de alta densidade, ainda que também possam ser outros materiais poliméricos sintéticos. Entre o poço e os tubos, com um diâmetro inferior, introduz-se cascalho a fim de drenar o biogás.

Os poços possuem uma cabeça de vedação especial para evitar entradas de oxigênio na vazão de gás e as saídas deste à atmosfera. Pode estar ao ar livre (**Ilustração 10**) ou enterrado (**Figura 29**). A profundidade dos poços é determinada em função do número de camadas de resíduo depositadas. Colocam-se os poços necessários para cobrir toda a superfície do aterro, considerando que o raio de ação seja, aproximadamente, de 25m para aterros sanitários com profundidades de pelo menos 20m.

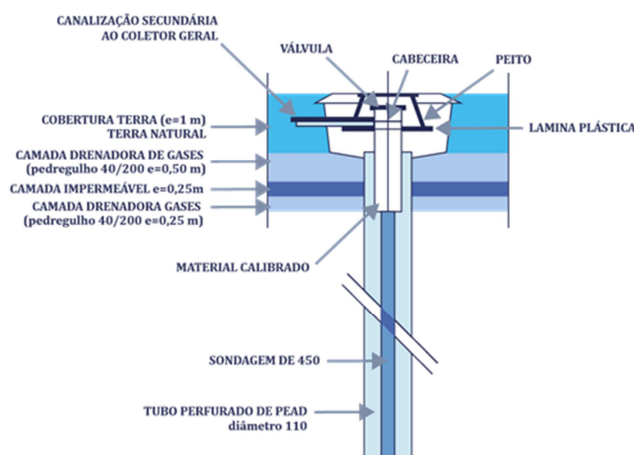


Ilustração 9: Tubos perfurados



Ilustração 10: Cabeça de poço de extração externa

A condução do biogás até o centro de aspiração e medição é realizada através de linhas ou tubos (**Ilustração 11**), neste caso cegos, de polietileno de alta densidade, que vão da cabeça dos poços até a planta de extração ou coletores, conforme o sistema utilizado.



Fonte: Elaborado pelo autor com base em informações coletadas.

Figura 29: Poço com cabeça arqueada.



Ilustração 11: Linhas de condução do biogás

Os poços também podem ser horizontais, embora sejam menos frequentes. Poços de extração horizontal podem ser instalados enquanto o aterro ainda está recebendo resíduos e podem ser usados se a extração de biogás é desejada em uma área antes do fechamento. Os poços de extração horizontal são colocados em uma trincheira entre os resíduos. A vala é preenchida com cascalho (ou outro agregado, como lascas de pneus ou vidros quebrados) e o tubo perfurado é instalado no centro da vala. Recomenda-se um tecido geotêxtil no topo da vala para reduzir o bloqueio do agregado pelo aterro ou detritos depositados no topo.

6.4.2. Tocha

Todas as instalações de extração e aproveitamento de biogás devem estar equipadas com uma tocha como medida de segurança para eliminar o biogás que não é aproveitado (**Ilustração 12**). A queima é realizada por razões ambientais (redução das emissões de metano), mas principalmente para atenuar os riscos de incêndio e explosão.



Ilustração 12: Tocha instalada no aterro

6.4.3. Estação de regulação e medida

A estação de regulação e medida (**Ilustração 13**) controla a quantidade e qualidade (metano e oxigênio) do biogás extraído em cada linha. A localização da instalação ocorre em uma área que não afete à exploração normal do aterro e próxima aos poços de captação.



A **Figura 30** mostra um esquema com todos os elementos necessários para realizar a extração global de biogás de um aterro sanitário.



Figura 30: Sistema de extração global de biogás em um aterro sanitário

O biogás do aterro deve ser previamente refinado de acordo com aplicação de energia. Além disso, tendem a ter um número maior de compostos minoritários que o biogás dos biodigestores. Os sistemas de purificação variam dependendo do uso que será dado. O mais comumente usado é a cogeração. Neste caso, devido ao seu alto teor de umidade e, normalmente, a presença de compostos corrosivos, é necessário condicioná-lo antes de seu uso.

Em seguida, os componentes a serem reduzidos/excluídos e o motivo são exibidos.

- O vapor de água reduz drasticamente o ICP do biogás, além de facilitar a formação de ácidos corrosivos. Um sistema de remoção de água é usado para remover a maior parte do vapor de água que drena o biogás. Normalmente, instalações de refrigeração são usadas.
- Hidrocarbonetos halogenados Particularmente aqueles que têm cloro e flúor favorecem a corrosão das partes internas das máquinas.
- Sulfeto de hidrogênio (H_2S). Prevenir a corrosão e evitar concentrações tóxicas para o ser humano, bem como evitar a formação de óxidos de enxofre (SO_2) que possibilitam a formação de ácido sulfuroso (H_2SO_3), altamente corrosivo. É necessário eliminá-lo abaixo de certos limites para que o biogás possa ser usado pelo equipamento.
- Siloxanos Evitar a deposição de sílica nas diferentes partes internas das máquinas, eliminando assim a possibilidade de desgaste de peças e a perda de estabilidade de partes que giram em alta velocidade.

Existem métodos específicos para reduzir a concentração de H_2S , como biofiltros e filtros de ferro, e para a redução de umidade, como armadilhas de água e condensação. Como métodos gerais para a redução de H_2S , siloxanos, vapor de água, hidrocarbonetos halogenados, etc., é utilizado carbono ativo ou uma combinação de métodos.

Este tópico é desenvolvido mais profundamente no próximo capítulo.

6.4.6. Custos de investimento associados

A viabilidade econômica dos projetos de uso energético do biogás de aterro depende em grande parte da identificação de mecanismos de financiamento adequados, avaliando a viabilidade econômica de várias opções e selecionando a opção mais viável para atender aos objetivos das partes interessadas (por exemplo, objetivos financeiros, benefícios de saúde pública, proteção ambiental e mitigação da mudança climática)

Na **Tabela 42** são resumidos os custos de investimento associados à tecnologia de biogás de aterro (Terraza and Willumsen, 2010).

Tabela 42: Custos de investimento de uma planta de biogás de aterro sanitário

Componentes	Custo	Custo/t (\$U.S.) *
Preparação do projeto	10% - 15% de a investimento total	0,08 - 0,18 US\$/t
Sistema de captação	30.000 - 50.000 US\$/ha	0,15 - 0,40 US\$/t
Sistema de bombeamento de gás**	75 - 200 US\$/m ³ biogás/hora	0,05 - 0,30 US\$/t
Sistema de queima	40 - 80 US\$/m ³ biogás/hora	0,02 - 0,04 US\$/t
Unidades de motor de gás/gerador	1.100 - 1.700 US\$/kWe instalado	0,60 - 1,10 US\$/t
Sala de caldeiras	40 - 80 US\$/kW calor instalado	0,17 - 0,34 US\$/t

* Toneladas de resíduos no aterro. ** Inclui o ventilador ou compressor, o controle e a regulação, e o tratamento.

Fonte: Terraza and Willumsen, 2010.

Na **Tabela 43** se resumem os custos de operação e manutenção associados à tecnologia de biogás de aterro mais apropriada à América Latina e o Caribe.

Tabela 43: Custos anuais de operação e manutenção para diferentes sistemas de biogás de aterro sanitário

Tipo de planta de biogás	Custo anual de operação e manutenção*
Planta com sistema de tocha	4% - 8% do custo total de investimento
Planta com sistema de caldeiras	4% - 8% do custo total de investimento
Planta com produção de eletricidade	10% - 12% do custo total de investimento

* Toneladas de resíduos no aterro.

Fonte: Terraza and Willumsen, 2010.

6.5. Potencial energético de um aterro sanitário

A propriedade mais interessante do biogás é seu valor energético, devido ao seu elevado conteúdo de metano. A composição do biogás afeta às possibilidades de seu aproveitamento, já que a concentração de metano determina seu poder calorífico inferior (Pci) e uma elevada concentração de algum de seus componentes (ácido sulfídrico, compostos orgânicos halogenados...) pode torna-lo suficientemente corrosivo para tornar inviável seu aproveitamento energético, principalmente em motores. O Pci de um biogás com um conteúdo de metano de 60% é de 5.500 kcal/m³N.

6.5.1. Produção de biogás em um aterro sanitário.

A produção de biogás depende de vários parâmetros, a saber: 1. A temperatura no aterro (a maior temperatura, mais rápida, é a decomposição e a produção de biogás); 2. O índice de umidade da massa de resíduos, determinado pelo tipo de resíduos e o nível de precipitações na região (a produção ideal de biogás requer um nível de umidade de 50-60 % ou superior); 3. A composição dos resíduos (o conteúdo de carbono degradável determina a produção potencial de biogás); 4. A estrutura dos resíduos (as partículas pequenas oferecem condições mais apropriadas para as bactérias produtoras de metano); 5. O tempo dos resíduos (geralmente, a produção máxima ocorre entre 3 e 8 anos depois do depósito e diminui gradualmente durante os 30 a 75 anos seguintes); 6. O uso de uma cobertura final para impedir a penetração de ar da atmosfera, permitindo, não obstante, a infiltração da água da chuva, e 7. O desenho, o plano operativo e as práticas de aterro nas instalações, especialmente as práticas de compactação e cobertura (EPA, 2005a). A estimativa da produção de biogás de um aterro sanitário é, portanto, difícil de avaliar.

Teoricamente, pode-se considerar que são produzidos 370 m³ de biogás por tonelada de resíduos depositados, com um conteúdo aproximado a 50% de matéria orgânica e com uma umidade de 35%. Considerando que somente uma parte dos resíduos é biometanizável, que nem todo o biogás pode ser extraído (geralmente 50-70% utilizando tecnologias de extração eficientes) e que uma parte pode escapar à atmosfera, pode-se considerar, como dado orientativo, que por tonelada de resíduo depositado podem ser extraídos e utilizados 100 m³ de biogás em um período de tempo de 15 a 20 anos.

Em um estudo mundial realizado pela ISWA (ISWA, 2004) também foi examinada a taxa real de extração de biogás (m³ de biogás por tonelada de resíduos por ano) a partir das plantas de biogás existentes. A análise revelou uma taxa de extração de 3 a 6 m³ de biogás por tonelada de resíduos sólidos por ano durante a vida útil de cada um dos aterros estudados.

Em quatro dos cinco projetos analisados na região da ACL como parte do estudo do Banco Mundial, as taxas de extração oscilavam entre 2 e 5 m³ de biogás por tonelada ao ano, com exceção de uma instalação na que o nível extremadamente alto de lixiviado impedia a extração dos poços de gás, limitando a extração apenas 0,5 m³ anuais de gás por tonelada (Boulet, et al, 2010).

Os valores experimentais descritos na bibliografia diferem consideravelmente devido precisamente ao carácter local dos fatores anteriormente expostos, inclusive dentro de um mesmo país estes fatores

podem variar de umas regiões a outras, o que dificulta a aplicação direta dos dados bibliográficos obtidos de estudos realizados. Devido a estas variações, a realização de um projeto de desgaseificação com aproveitamento de biogás em um aterro requer estudos prévios de viabilidade para estabelecer a qualidade e quantidade de biogás produzido para poder estimar o potencial energético do mesmo.

Durante os últimos 30 anos foram desenvolvidos diversos modelos para estimar a produção e extração de biogás (EPA, 2005a): (i) o modelo de ordem 0 considera a produção de um volume anual constante de biogás até que todo o carbono degradável seja descomposto; por não incluir o efeito da idade dos resíduos, este modelo somente permite uma estimativa das emissões nacionais e globais de biogás, (ii) o modelo de ordem 1 parte do pressuposto de que os resíduos se degradam de forma exponencial com o tempo; um modelo de ordem 1 utilizado com frequência é o modelo de emissões de biogás (LandGEM) 3.02 da Agência de Proteção do Meio Ambiente (EPA) dos Estados Unidos (EPA. Modelo de emissões LandGEM); (iii) o modelo multifase considera volumes específicos de distintos tipos de resíduos, incluído seu conteúdo em carbono, para estimar a produção de biogás a partir de cada categoria de resíduos. Este modelo é utilizado para fazer estimativas nos projetos do MDL e pode ser consultado no lugar virtual do Grupo Intergovernamental de Especialistas sobre Mudança Climática (IPCC) (IPCC, 2006).

Destes, o US EPA LandGEM é o modelo mais amplamente utilizado nos Estados Unidos e em um grande número de países (EPA, 2005b). A partir daí, versões adaptadas às características de alguns países da ALC foram feitas (América Central, Equador, Colômbia, México, ver Webgrafia).

Landfill Gas Emissions Model (LandGEM). Versão 3.02.

O "Landfill Gas Emissions Model" (LandGEM) é uma ferramenta de estimativa automática, adaptada ao programa de cálculo "Microsoft Excel", utilizada para estimar as emissões produzidas em um aterro sanitário de RSU, tanto de biogás, quanto de cada um de os gases que compõem o mesmo, como o metano, o dióxido de carbono, os componentes orgânicos que não sejam metano e outros tipos de contaminantes atmosféricos que poderiam ser produzidos devido natureza heterogênea dos RSU depositados.

Em páginas da internet estão disponíveis os vínculos para estes modelos, bem como versões do mesmo adaptadas a distintos países e regiões da região ALC (Equador, Colômbia, México e América Central) e de outros países.

O modelo está baseado em uma equação de primeira ordem na qual se estima a quantidade de metano por ano produzido no aterro e, a partir da mesma, estima-se as quantidades de emissões dos demais gases contaminantes.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 kL_0 \left(\frac{M_i}{10} \right) e^{-kt_{ij}}$$

A equação possui fatores de emissão ou parâmetros essenciais, já que proporcionam a informação adequada para poder estimar com mais precisão a quantidade e tipo de emissões formadas em um aterro de RSU, estes parâmetros incluem fatores tão importantes na produção de biogás quanto a umidade, a temperatura, a quantidade de nutrientes disponíveis para os microrganismos, o pH, a composição dos RSU, a presença de resíduos perigosos... já que a formação de biogás está baseada em reações biológicas anaeróbicas, nas quais os fatores ambientais externos influenciam de uma maneira importante.

O modelo utiliza dois tipos de fatores de emissão padrão para a k (constante de geração de biogás) e a L_0 (potencial de geração de biogás). A primeira está influenciada pela temperatura, umidade, disponibilidade de nutrientes para os microrganismos e o pH, e a segunda, pelo tipo e a composição dos RSU.

- $k \Rightarrow$ influenciada pela temperatura, umidade, disponibilidade de nutrientes para os microrganismos e o pH.
- $L_0 \Rightarrow$ influenciada pelo tipo e a composição dos RSU.

Os fatores padrão são os da CAA (Clean Air Act) baseados na normativa dos EUA e os de inventário. Estes últimos são os que a EPA recomenda para estimar emissões e realizar um inventário das mesmas, de um modo geral, podendo ser aplicado às condições normais que ocorrem em qualquer aterro de RSU.

Também existe a opção de poder introduzir estes fatores de emissão estimados com os dados do aterro sobre o quais se pretenda estimar suas emissões. Esta opção seria a mais correta, já que seriam consideradas as características e fatores ambientais do aterro específico, que como já se contou, são muito importantes para poder conhecer de um modo mais fidedigno a quantidade de biogás e dos gases que o compõem, gerados em um aterro.

Os dados requeridos pelo modelo LandGEM para estimar as emissões produzidas em um aterro de RSU são basicamente:

- ano de abertura.
- ano de fechamento (Quando desconhecido é calculado considerando a quantidade de RSU anual introduzida e a capacidade total calculada do aterro).
- quantidade anual de RSU depositados.
- L_0 e k padrão ou calculando-as com os dados característicos de cada instalação.
- gases contaminantes que se deseje estimar.

6.5.2. Potencial do biogás

Em 2003 foram contabilizadas mundialmente 1.150 plantas de conversão de biogás em energia (ISWA, 2004), com uma produção de energia de 3.920 MW e uma taxa de extração de 3,1 m³/t/ano (Willumsen, 2003). Posteriormente, a EPA reuniu informação atualizada sobre 509 plantas de biogás operativas nos Estados Unidos até 2009. A nova informação e as estimativas baseadas em dados prévios indicam que em 2008 existiam no mundo aproximadamente 1.400 plantas de biogás (Boulet, 2010). Atualmente, a utilização do biogás para aplicações energéticas (nos aterros tradicionais e biorreatores) é de apenas, aproximadamente, 10% de seu uso potencial.

Com relação à Espanha, em pouco mais de 10 anos passou-se de 0 a mais de 40 plantas de biogás de aterro. Atualmente, em 42 aterros espanhóis o biogás está sendo aproveitado para gerar energia elétrica através de mais de 100 motores de cogeração, com uma potência instalada que supera os 100 MW (Carreras, 2011a). Este rápido crescimento teve origem ambiental, já que foi motivado pela entrada em vigor do Real Decreto 1481/2001 que regula a eliminação de resíduos mediante depósito em aterro que, por sua vez, foi emitido por exigência da Diretiva Europeia relativa ao depósito de resíduos (Diretiva 1999/31/CE).

Os aterros sanitários de Bandeirantes (Brasil), Monterrey (México) e Doña Juana (Colômbia), dentre outros, são exemplos de aproveitamento energético do biogás extraído dos aterros sanitários da região da ALC, que surgiram como projetos MDL.

O biogás pode ser usado na geração de energia sempre que as condições do mercado energético local assegurem sua viabilidade. A energia produzida desta forma desloca o consumo de combustíveis fósseis e reduz as emissões de gases de efeito estufa pelas plantas geradoras existentes. Os sistemas de aproveitamento da energia do biogás podem ser de vários tipos e serão vistos no Capítulo 9.

6.6. Projetos MDL em aterros sanitários.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é uma ferramenta que permitiu financiar projetos para reduzir as emissões de GEE em países não industrializados, tendo como condição indispensável que contribuam ao desenvolvimento social, econômico e ambiental do país onde são implementados. Os projetos relacionados com a captura de biogás em aterros estão contemplados como projetos MDL.

Esse mecanismo permitiu o registro de 7.800 projetos e programas em 107 países em desenvolvimento, com investimentos de centenas de bilhões de dólares, o que significou 1.500 milhões menos de toneladas de gases de efeito estufa lançados na atmosfera (IPS, 2014).

Em abril de 2012, a América Latina e o Caribe (LAC) tinham registrados 584 projetos de MDL (15% do total), 1.832 tinha China (47%) e 786 Índia (20%). Contudo, em termos relativos, a participação da ALC no MDL é muito maior do que em outras regiões do mundo, como Europa e Ásia Central, África e Oriente Médio, que têm apenas 1%, 3% e 1% do total de projetos, respectivamente (Statistics MDL, 2012).

Com respeito ao tipo de projetos MDL na ALC, os relativos à captura de metano em aterros, com 12%, ocupam o terceiro lugar depois dos projetos de energias renováveis (56%) e projetos de metano evitado (21%). Logo atrás estão os projetos de eficiência energética, tanto do lado da oferta, quanto da demanda (3% cada um), os projetos de reflorestação e plantio de árvores (2%), a redução de HFC e N₂O (2%) e a troca de combustível (1%).

No entanto, atualmente o instrumento das Nações Unidas para apoiar projetos de emissões de carbono em países em desenvolvimento, o MDL (responsável pelas reduções certificadas de emissões (RCEs)), está em crise devido ao colapso dos preços que são pagos por créditos de carbono. O preço das RCEs caiu para 0,30 dólares em 2014, comparado a mais de 30 dólares em 2009.

O MDL entrou em colapso porque nos últimos anos a demanda dos principais compradores caiu, países forçados a reduzir suas emissões poluentes sob o Protocolo de Kyoto, porque as metas de redução não aumentaram significativamente, pois houve um crescimento econômico mais lento. Segundo o presidente do conselho executivo do MDL, a fonte do problema foi a diretiva da União Europeia (UE) de 2009 (para restringir a possibilidade de créditos internacionais e proibi-los totalmente a partir de 2020), que entrou em vigor em 1 de janeiro de 2013 (ISP, 2014a).

Para a Aliança dos Pequenos Estados Insulares (APEI, AOSIS em inglês), criada em 1990 com o objetivo principal de consolidar as vozes dos SIDS para enfrentar o aquecimento global, dado que o financiamento é um pilar central do acordo climático de 2015, O status atual do MDL é outro problema preocupante. Do ponto de vista da AOSIS, eles argumentam que o preço das RCEs pode ser aumentado com "tecnologias verdes e com incentivos para os países terem projetos mais favoráveis ao meio ambiente" através do MDL (ISP, 2014b). Em 2012, o SIDS tinha 31 projetos em andamento e 10 projetos registrados, totalizando 8215 mil RCEs. Em 2015, 28 SIDS não tinham projetos de MDL em preparação (Williams, 2015).

6.6.1. Caso prático. Nova planta no aterro sanitário de Bordo Poniente (México)

Há alguns meses, concretamente no dia 1 de novembro de 2012, divulgou-se a adjudicação do contrato de exploração da planta de biogás do aterro sanitário de Bordo Poniente (México) ao consorcio BMLMX Power Company SAPI durante 25 anos. O consorcio, formado por três empresas

espanholas (Energia Sur de Europa, CLP Organogas e Tegner) e empresas mexicanos (RAM Carbon México, JCH Inversion Redituável e Iberaltec), será encarregado de administrar a produção de biogás do aterro de Bordo Poniente, do Distrito Federal do México, o maior aterro do México que acumulou resíduos durante duas décadas.

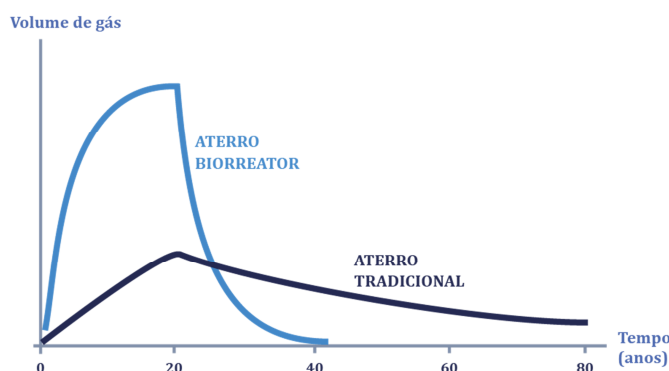
O contrato implica o saneamento e o fechamento definitivo do aterro, que acumula 72 milhões de toneladas de resíduos e gera 26% dos gases de efeito estufa emitidos pela Cidade do México. O projeto inclui a construção de uma planta que utilizará o biogás para gerar 58 megawatts por hora. A nova planta de biogás implica um investimento de 125 milhões de euros. A licitação permitirá ao consórcio gerir uma concessão de 25 anos para produzir biogás em Bordo Poniente. O projeto foi considerado o quinto mais importante da ALC. Quando expire a concessão, o consórcio espanhol mexicano deixará a administração do aterro em mãos da comissão Nacional da Água. O projeto energético e fechamento definitivo de Bordo Poniente evitará a emissão à atmosfera 1,2 milhões de toneladas de CO₂ por ano.

6.7. Aterro Biorreator Anaeróbico

O Regulamento da Lei de Ar Limpo da USEPA (40 CFR 63.1990, Normas Nacionais de Emissões para Perigosos Contaminantes do Ar) define um aterro biorreator anaeróbico como: *"Um aterro sanitário de RSU, ou uma parte dele, ao qual se adiciona líquido, incluído o lixiviado ou o condensado do biogás, à massa de resíduos de maneira controlada (geralmente em combinação com a recirculação de lixiviados) para chegar a uma média mínima de umidade de 40% em peso, a fim de acelerar ou melhorar a biodegradação anaeróbica dos resíduos"*.

Portanto, a função principal do verdadeiro biorreator é acelerar a degradação e estabilizar os resíduos mantendo a umidade adequada para os microrganismos (Reinhart et al., 2002).

A pesquisa indica que um aterro biorreator pode gerar biogás a um ritmo mais alto do que os aterros tradicionais (Yazdani et al., 2006). O biogás também é gerado durante um período de tempo mais curto, devido ao fato de que se esgota antes a fonte de resíduos (**Figura 31**). O resultado é que o biorreator produz mais biogás, e em um período de tempo mais curto do que o aterro tradicional.



Fonte: Yazdani, 2007

Figura 31: Produção de metano em um aterro biorreator e um aterro convencional

6.7.1. Características dos aterros biorreatores anaeróbicos

Os lixiviados são inseridos no biorreator para estimular o processo de biodegradação natural. Os biorreatores com frequência precisam de outros líquidos tais como águas pluviais, águas residuais, e

lodos das plantas de tratamento de águas residuais para complementar o lixiviado e melhorar, assim, o processo microbiológico através do controle da umidade (Reinhart and Townsend, 1998).

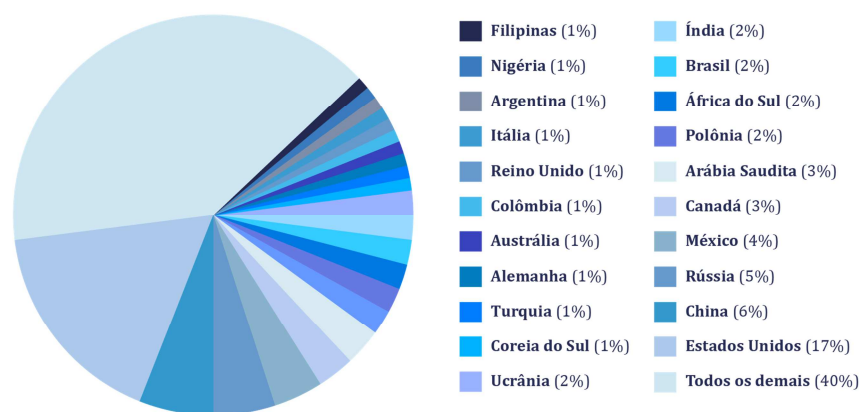
O aterro biorreator se diferencia de um aterro convencional na recirculação controlada do lixiviado; os aterros que somente recirculam os lixiviados não necessariamente funcionarão como biorreatores otimizados.

Assim, o conteúdo de umidade é o fator mais importante que promove a degradação acelerada. A tecnologia do biorreator está baseada na manutenção do conteúdo da umidade ideal, próximo à capacidade de campo (aproximadamente entre 35 e 65%) e na adição de líquidos quando seja necessário para manter essa porcentagem. O conteúdo de umidade, combinado com a ação biológica dos microrganismos presentes nos resíduos é o que produz a degradação dos mesmos. Uma consequência é, como já se afirmou, que produz mais biogás em um período de tempo mais curto do que o aterro convencional.

6.7.2. Vantagens potenciais dos aterros biorreatores anaeróbicos

O fato de que a decomposição e estabilização biológica dos resíduos em um aterro biorreator ocorra em um período de tempo muito mais curto do que em um aterro convencional (seco) proporciona uma série de vantagens (Valencia, R. 2008), os quais são descritos abaixo (EPA, 2003):

- Decomposição e estabilização biológica dos resíduos em anos, enquanto nos aterros convencionais demoram décadas.
- Baixa toxicidade e mobilidade dos resíduos devido às condições anaeróbicas.
- Redução dos custos de tratamento dos lixiviados.
- Ganha-se entre 15 e 30% de espaço nos aterros, já que aumenta-se a densidade dos resíduos.
- Ocorre um significativo aumento da geração de biogás que pode ser utilizado para produzir energia.
- Reduz a manutenção pós-fechamento.
- Como o biogás é gerado antes, e em um período curto de tempo, pode ser recuperada uma maior quantidade diminuindo as emissões à atmosfera, prevenindo o efeito estufa e reduzindo ao mínimo os riscos ambientais associados à decomposição do resíduo (**Figura 32**).



Fonte: EPA, 2004.

Figura 32: Emissões mundiais de metano de aterros (2005)

Por sua vez, esta circunstancia favorece a aplicação em projetos de recuperação de energia. Alguns estudos indicam que o biorreator aumenta a possibilidade de tornar rentável a recuperação do biogás e, ao mesmo tempo, reduz as emissões fugitivas (Yazdani et al., 2006). Isto representa que são uma boa oportunidade para os projetos de recuperação de energia. Como já foi comentado, atualmente a

utilização do biogás para aplicações energéticas (nos aterros tradicionais e biorreatores) é apenas de 10% de seu uso potencial. O Departamento de Energia dos EUA estima que se atualmente a tecnologia de biorreatores fosse aplicada a 50% dos resíduos depositados em aterros, poderia proporcionar mais de 270 bilhões de pés cúbicos de metano por ano, o que equivaleria a um por cento das necessidades elétricas dos Estados Unidos.

6.7.3. Fatores a serem considerados nos aterros biorreatores anaeróbicos

A Agência Americana de Proteção Ambiental (USEPA) está coletando informação sobre as vantagens e inconvenientes dos aterros biorreatores através de estudos de casos de aterros existentes e dados adicionais, a fim de poder identificar normas específicas para os biorreatores ou recomendar os parâmetros de funcionamento. A EPA, antes de identificar as normas ou recomendar os parâmetros, deve considerar uma série de fatores.

Os aterros biorreatores geralmente são sistemas de engenharia com altos custos iniciais de investimento e requerem um acompanhamento e controle adicionais durante sua vida útil, ainda que possam representar um menor controle durante o período pós-fechamento do que o necessário para os aterros convencionais. As questões que devem ser abordadas durante o desenho e operação de um aterro sanitário biorreator são: O aumento das emissões de gases; O aumento dos odores; A instabilidade física da massa de resíduos devido ao aumento da umidade e a densidade; A instabilidade dos sistemas de revestimento; As possíveis filtrações superficiais e os incêndios de aterros sanitários.

6.7.4. Pesquisas da EPA sobre o aterro sanitário biorreator. Caso prático: aterro do Condado de Yolo

A EPA está estudando e realizando pesquisas e demonstrações em aterros biorreatores a fim de avaliar distintos aspectos como o desenho, a monitorização, o comportamento, a viabilidade econômica, etc. Um dos principais estudos é o realizado no aterro sanitário do Condado de Yolo. Em primeiro lugar, desenvolveu-se um biorreator a escala piloto e, dados os bons resultados obtidos, posteriormente foram feitas duas escalas mais de demonstração (3,5 e 6 acres), como parte do Projeto XL da USEPA (*United States Environmental Protection Agency*). O objetivo geral do projeto é gerir o resíduo para uma rápida degradação dos resíduos sólidos e a máxima geração e controle de emissões. A degradação anaeróbica dos resíduos é acelerada melhorando as condições do processos biológico, o que implica inserir quantidades controladas de líquido (lixiviados, águas subterrâneas, águas cinzas, etc.).

Ensaio piloto

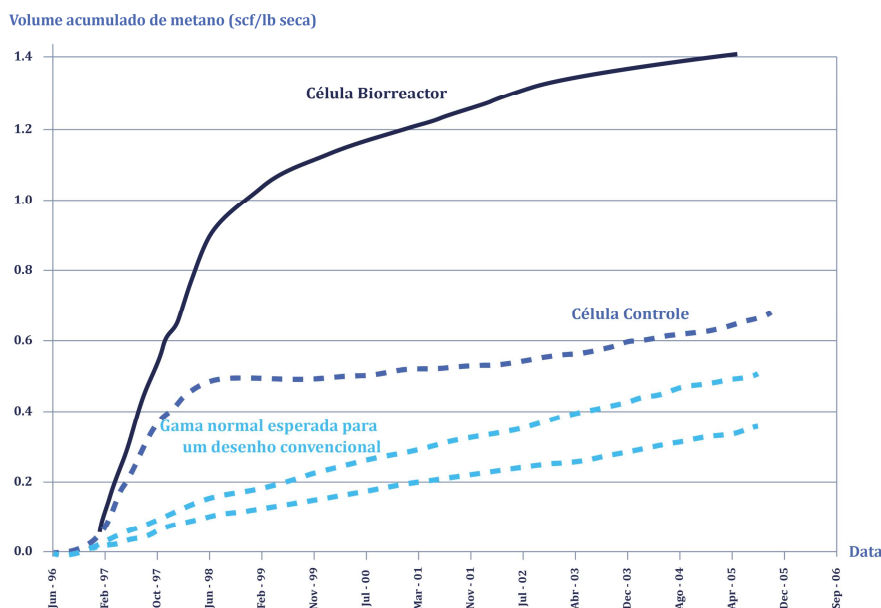
O projeto piloto de demonstração de Yolo consistiu na construção e operação de duas células piloto, que continham cerca de 9.000 toneladas de RSU cada uma. Uma célula recebeu a recirculação dos líquidos, "célula melhorada", enquanto a outra era operada como controle, isso é, como um aterro tradicional (Yazdani et al., 2002).

As características mais importantes foram:

- Um sistema de coleta de lixiviados sob os resíduos de alta permeabilidade.
- Vários sensores de umidade e temperatura distribuídos pelas células (mais de 50) para controlar o processo.
- Uso de um resíduo permeável (Green Waste) como cobertura diária para melhorar a permeabilidade.

- Uma geomembrana para cobrir a superfície e evitar emissões de gases.
- Introdução e recirculação de líquidos mediante a adição superficial em vários pontos.
- A extração de gás mediante a aplicação de um pequeno vácuo.

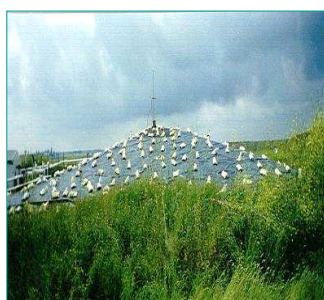
As características específicas das células de ensaio foram: 100 pés por 100 pés por 40 pés de profundidade. Os sensores de umidade e temperatura estavam em 3 camadas da célula melhorada e em duas da célula de controle. A adição de líquido foi lenta e de fácil gestão, de 0,2 a 0,6 gal/ft².dia. Após vários anos de estudo, os resultados obtidos estão na **Figura 33**. Como é possível observar, há uma diferença considerável na produção de biogás entre uma célula e outra.



Fonte: Yazdani, 2007

Figura 33: Metano acumulado na célula melhorada e na célula controle. Experiência piloto.

Isto está evidenciado na **Ilustração 14**, que mostra o estado das duas células depois dos anos de pesquisa.



Célula Controle



Célula Biorreator

Fonte: Yazdani, 2006.

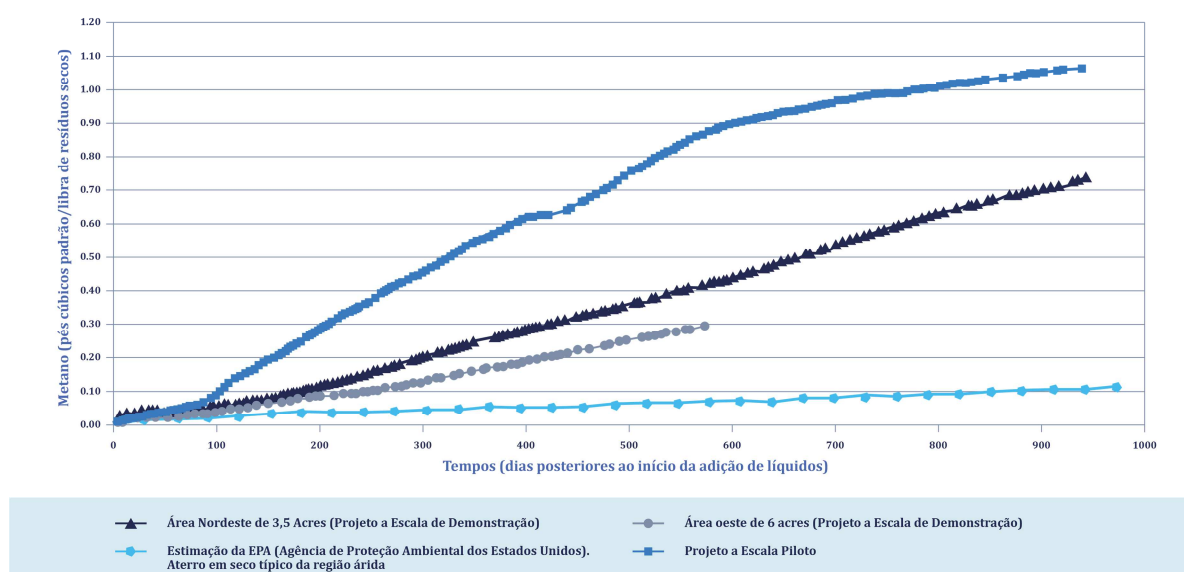
Ilustração 14: Estado das células controle e biorreator depois de uns anos de pesquisa.

Como evidenciam as imagens, a célula Biorreator sofreu um maior ajuste como consequência de que os processos degradativos ocorreram mais rapidamente. Os bons resultados alcançados na experiência piloto motivaram a realização de um ensaio a escala de demonstração.

Escala de Demonstração

A segunda fase do projeto implicou a construção de um módulo de 9,5 acres que continha uma célula de 6 acres e outra de 3,5 acres no aterro central do Condado de Yolo (Califórnia). Todas as células foram muito instrumentalizadas para controlar o rendimento do biorreator (sensores de umidade, temperatura....).

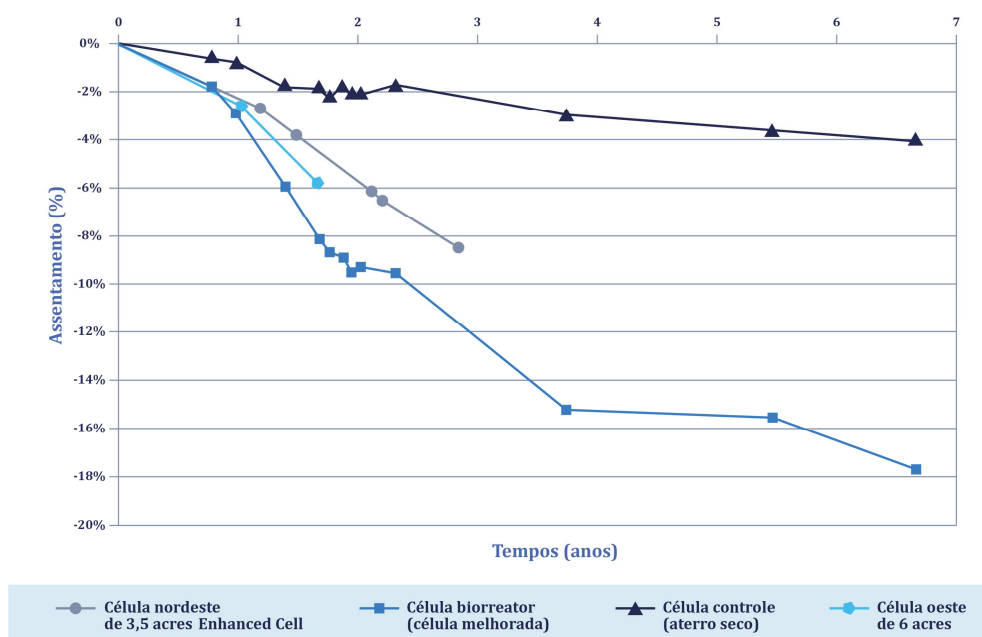
Na **Figura 34** são apresentados os resultados obtidos com relação à porcentagem de volume de metano acumulado no conjunto das experiências realizadas com as células anaeróbicas sensorizadas no aterro de Yolo, dentro do projeto XL da EPA. Em todos os casos, foram obtidos valores superiores aos estimados para uma célula controle (Yazdani et al., 2006).



Fonte: Yazdani, 2006-2007.

Figura 34: Metano acumulado nas células controle e biorreator. Projeto de demonstração

Do mesmo modo, a **Figura 35** apresenta os resultados obtidos com relação ao ajuste produzido no conjunto das experiências feitas nos Estados Unidos com as células anaeróbicas sensorizadas dentro projeto XL de a EPA. Em todos os casos, os valores obtidos são superiores aos estimados para uma célula convencional. Observa-se um ajuste maior nas células anaeróbicas biorreatores do que na célula controle.



Fonte: Yazdani, 2006-2007.

Figura 35: Ajuste produzido na célula controle e nas células anaeróbicas biorreatores

Como conclusões do estudo é possível dizer que o aterro piloto biorreator de Yolo County se comportou como era esperado em praticamente todos os aspectos. Dentre os principais benefícios cabe destacar o aumento da captura de metano para energia e a prevenção das emissões de metano. Este sucesso serviu de base para a ampliação em grande escala do próprio aterro. Os resultados obtidos na célula maior confirmam novamente o maior rendimento alcançado nas células infiltradas com líquido.

Resumo do Capítulo 6

Dos métodos atualmente existentes para o tratamento dos resíduos, o depósito continua sendo a opção mais utilizada devido aos baixos custos econômicos que representa, a rejeição social à incineração e às limitações existentes para reciclar resíduos. Apesar de sua simplicidade em comparação com outras tecnologias (incineração, gaseificação), o que constitui uma vantagem, o aterro sanitário não admite ato improvisados. Deve ser contemplado como uma obra de engenharia que exige um projeto concreto que, baseado em estudos adequados, permita a escolha apropriada da solução mais convenientes. Um aterro é considerado sanitário quando são tomadas as medidas oportunas para evitar tudo o que seja nocivo ao meio ambiente. De acordo com uma publicação do Banco Mundial em uma revisão global da gestão de resíduos sólidos, 59% dos resíduos no mundo são aterrados (Hoornweg e Bhada-Tata, 2012).

Ao enterrar os resíduos, a fração orgânica contida nele se degrada de forma lenta e em condições anaeróbicas, o que faz com que ao longo do tempo nos aterros sanitários sejam formado o biogás no interiores de suas plataformas de depósito. É conveniente extrair este gás não apenas do ponto de vista ambiental, pois evita-se a emissão de gases de efeito estufa (GEE), mas também porque pode ser utilizado como fonte de energia. Uma instalação de extração de biogás de aterro está constituída, principalmente, por poços de captação, tubos associados, conjunto de válvulas, equipamento de controle e monitorização, bomba de extração, sistemas de limpeza do biogás e equipamentos de aproveitamento e eliminação dos gases restantes e, ademais, dos fornecedores de energia que fazem com que tudo funcione.

A geração de biogás depende de vários parâmetros: temperatura, índice de umidade, composição, estrutura e antiguidade de os resíduos, uso de cobertura final e desenho.

Existem modelos para estimar a geração de biogás em um aterro sanitário. Destes, o USEPA LandGEM é o modelo mais utilizado nos Estados Unidos e em um grande número de países (EPA, 2005b). Dele, versões adaptadas às características de alguns países da ALC foram feitas (América Central, Equador, Colômbia, México, ver Webgrafia).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) é uma ferramenta que permitiu financiar projetos para reduzir as emissões de GEE em países não industrializados, como é o caso dos projetos relacionados com a captura do metano em aterro. Esse mecanismo permitiu o registro de 7.800 projetos e programas em 107 países em desenvolvimento, com centenas de bilhões de dólares em investimentos, o que significou menos 1.500 milhões de toneladas de gases de efeito estufa liberados na atmosfera (IPS, 2014a).

No entanto, atualmente o instrumento da Organização das Nações Unidas para apoiar projetos de emissões de carbono em países em desenvolvimento, o MDL, (responsável por reduções certificadas de emissões (RCEs)), está em crise devido à colapso dos preços pagos pelos créditos de carbono. O preço das RCEs caiu para 0,30 dólares em 2014, comparado a mais de 30 dólares em 2009. Segundo o presidente do conselho executivo do MDL, a fonte do problema foi a diretiva da União Europeia (UE) de 2009 (para restringir a possibilidade de créditos internacionais e proibi-los completamente a partir de 2020), que entrou em vigor em 1 de janeiro de 2013 (ISP, 2014a).

Para a Aliança dos Pequenos Estados Insulares (AOSIS), criada em 1990 com o objetivo principal de consolidar as vozes dos SIDS para enfrentar o aquecimento global, dado que o financiamento é um pilar central do acordo climático de 2015, o status atual do MDL é outro assunto preocupante. Do ponto de vista da AOSIS, eles argumentam que o preço das RCEs pode ser aumentado com "tecnologias verdes e com incentivos para os países terem projetos mais favoráveis ao meio ambiente" através do MDL (ISP, 2014b). Em 2012, os SIDS tinha 31 projetos em andamento e 10 projetos registrados, totalizando 8215k RCE. Em 2015, 28 SIDS não tinham projetos de MDL em preparação (Williams, 2015).

Com relação aos aterros biorreatores, nos Estados Unidos está sendo realizada há alguns anos uma importante pesquisa pelas vantagens que possuem em relação com os aterros convencionais. Um aterro biorreator anaeróbico é um sistema isolado do meio que favorece a degradação microbiana dos resíduos biodegradáveis mediante a adição de umidade, controlando as condições que influenciam o processo. Seu funcionamento está baseado em adicionar quantidades controladas de um líquido para aumentar o conteúdo de umidade do lixo depositado nos aterros, favorecendo a biodegradação anaeróbica por estimulação dos microrganismos presentes. O mais usado é a recirculação do efluente de drenagem (lixiviados). O objetivo é acelerar o processo degradativo dos resíduos biodegradáveis e a produção de biogás, estabilizando o processo em um prazo de tempo mais curto, de cerca de 10 anos, diante dos mais de 30 anos de duração dos aterros sanitários convencionais. Dentre suas principais vantagens destaca-se a redução da emissão de GEE, poder aproveitar o biogás e recuperar ambientalmente a região. Seu principal inconveniente é que possui um maior custo e a necessidade de um maior acompanhamento para controlar a adição do lixiviado e a estabilização do aterro.

Atualmente nos Estados Unidos existem muitos projetos de pesquisa relacionados com esta tecnologia. A EPA está acompanhando diversos aterros biorreatores a fim de resolver as incertezas que ainda existem sobre a estabilidade da massa de resíduo, o comportamento do revestimento e o aumento das possíveis emissões quando se produz maior quantidade de biogás. Um dos estudos que realizado há vários anos está no aterro sanitário de Yolo (Califórnia). Os bons resultados obtidos em células piloto levaram à realização de um aterro biorreator a escala de demonstração no qual também se comprovou que existe uma diferença significativa na produção de biogás em um espaço maior, o que confirma que o processo degradativo sofreu uma importante aceleração.

7. O Biogás

Biogás é o nome genérico dos gases produzidos como consequência da degradação anaeróbica ou biometanização dos resíduos orgânicos, independentemente da matéria prima e da técnica utilizada. Aquele produzido a partir da matéria orgânica dos RU nos aterros também é conhecido na bibliografia como gás de aterro.

O biogás está constituído principalmente por metano e dióxido de carbono. O valor energético do biogás, portanto, estará determinado pela concentração de metano, dentre 20 a 25 MJ/m³, comparada com 33 a 38 MJ/m³ do gás natural (Werner et al 1989). Sua densidade é de 1,2 kg/m³, de modo que é menos denso do que o ar, e sua temperatura de inflamação é de 600°C. A composição do biogás afeta às possibilidades de seu aproveitamento, já que a concentração de metano determina seu Pci e uma elevada concentração de alguns de seus componentes pode torna-lo suficientemente corrosivo como para fazer inviável seu aproveitamento energético, principalmente em motores.

7.1. Características dos principais constituintes

Como já foi comentado, o biogás está constituído principalmente por metano e dióxido de carbono. Aquele gerado nos aterros de RU, devido à variabilidade da matéria orgânica destes resíduos, contém também outros gases presentes em mínimas quantidades, dependendo da composição dos resíduos, da idade do aterro, das condições do lugar, da gestão do aterro e da presença de um sistema de coleta do biogás (Carreras et al., 2005).

A composição e produção do biogás depende do substrato digerido e do funcionamento do processo. Considerando a heterogeneidade na composição dos resíduos (e, portanto, seu conteúdo energético), a quantidade de biogás que pode ser produzida a partir de um determinado tipo de substrato dependerá de sua composição química. Como dado orientativo a **Tabela 44** mostra a composição do biogás em função do substrato utilizado.

Tabela 44: Composição do biogás em função do substrato utilizado

Componente	Resíduos Agrícolas	Lodos de Depuradora	Resíduos Industriais	Gás de Aterro
Metano	50-80%	50-80%	50-70%	45-60%
Dióxido de carbono	30-50%	20-50%	30-50%	40-60%
Água	Saturado	Saturado	Saturado	Saturado
Hidrogênio	0-2%	0-5%	0-2%	0-0,2%
Sulfureto de hidrogênio	100-700 ppm	0-1%	0-8%	0-1%
Amoníaco	Vestígios	Vestígios	Vestígios	0,1-1%
Monóxido de carbono	0-1%	0-1%	0-1%	0-0,2%
Nitrogênio	0-1%	0-3%	0-1%	2-5%
Oxigênio	0-1%	0-1%	0-1%	0,1-1%
Compostos orgânicos	Vestígios	Vestígios	Vestígios	0,01-0,6% NMOCs

Fonte: Modificada de Coobs, 1990; Tchobanoglous, Theisen, and Vigil 1993; EPA, 1995 (Gás de aterro).

Geralmente, pode-se considerar que o biogás está constituído principalmente por metano (50-60%) e dióxido de carbono (30-40%) e, em menor proporção, por nitrogênio (0-3%), hidrogênio (0-1%), oxigênio (0-1%), compostos orgânicos voláteis (vestígios) e sulfureto de hidrogênio (vestígios). Sua composição média está na **Figura 36** (% em vol.):

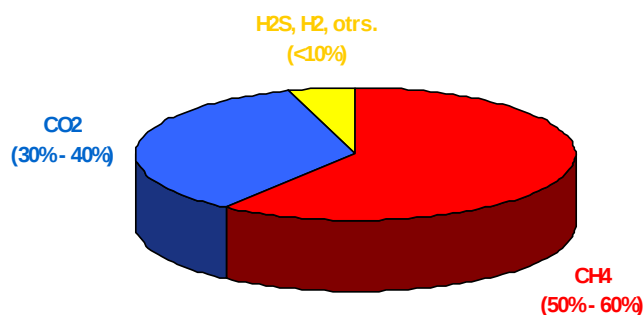


Figura 36: Composição do Biogás

O biogás, devido ao metano, possui um poder calorífico aproximado de 4.500 a 5.600 Kcal/m³. O poder calorífico do biogás está determinado pela concentração de metano (8.500 Kcal/m³), podendo aumentar eliminando parte do CO₂ presente no biogás. A potência calorífica inferior do biogás é de aproximadamente 5.250 Kcal/m³, para uma riqueza em metano de 60%. As características de seus principais constituintes são apresentadas a seguir.

7.1.1. Metano

É um gás incolor, inodoro e insípido. Sua massa específica é inferior a do ar, isso é, de 0,717 diante de 1,29, com um Pci de 35,0 MJ/m³. É altamente explosivo, seus limites, inferior e superior, de explosividade no ar são, respectivamente, 5% e 15%. Sua solubilidade na água é de cerca de 60 mg/l. O metano não é um gás tóxico, mas pode causar o deslocamento do oxigênio na atmosfera do solo e criar um risco de asfixia. É um gás que incide de forma importante no efeito estufa, absorve a radiação infravermelha terrestre (calor) que, de outro modo, escaparia ao espaço, característica dos gases de efeito estufa. É um GEE 21 vezes mais potente do que o CO₂. O metano é mais abundante na atmosfera agora do que em os últimos 400.000 anos, e 150% mais alto do que no ano 1750. A degradação da matéria orgânica mal gerida contribui significativamente (pelo menos em 5%) com as emissões de metano no mundo.

7.1.2. Dióxido de carbono

Do ponto de vista quantitativo, o segundo gás importante na composição do biogás é o dióxido de carbono (CO₂). Este gás é inodoro, incolor e não inflamável. É mais denso do que o ar. Apesar de sua "não toxicidade" natural, o dióxido de carbono é perigoso para a vida devido ao deslocamento do oxigênio no sistema respiratório. É também um gás com uma importante incidência no efeito estufa.

7.1.3. Compostos minoritários

Nitrogênio (N₂) e Oxigênio (O₂): O nitrogênio e o oxigênio, principais constituintes do ar, somente estão presentes no gás de aterro quando o ar atmosférico penetra na plataforma de resíduo.

Hidrogênio (H₂): O Hidrogênio é produzido nas primeiras fases da degradação anaeróbica da matéria orgânica. É um composto "não tóxico", mas pode atuar como um simples asfixiante pelo deslocamento do oxigênio. O hidrogênio é o gás mais leve e tende a subir rapidamente à atmosfera.

Monóxido de Carbono (CO): O monóxido de carbono é um gás muito tóxico. É incolor, inodoro e inflamável. Está presente no gás de aterro em concentrações muito pequenas, próximas ao 0,001% em vol., e quando ocorre a combustão do resíduo na ausência de oxigênio.

Amoníaco (NH₃): O amoníaco pode ser produzido em pequenas quantidades durante as fases iniciais da degradação anaeróbica. Sem embargo, também pode ser encontrados no biogás de aterro concentrações de amoníaco de cerca de 30 mg/m³.

Sulfureto de Hidrogênio (H_2S): O sulfureto de hidrogênio é um composto altamente tóxico e inflamável. Seu cheiro também é desagradável. É emitido geralmente em quantidades pequenas, mas quando o resíduo contém grandes quantidades de compostos de enxofre, a produção de sulfureto de hidrogênio pode ser significativa. É de vital importância saber qual é sua concentração, já que sua presença pode afetar as possibilidades de aproveitamento energético do biogás devido ao seu alto poder corrosivo.

Compostos orgânicos voláteis (COV's): Estes compostos podem representar entre 1 e 2 % do volume do gás de aterro, isso é, cerca de 3 mg/m^3 . É importante conhecer estes compostos do ponto de vista ambiental, já que alguns deles podem ser perigosos para a saúde em concentrações elevadas.

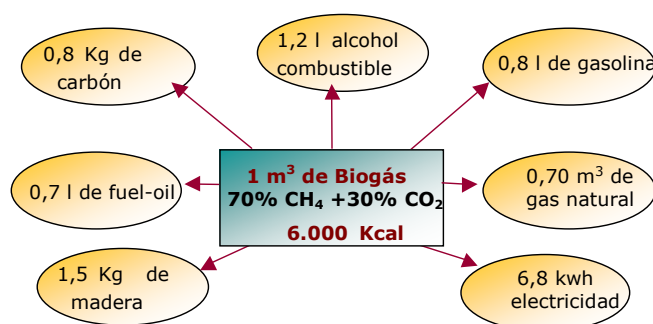
Os compostos orgânicos voláteis estão constituídos por um número importante de hidrocarbonetos, especialmente alcanos e alcenos, e seus produtos de oxidação (aldeídos, cetonas, álcoois e ésteres), bem como de hidrocarbonetos aromáticos, compostos halogenados e compostos organosulfurados.

O crescente interesse na contaminação do ar por produtos gasosos fez com que na bibliografia sejam citadas muitas pesquisas sobre compostos orgânicos voláteis de gás de aterro. Estima-se que podem ser encontrados até 350 compostos diferentes.

Siloxanos: Têm cada vez mais presença no biogás e são motivo de preocupação, não porque sejam prejudiciais para a saúde humana ou o meio ambiente, mas pelos problemas técnicos que provoca na valorização energética feita do biogás, concretamente nos motores.

7.2. Equivalências do Biogás com outros combustíveis

A **Figura 37** mostra as equivalências do biogás com outras fontes de energia



Fonte: Elaborado pelo autor a partir das informações coletadas.

Figura 37: Equivalências do biogás com outros combustíveis

7.3. Utilização do Biogás como fonte de energia

A utilização do biogás como fonte de energia aumenta todo dia, conforme valoriza-se mais as energias renováveis como alternativa às fontes tradicionais de energia de origem não renovável (petróleo, gás, carvão, etc.). O biogás pode ser utilizado em praticamente as mesmas aplicações

energéticas desenvolvidas para o gás natural. Sua utilização evoluiu ao longo dos anos. Suas primeiras aplicações energéticas foram em cozinhas familiares e lâmpadas em países como a China e a Índia.

A **Tabela 45** mostra o consumo e rendimento dos principais aparelhos/equipamentos que utilizam biogás em países em desenvolvimento.

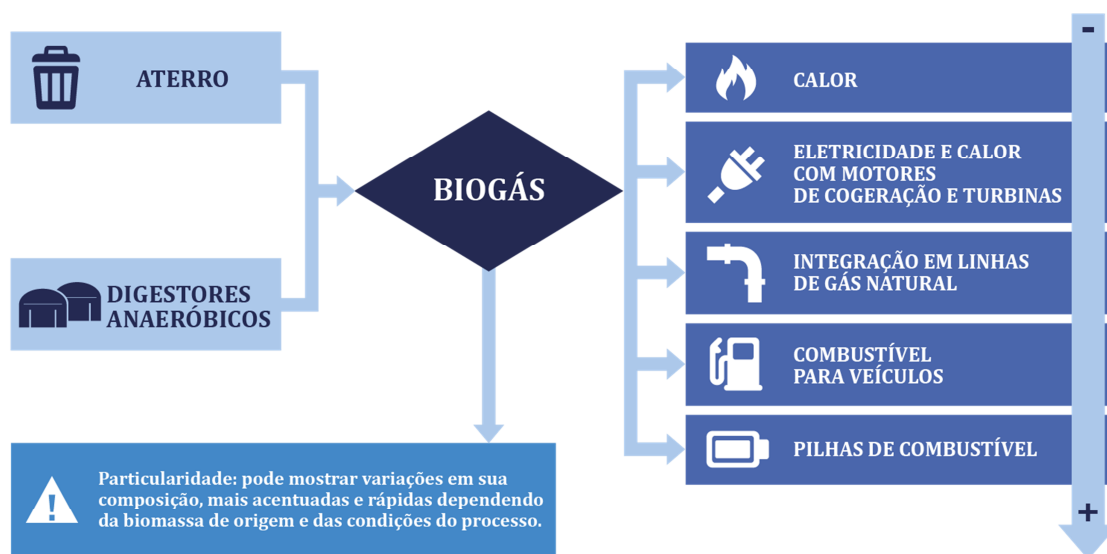
Tabela 45: Consumo de biogás e rendimento de aparelhos utilizados em países em desenvolvimento

Aparelho	Consumo	Rendimento
Queimador de cozinha	300-600 L/h	50-60%
Lâmpada (60 W)	120-170 L/h	30-50%
Geladeira de 100 l	30-75 L/h	20-30%
Motor a gás	0,5 m ³ /kWh	25-30%
Queimador de 10 kW	2 m ³ /h	80-90%
Infravermelho de 200 W	30 L/h	95-99%
Cogrador	1 kWe; 0,5 m ³ /kWh; 2 kW térmicos	Até 90%

Fonte: Hilbert, 2005.

Um metro cúbico de biogás em sua total combustão é suficiente para: Gerar 1.25 kW/h de eletricidade; Gerar 6 horas de luz equivalente a uma lâmpada de 60 watt; Fazer funcionar um refrigerador de 1 m³ de capacidade durante 1 hora; Fazer funcionar uma incubadora de 1 m³ de capacidade durante 30 minutos; ou Fazer funcionar um motor de 1 HP durante 2 horas.

Hoje em dia as aplicações mais interessantes (**Figura 38**) são: Obtenção de calor por combustão direta; Motores para a geração de eletricidade com e sem recuperação de calor (cogeração); Sistemas de cogeração; Integração à rede de gás natural e Combustível para Veículos motorizados. Destas, as mais comuns são a combustão direta para a produção de calor e a geração de energia elétrica com motores de cogeração. Não obstante, existe um interesse crescente por outras alternativas como são sua aplicação como combustível de automação e sua integração na rede de gás natural. A Figura 38 também mostra o grau de limpeza a ser aplicada ao biogás em função de seu uso.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir das informações coletadas.

Figura 38: Aplicações atuais do biogás de maior interesse e grau de refinamento necessário

7.3.1. Obtenção de calor por combustão direta

A aplicação do biogás para a obtenção de calor por combustão direta é a que menos requisitos de qualidade necessita, enquanto sua aplicação em pilhas combustíveis é a que exige um maior nível de pureza.

O biogás pode ser utilizado na geração de calor, através de sua combustão. O biogás misturado com o ar pode ser queimado em um amplo espectro de artefatos, decompondo-se principalmente em CO₂ e H₂O.

A combustão completa, sem excesso de ar e com oxigênio puro, pode ser representada pelas seguintes equações químicas:



O requerimento mínimo de ar seria de 21%, mas esta cifra deve ser aumentada para conseguir uma boa combustão.

Devido ao conteúdo de dióxido de carbono, o biogás tem uma velocidade de propagação da chama lenta de 43 cm/s e, portanto, pode escapar dos queimadores.

Suas aplicações são: aquecimento e água quente, aquecimento dos digestores, incinerar ou esterilizar resíduos provenientes do setor médico, para a secagem de forragem e em aquecedores, cozinhas de gás, lâmpadas ou queimadores-estufas, tanto de uso industrial quanto doméstico.

Como já se referiu, também pode ser aplicado em outros aparelhos como refrigeradores domésticos ou queimadores infravermelhos normalmente utilizados no aquecimento de ambientes na pecuária (

se pode aplicar em outros aparatos, como refrigeradores domésticos ou queimadores infravermelhos, comumente utilizados em a aquecimento de ambientes em pecuária (criação ou parto). Recentemente foram desenvolvidos equipamentos para o resfriamento do leite e/ou outros produtos agrícolas, o que abre um importante campo de aplicação direta e rentável do biogás.

O principal inconveniente apresentado pelo biogás quando utilizado para produzir calor é a necessidade de localizar a região de consumo deste calor que esteja mais próxima possível da região onde é gerado, já que devido ao baixo poder calorífico do biogás, este não pode ser transladado de forma rentável por tubos. Assim, o normal é que o calor gerado pela combustão do biogás seja utilizado nas próprias instalações produtoras.

7.3.2. Geração de eletricidade

Esta aplicação é, sem dúvida, a forma mais interessante de usar o biogás atualmente. O biogás pode ser usado para gerar eletricidade de três formas diferentes: Motores de combustão unidos a geradores de eletricidade; Turbinas ou microturbinas de gás e baterias de combustível estacionárias

Geração de eletricidade mediante motores de combustão

O biogás pode ser usado como combustível para motores de combustão interna, tanto de gasolina (motores de ciclo Otto), quanto de diesel, mas previamente devem ser eliminadas impurezas que podem afetar o rendimento e manutenção dos mesmos. O biogás tem uma octanagem que oscila entre 100 e 1010, o que o torna muito adequado para motores de alta relação volumétrica de compressão, ainda que como contrapartida tenha uma baixa velocidade de arranque.

Geração de eletricidade mediante turbinas de gás

O uso das turbinas de gás aumentou consideravelmente por serem menos contaminantes devido a seu melhor rendimento. Este crescimento foi favorecido pelo aumento da atividade no setor do gás e, também, pelo crescimento sustentável da demanda. Uma das vantagens das turbinas é que demandam menor tempo de instalação do que outros sistemas equivalente, de modo que são adequadas para projetos de desenvolvimento rápido. Possuem maior rendimento quando utilizadas em ciclos combinados.

Apesar de seu bom funcionamento, é preciso considerar a forte dependência que apresentam estes sistemas a determinados parâmetros como a umidade ou a pressão, e que condiciona tanto a potencia que a turbina é capaz de produzir, quanto seu rendimento.

Algumas de suas vantagens são:

- Podem produzir eletricidade e calor simultaneamente (cogeração).
- Praticamente todo o calor de processo pode ser recuperado (alto rendimento).
- Podem operar conectados à rede eléctrica de forma continua.
- Baixo nível de contaminantes e ruídos.
- Podem trabalhar em ciclo combinado (gás e vapor), aumentando seu rendimento.
- Permitem o uso de combustíveis de baixo poder calorífico (biogás).

Hidrogênio e Pilhas combustíveis

A progressiva redução das reservas de combustíveis fósseis e os problemas ambientais associados a sua combustão, obrigam a procura de novas alternativas energéticas. Neste contexto, o hidrogênio surge como um novo “vetor energético”, isso é, um transportador de energia primaria até os lugares de consumo que também oferecem importantes vantagens. O hidrogênio se apresenta, assim, como um dos melhores candidatos a “combustível do futuro”.

Pode ser obtido a partir de fontes de energia renováveis como a eólica, fotovoltaica ou hidráulica, mediante a eletrólises da água, constituindo um processo cíclico totalmente limpo. Também pode ser produzido a partir da biomassa por decomposição térmica ou biológica, bem como dos próprios combustíveis fósseis como o gás, o petróleo ou o carvão.

As tecnologias nos processos de hidrogênio e pilhas de combustível são um novo campo promissor que caminha à nova economia chamada do hidrogênio, que espera-se que seja comerciável nos próximos anos e que requererá um grande número de técnicos muito especializados na matéria.

7.3.3. Sistemas de cogeração

Estes sistemas buscam a maior eficiência no aproveitamento da energia contida no biogás.

Nestes casos, a potencia mecânica provida pelo eixo do motor é aproveitada para gerar eletricidade através de um gerador. Simultaneamente, e por meio de uma série de intercambiadores de calor localizados nos sistemas de refrigeração (água óleo) do motor e na saída dos gases de escape, recupera-se a energia térmica liberada na combustão interna. Esta pode ser utilizada para aquecer a água, para a aquecimento do digestor, ou para qualquer uso industrial ou agroindustrial que requeira energia calorífica. Deste modo, consegue-se um melhor aproveitamento da energia do que se poderia conseguir mediante a geração convencional de eletricidade, na qual o calor gerado no processo se perde.

As principais características que deve ter um motor de biogás que gere energia eléctrica são as seguintes:

- Uma vida útil operando a plena carga.
- Excelente grau mecânico de eficiência.
- Operação e manutenção simples.
- Rápida disponibilidade de peças.
- Baixo nível de ruído e emissões de gases contaminantes.
- Resfriamento por água para que esta seja aproveitada para outros fins.
- Que possa operar com biogás com um conteúdo alto de umidade e vestígios de outros gases, além do metano.
- Que não contenha metais corrosivos.

Instalações de evacuação de energia eléctrica

A energia produzida na unidade de cogeração deve ser transformada e preparada para sua injeção na rede. As plantas que produzem energia eléctrica para ser inserida na rede possuem um Centro de Transformação ou uma Subestação Elevadora, quando a planta tem grandes dimensões e a potencia a evacuar justifica a investimento.

7.3.4. Integração na rede de gás natural

O biogás deve ser submetido a um processo de purificação e enriquecimento para igualar-se com as características do gás natural. A tecnologia para tanto existe e demonstrou sua viabilidade em outros países, como a Suécia. O biogás produzido neste tipo de plantas (biometano) possui uma composição semelhante ao que circula pela rede de distribuição geral. Com esta possibilidade surgiram novas perspectivas de aproveitamento. O biogás, previamente depurado para que alcance os requerimentos de qualidade do gás natural, pode ser introduzido em sua rede de distribuição, já que, como o gás natural, está constituído principalmente por metano, assim, pode ser usado em grandes centrais eléctricas ou no setor de transportes.

Dentre as vantagens deste uso destacam-se:

- Reduz a dependência energética.
- Reduz os custos de transporte.
- A rede conecta a região de produção com as áreas de maior densidade de população, o que permite que o gás chegue a novos consumidores.
- É possível aumentar a produção em um lugar distante e ainda utilizar 100 % do gás.
- Permite melhorar a segurança de fornecimento local, fator muito importante porque a maior parte dos países consomem mais gás natural do que produzem.

7.3.5. Combustível para veículos

Com a geração de eletricidade, esta é a aplicação com mais futuro para o biogás. O uso do biogás como combustível no transporte é semelhante, tecnologicamente falando, ao do gás natural.

O biogás pode substituir o gás natural nos veículos propulsados por este combustível após prévio refinamento do biogás para eliminar impurezas (CO₂, H₂S, NH₃, água e partículas sólidas) e, desta forma, elevar os níveis de metano até quase 95% (IEA-Bioenergy, 2001). Neste sentido, foram

desenvolvidos dois tipos de tecnologia para o refinamento e limpeza do biogás para seu uso como combustível para automação:

- A absorção na água (absorção física).
- A absorção em alcanolamina (absorção química).

A escolha de uma ou outra tecnologia depende da composição do biogás, da capacidade do tratamento e da aplicação posterior do biogás.

Uma vez transformado, as possibilidades de uso são iguais:

- Comprimido.
- Liquefeito.

Atualmente está sendo realizado na Espanha o projeto Agrobiomet, a demonstração de um sistema sustentável de produção e utilização de biometano em veículos a partir de resíduos animais e alternativas de biomassa (Rodríguez et al., 2013).

7.4. Produção de energia a partir do Biogás nos SIDS

Em regiões rurais de países em desenvolvimento as aplicações energéticas são geralmente familiares, utilizando-se principalmente para cozinhar e iluminar.

Com produções maiores, as aplicações mais evidentes são as duas mais utilizadas a nível geral:

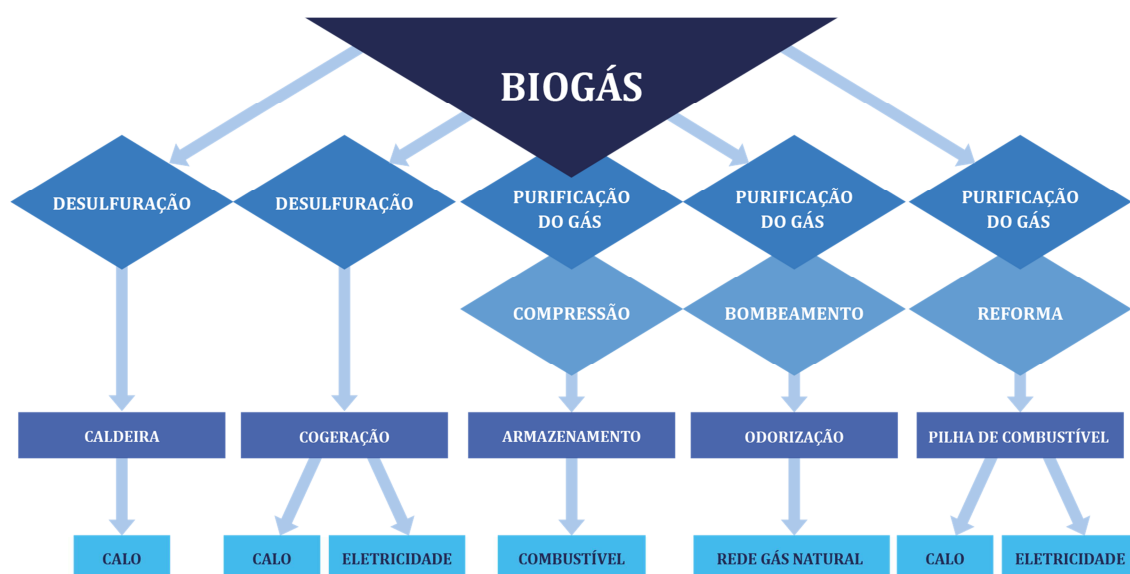
A) Unidades de motor de gás ou gerador: constituem o meio mais comum para produzir eletricidade a partir de biogás. Para plantas pequenas e médias, costumam ser utilizados grupos motor-geradores que podem ter potenciais de 1MW. Em alguns casos, o calor recuperado a partir do resfriamento do motor e dos gases de escape é utilizado para aquecimento. Os sistemas de produção combinada de calor e eletricidade (CHP) permitem um aproveitamento muito mais eficiente da energia quando se usa adequadamente o calor excedente recuperado. Em algumas plantas maiores de biogás, utilizam-se turbinas de gás ou de vapor.

B) A produção de calor em um sistema de caldeiras é outro uso frequente dado ao biogás, o qual pode ser queimado em um forno ou sala de caldeiras para produzir água quente, vapor ou ar quente para aquecimento ou secagem; A tecnologia para produzir energia a partir de unidades de motor de gás ou gerador e salas de caldeiras é muito conhecida, e existem na região suficientes conhecimentos e experiência na matéria, bem como peças de troca.

7.5. Tratamento do biogás em função do uso

O biogás deve ser refinado previamente em qualquer aplicação energética. Neste sentido, as operações de depuração variam em função do uso do biogás. A **Figura 39** apresenta o tratamento necessário em função da utilização do biogás.

Os requerimentos de qualidade são maiores quando utilizado como combustível de automação, é injetado nas linhas de distribuição do gás natural ou utilizado em pilhas de combustível. A purificação do biogás inclui a eliminação de CO₂, SH₂, NH₃, água e siloxanos.



Fonte: Elaborado pelo autor a partir das informações coletadas

Figura 39: Tratamento necessário ao biogás em função de sua utilização

ACONDICIONAMENTO DO BIOGÁS

Devido ao seu alto conteúdo de umidade e outros gases, o biogás deve ser tratado e acondicionado antes de seu aproveitamento nas unidades de cogeração. A seguir se indicam as características do gás que deve ser acondicionado:

- Redução e/ou eliminação do H_2S e vestígios de outros gases, purificação.
- Redução de umidade.
- Redução de CO_2 .
- Correção, calibração e controle de pressão.

7.5.1. Redução da umidade

Quando o biogás sai dos biodigestores está 100% saturado com umidade. Este problema aumenta durante o verão devido às altas temperaturas. Dentre os fatores que influenciam o conteúdo de umidade encontram-se: o tipo de biomassa e porcentagem de dissolução. Junto ao vapor de água na corrente de biogás viajam partículas sólidas que não reagem ou que se mantêm inertes durante o processo de biogasificação, ambos elementos são prejudiciais para o aproveitamento do biogás, de modo que é necessária uma redução destes até valores adequados para o uso do biogás como material energético.

Os tubos de captação são instalados de modo que os condensados fluam ao voltar ao digestor ou aos pontos de descarga de condensados. A inclinação mínima de instalação será de 5%. Será instalada uma unidade de condensação antes do aproveitamento do biogás na unidade de cogeração. Quando se resfria o biogás a temperaturas dentre 0 e 5°C, condensa-se a maior parte da umidade. Este tipo de soluções combinadas com outras técnicas para a redução de H_2S dão excelentes resultados e se obtém um biogás de excelente qualidade.

Os motores a biogás para a geração elétrica tem estabelecido como limite máximo de conteúdo de umidade uma gama compreendida entre 70 e 80% HR, dependendo do fabricante do motor e do conteúdo de partículas estranhas.

7.5.2. Redução de H_2S

O biogás está composto principalmente por gás metano (CH_4) e CO_2 em proporções de 55-65% a 40-45%, aproximadamente, e vestígios de outros gases como o Sulfureto de Hidrogênio (H_2S). O conteúdo de H_2S é dentre 0,1 e 1%. Apesar de ser uma porcentagem baixa, é necessário reduzi-la devido a as seguintes razões:

- Toxicidade do H_2S .
- Corrosão de metais por presença de H_2S e CO_2 .
- Na combustão pode-se formar SO_2 , que é altamente corrosivo.
- Redução do poder calorífico do gás.
- Favorece a formação de hidratos.

O método mais comum e simples para a dessulfurização do biogás é a injeção de pequenos volumes de oxigênio no interior do digestor. É um processo desenvolvido de maneira efetiva nos últimos 10 anos e aplicado com notável sucesso na purificação de biogás em biodigestores em toda Europa, mas sobretudo na Alemanha. As sulfobactérias, bactérias oxidantes, transformam o H_2S em enxofre elementar e ácido sulfídrico e água através do fornecimento de oxigênios. Durante este tratamento obtém-se um pó amarelo de enxofre depositado sobre a superfície da biomassa, nas paredes interiores do digestor, etc. Este pó amarelo de enxofre pode ser utilizado como fertilizante. O fornecimento de oxigênio é realizado mediante compressores. Quando a dosificação do oxigênio é adequada, pode-se obter uma redução de H_2S de até 95%. A quantidade de oxigênio fornecida ao digestor é tão baixa que não surgem problemas no interior do mesmo.

7.5.3. Redução de CO_2

Quando se demanda um biogás com maior qualidade e poder calorífico (para sua injeção na rede de distribuição geral é possível reduzir o conteúdo de CO_2 . Este tratamento está especialmente indicado para as grandes plantas de biogás, nas quais o gasto no sistema de purificação está justificado.

O método mais simples e eficiente para a eliminação do dióxido de carbono é sua absorção na água de cal. Este método requer uma constante vigilância devido a que a água de cal se esgota e é necessário reabastecê-la frequentemente. Podem ser utilizadas outras soluções químicas, ainda que a mais econômica seja a água de cal.

Outro método é utilizar outro elemento fortemente alcalino como meio de absorção destes gases, como, por exemplo, os efluentes de cultivos de micro algas. Se injeta o biogás contra a corrente nestas águas, de maneira que a água resultante desta reação contém carbonato de hidrogênio.

7.5.4. Tratamento mediante filtros

O tratamento biológico de gases contaminados estabeleceu-se como alternativa aos sistemas convencionais de tratamento de gases, especialmente quando os compostos contaminantes estão em uma concentração baixa e o fluxo a tratar é elevado. O principal componente de um biofiltro é o meio

filtrante, no qual os compostos não desejados do biogás são absorvidos para poder ser degradados posteriormente por microrganismos formados no meio.

O biogás é introduzido ao leito filtrante por meio de um soprador. O filtro consiste em um tanque atorro de um meio filtrante (terras, lascas de madeira, musgo de turfa, pedra vulcânica, uma mescla de vários, etc.) acondicionado com um material volumoso (partículas de poliestireno, pedras, etc.) cuja função é dar suporte e, em alguns casos, como fonte de nutrientes aos microrganismos.

Resumo do Capítulo 7

O biogás procede de um processo degradativo da matéria orgânica em condições anaeróbicas. Está constituído, principalmente, por metano (CH_4) entre 50 e 70%, e dióxido de carbono (CO_2), entre 30 e 50%, mais outra série de compostos presentes em pequenas proporções como hidrogênio (H_2), oxigênio (O_2), nitrogênio (N_2), Sulfureto de hidrogênio (H_2S), Compostos orgânicos voláteis (COV's) e siloxanos, principalmente.

Tem muitas aplicações energéticas. Em regiões rurais de países em desenvolvimento é utilizado a nível familiar em cozinhas e lâmpadas, principalmente. Geralmente suas principais aplicações são combustão direta para a produção de calor e em motores de cogeração produzindo eletricidade e calor. Outros usos que estão adquirindo cada vez maior importância são sua utilização como combustível em veículos a motor e sua injeção na rede de gás natural.

Cada aplicação exige requerimentos de pureza, sendo o menos restritivo o uso para combustão direta. Em motores de cogeração deve-se controlar principalmente os níveis de ácido sulfídrico e siloxanos, por problemas de corrosão e abrasão, respectivamente. Para seu uso em veículos a motor e para injetá-lo na rede é necessário limpá-lo para conseguir as características do gás natural. Ainda que existam diferenças importantes no custo, existem no mercado tecnologias para aplicar qualquer um dos usos mencionados.

Glossário

Acetogênese: Etapa microbiológica na qual os Ácidos Graxos Voláteis (AGV's) e os álcoois formados na Acidogênese, são degradados a acetato, gás carbônico e hidrogênio, principalmente, por meio de bactérias fermentativas.

Ácido sulfídrico: Ácido inorgânico formado pela dissolução e dissociação na água do sulfureto de hidrogênio (H_2S). Em estado gasoso é conhecido com o nome de sulfureto de hidrogênio.

Acidogênese: Etapa microbiológica na qual os aminoácidos, ácidos orgânicos e açúcares produzidos na Hidrólise, são transformados em álcoois, dióxido de carbono, hidrogênio e ácidos graxos voláteis (AGV's), mediante microrganismos fermentativos ou por oxidantes anaeróbicos.

Ácidos voláteis: Ácidos graxos que são produzidos pelas bactérias formadoras de ácido.

Adubo: Refere-se a material orgânico estabilizado e filtrado, pronto para usos hortícolas ou agrícolas. Se o material digerido anaerobicamente é utilizado como adubo, deve ser estabilizados biologicamente, normalmente através de arejamento e maturação.

Aeróbico: Na presença de oxigênio.

Afluente: Matéria que entra em um digestor.

Alcalino: Condição na que está presente uma quantidade suficiente de substâncias alcalinas para ensejar um pH acima de 7,0.

Anaeróbico: Sem presença de oxigênio

Aterro a céu aberto: Lugar onde se depositam os resíduos a céu aberto de forma não controlada, sem receber nenhum tipo de tratamento sanitário. Sinônimo de lixão, despejo, etc.

Aterro controlado: Lugar para a disposição final dos resíduos sólidos, que não possui a infraestrutura própria de um aterro sanitário, mas com algumas medidas de controle.

Aterro sanitário: Técnica de engenharia para o confinamento dos resíduos sólidos municipais. Compreende o espalhamento, acomodamento e compactação dos resíduos sobre um leito impermeável, sua cobertura com terra ou outro material inerte pelo menos diariamente, para o controle de proliferação de vetores e ou manejo adequado de gases e lixiviados, com o fim de evitar a contaminação do ambiente e proteger a saúde da população. O aterro sanitário possui um projeto de engenharia, controle de entrada na porta, paisagem e não existem segregadores no local.

Bactérias aeróbicas: Bactérias que vivem e se reproduzem apenas em um ambiente que contém oxigênio disponível para sua respiração, como o oxigênio atmosférico ou oxigênio dissolvido na água

Bactérias anaeróbicas: Bactérias que vivem e se reproduzem apenas em um ambiente que não contém oxigênio.

Bactérias formadoras de ácido: Grupo de bactérias em um digestor que produzem ácidos voláteis como um dos subprodutos de seu metabolismo.

Bactérias formadoras de metano: Grupo de bactérias em um digestor que utilizam acetato e H_2 como fonte de energia e produzem metano.

Benefícios: Os benefícios tangíveis de um sistema de biogás são os que são facilmente quantificáveis e tem um valor monetário. Estes benefícios incluem o valor do gás e do digerido produzido. Benefícios intangíveis são aqueles que não estão quantificados ou relacionados com um valor monetário facilmente. Exemplos incluem o valor de uma melhora no saneamento ambiental e a prevenção de odores.

Biodigestão anaeróbica: Processo bioquímico de fermentação microbiana de substâncias orgânicas na ausência de oxigênio.

Biodigestor: Elemento que permite a decomposição anaeróbica da matéria orgânica e a formação de biogás.

Biogás: Gás produto da decomposição da matéria orgânica na ausência de oxigênio pela ação direta de bactérias metanogênicas. Está composto, basicamente, de gás metano, dióxido de carbono, ácido sulfídrico, nitrogênio e hidrogênio, entre outros.

Biol: Digestores ou Digerido. Subproduto semilíquido resultante da digestão anaeróbica. Possui um uso potencial como fertilizante orgânico. Pode ser aplicado de forma direta, ou sob prévia separação em duas frações, sólida e líquida

Cabutz: A fração sólida que resta depois da separação da suspensão digerida da digestão anaeróbica termófila de esterco de vaca.

Capacidade tampão: Medida da resistência às mudanças de pH causadas pelos compostos nos lodos.

Carga do biodigestor: Processo de alimentação de excrementos o esterco

Casa de segurança do motogerador: Construção que protege a instalação elétrica e equipamentos de aproveitamento energético do biogás

Cobertura diária alternativa: Material que, não sendo terra, é usado para cobrir a superfície dos aterros sanitários ativos ao fim de cada dia, para controlar doenças, incêndios, odores, etc.

Compostagem: decomposição controlada da matéria orgânica em condições aeróbicas pela qual o material se transforma em material húmico. O processo é exotérmico, dando como resultado um aumento da temperatura. O processo é utilizado para melhorar a qualidade do esterco como fertilizante

Coroa: Parte superior e plana do biodigestor.

Declive: A inclinação das paredes da escavação do biodigestor, com respeito ao solo.

Degradação: Decomposição da matéria orgânica por substâncias químicas, físicas e / ou ação biológica.

Desidratação: Processo de eliminação de água do efluente de um digestor.

Desnitrificação: Redução anaeróbica dos compostos de nitrogênio, tais como nitratos, a nitrogênio elementar.

Digerido (Digestores): Subproduto semilíquido resultante da digestão anaeróbica. Possui um uso potencial como fertilizante orgânico. Pode aplicar-se de forma direta, o sob prévia separação em duas frações, sólida e líquida

Digestão Anaeróbica: O processo de degradação e estabilização de materiais orgânicos pela ação de bactérias anaeróbicas com a produção de biogás (biometanização). O processo é levemente exotérmico.

Digestão: Decomposição controlada de substâncias orgânicas, normalmente sob condições anaeróbicas

Digestor Anaeróbico de contato: Digestor anaeróbico no qual os microrganismos são separados da suspensão efluente por sedimentação ou outros meios e devolvidos ao digestor para aumentar a taxa de estabilização.

Digestor Anaeróbico: Elemento construído para degradar a matéria orgânica por bactérias anaeróbicas.

Digestor contínuo ou de alimentação contínua: Digestor que carregado continuamente ou regularmente com pequenas quantidades de resíduo fresco a intervalos curtos. O resíduo recém carregado automaticamente desloca um volume igual de efluente e o processo continua sem interrupção

Digestor de mescla completa (CSTR em inglês): Digestor em que todo o conteúdo é misturado para criar uma suspensão homogênea.

Digestor descontinuo: Digestor em que todo o material de alimentação é adicionado em uma só carga. A descarga ocorre quando se chega ao final do tempo de retenção.

Digestor fluxo pistão: Digestor no qual os materiais residuais entram por um extremo e empurram os resíduos mais antigos ao extremo oposto. Os digestores de fluxo pistão não costumam ter mescladores internos e a decomposição de matéria orgânica segrega a si mesma de forma natural ao longo do comprimento do digestor

Digestor: Elemento que permite a decomposição anaeróbica da matéria orgânica e a formação de biogás.

Digestores (Biol): Subproduto semilíquido resultante da digestão anaeróbica. Possui um uso potencial como fertilizante orgânico. Pode aplicar-se de forma direta, ou sob prévia separação em duas frações, sólida e líquida

Dióxido de carbono (CO₂): Gás resultante da queima ou completa oxidação de qualquer fonte de carbono.

Disposição final: Ação de depositar ou confinar permanentemente resíduos em diversos tipos de lugares e instalações

Efluente: Lodo ou suspensão que sai do digestor

Enzima: Uma substâncias orgânica complexa (quase sempre uma proteína) produzida pelas células vivas e que possui a propriedade de acelerar transformações tais como os processos de digestão.

Especificações Técnicas.- Conjunto de elementos técnicos que regulam o desenho, construção e operação de Sistemas de Biodigestão. Especificações Técnicas Sistemas de Biodigestão. Página 9

Esterco: Dejeções animais, normalmente a matéria fecal do gado.

Facultativo: Capacidade dos microrganismos para viver tanto em condições aeróbicas, quanto anaeróbicas

Filtro de retenção de ácido sulfídrico: Sistema de depuração do biogás dos vestígios de ácido sulfídrico que o contaminam

Flutuante: Líquido retirado do lodo sedimentado. Flutuante se refere normalmente ao líquido entre o lodo da parte inferior e a espuma da superfície de um digestor anaeróbico ou ao material líquido que resta depois da separação da suspensão.

Fluxo pistão: Movimento sem mesclar na direção axial (longitudinal) em um digestor

Fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos: Fração biogênica dos RSU. A FORSU pode ser separada da corrente de resíduos na origem (separação na origem), ou logo, por separação mecânica, coletando linhas de uma combinação de ambos. A fração de madeira e papel é mais recalcitrante à degradação biológica e, portanto, não é desejada para a conversão de matérias primas bioquímicas

Gasômetro flutuante: Recipiente de biogás que consiste em um tanque com a parte superior aberta e invertido, que flutua sobre um líquido como o lodo (efluente) líquido do digestor ou água; eleva-se quando está cheio de biogás e afunda quando o gás é consumido. O peso da cobertura flutuante controla a pressão do gás que sai do gasômetro

Gasômetro: Sistema independente que recebe e armazena o gás produzido em um digestor

Geomembrana: Material sintético utilizado como isolante.

Geração de energia elétrica: Processo de geração de energia elétrica mediante motogeradores que utilizam como combustível a mescla de gases produzidos pelo biodigestor.

Hidrólise: Redução de biopolímeros de grande conteúdo molecular como polissacarídeos, lipídeos e proteínas a moléculas mais simples como açúcares simples, ácidos orgânicos e aminoácidos, por ação de enzimas produzidas por microrganismos aeróbicos facultativos, na presença de água.

Infiltração: Penetração de um líquido através de poros ou interstícios de um solo, subsolo ou qualquer material natural o sintético.

Inoculo: Qualquer material, como material de alimentação digerido, que se adiciona a um digestor de recente criação para iniciar a degradação da matéria orgânica e a produção de metano

Instalação Elétrica: Conjunto de elementos que conduzem, distribuem e utilizam a energia elétrica.

Lagoa secundaria: Elemento para recepção e armazenamento transitório dos efluentes do biodigestor.

Lodos do digestor: Mistura de matéria orgânica fermentada e água

Lodos: Mescla de matéria orgânica fermentada e água.

Manual de Operação: Documento que descreve as diferentes atividades envolvidas na operação do sistema de biodigestão anaeróbica.

Matéria inorgânica: Material em solução ou suspensão, tal como areia, sal, ferro, cálcio e outros minerais, que não são degradados por microrganismos

Matéria orgânica: Materiais que provém de fontes animais ou vegetais. A matéria orgânica em geral pode ser degradada por microrganismos

Material de cobertura: Solo utilizado para cobrir os resíduos sólidos compactados em um aterro sanitário

Material reciclável: São materiais que depois de servir a seu propósito original, possuem propriedades físicas pelas quais podem ser reutilizados ou transformados em novos produtos

Medidor de fluxo de biogás: O instrumento utilizado para quantificar o volume de biogás que flui do biodigestor ao queimador ou ao motogerador.

Mesofílico: Dentro de uma gama de temperaturas moderadas, normalmente 30 a 40 °C.

Metabolismo: Mudanças bioquímicos nas células vivas mediante as quais se fornece energia aos processos e atividades vitais, e novamente se sintetiza o material (catabolismo+anabolismo)

Metano (CH₄): Gás inodoro e incolor, inflamável e o componente principal do gás natural, gás de carvão e biogás

Metanogênese: Etapa final do processo de biodigestão anaeróbica que implica a conversão de compostos simples de carbono em metano pela ação de bactérias metanogênicas.

Monitorização Ambiental: Conjunto de ações para a verificação periódica do grau de cumprimento dos requerimentos estabelecidos para evitar a contaminação ambiental.

Monóxido de carbono (CO): Gás resultante da combustão incompleta ou incompleta oxidação de qualquer fonte de carbono.

Motogerador: Dispositivo eletromecânico gerador de energia elétrica utilizando o biogás como combustível.

Planta de Biogás: Planta utilizada para processar a matéria orgânica a fim de produzir biogás e lodos

População economicamente ativa: as pessoas que têm uma ocupação ou que sem ela estão procurando ativamente ativamente. É composto da população empregada mais a população desempregada.

Poder calorífico: A quantidade de calor que se pode obter a partir de um combustível, geralmente se expressa em termos de calorias por unidade de peso (ou volume) do combustível.

Processo anaeróbico de contato: Processo de digestão anaeróbica em que os microrganismos se separam da suspensão efluente por sedimentação ou outros meios e são devolvidos ao digestor para aumentar a taxa de estabilização.

Purinas: Mescla de esterco e água procedente de currais para o gado

Queimador: Sistema para realizar a combustão completa do metano, que é gerado no Biodigestor.

Reação endotérmica: Reação química que necessita energia para que seja realizada

Reação exotérmica: Reação química em que se libera energia quando realizada

Reciclagem: Atividade mediante a qual determinados resíduos sólidos provenientes dos banheiros urbanos são separados, coletados, classificados e processados para ser reincorporados a um ciclo doméstico, comercial ou industrial.

Rejeição: Material restante depois da separação da matéria orgânica e dos materiais recicláveis do fluxo de resíduos mesclados. Constituído principalmente por material inorgânico, a rejeição de modo geral contém também uma quantidade significativa de material orgânico. Dependendo de sua composição, a rejeição pode ser tratada biologicamente ou queimada antes de sua disposição final.

Relação carbono/nitrogênio (relação C/N): proporção de carbono orgânico frente a de nitrogênio total.

Remoção de lodos: Procedimento utilizado para descarregar o biodigestor dos sólidos estabelecidos no processo.

Resíduos sólidos domiciliares: Resíduos sólidos ou semisólidos de origem exclusivamente residencial, gerados pela atividade humana dentro da moradia.

Resíduos sólidos urbanos ou municipais: Resíduos sólidos ou semisólidos provenientes das atividades próprias dos núcleos populacionais em geral, que incluem os resíduos de origem domiciliar, comercial, de serviços, institucional, de mercados, hospitalares comuns ou não perigosos, os gerados nas oficinas das indústrias, na varredura e limpeza de ruas e áreas públicas, em podas de plantas de ruas, praças e jardins públicos.

Revestimento: Barreira impermeável de plástico e/ou argila densa desenhada para manter os lixiviados dentro de um aterro.

Segurança: Protocolo de procedimentos a seguir e equipamentos a instalar, para evitar acidentes durante a operação do sistema de biodigestão anaeróbica.

Sistema de agitação: Sistema que provoca turbulência no biodigestor.

Sistema de aquecimento do biodigestor: Intercambiador de calor que permite injetar calor ao sistema, para manter uma temperatura apta para a produção de biogás.

Sistema de coleta de biogás: Sistema que coleta o biogás dentro do biodigestor e o conduz ao sistema de manejo de gases.

Sistema de coleta de resíduos: Sistema de tubos instalado para conduzir os resíduos ao biodigestor

Sistema de condensação de umidade: Sistema que retira a umidade contida no biogás.

Sistema de manejo de gases: Equipamento que seca, pressuriza e quantifica volumetricamente o fluxo do biogás que sai do biodigestor e vai para o queimador e/ou motogerador de energia elétrica.

Sistema de medição de gases: Instrumento utilizado para quantificar o volume de biogás que flui do biodigestor ao queimador ou ao motogerador.

Sólidos Suspensos: Sólidos que estão em suspensão na água ou outros líquidos.

Sólidos totais:- Soma dos componentes dissolvidos e em suspensão em uma amostra, isso é, quantidade de material sólido (ou matéria seca) que resta depois de eliminar a umidade de uma amostra. Geralmente se expressa em miligramas por litro ou como porcentagem. O conteúdo de umidade, mais os ST (ambos expressados como porcentagem de peso úmido) é igual a 100%.

Sólidos voláteis: Quantidade de material combustível em uma amostra (o resto é cinza). O valor é expressado como porcentagem dos ST, mas em ocasiões pode ocorrer como fração do peso úmido. SV é utilizado como indicador da biodegradabilidade de um material, ainda que a biomassa recalcitrante (isso é, lignina) que faz parte dos SV seja menos digerível. Devido à simplicidade do procedimento de medida, normalmente é divulgado na literatura de DA.

Taxa de preenchimento: taxa de resíduos aceitos no lugar, expressada sobre a base de operação diária ou anual (geralmente em toneladas)

Tempo de retenção hidráulico: O tempo médio que um líquido permanece em um digestor antes de sua descarga. É igual ao volume no ativo do reator dividido pela velocidade de fluxo do líquido entrante. De modo geral, expressa-se em dias, mas pode ser tão curto quanto horas.

Tempo de retenção sólidos - O tempo médio que a biomassa (microrganismos) permanece em um digestor. TRS e TRH são iguais para os digestores de mescla completa e fluxo pistão. Outros conceitos de reatores como, por exemplo, os digestores UASB, permitem que os sólidos tenham um maior tempo de contato com os microrganismos, mantendo um digestor de volume menor e maior rendimento.

Tempo de Retenção: Período teórico de residência em um volume ou uma unidade determinada. Calcula-se normalmente dividindo o volume ativo da unidade pela taxa de fluxo do líquido que entra nele.

Termofílica: Digestão a uma temperatura relativamente alta, normalmente no intervalo de 50-70 °C

Termofusão: Fenômeno de soldagem térmica da geomembrana do aterro sanitário.

Toxicidade. - Condição que inibe ou destrói o crescimento ou a função de um organismo vivo.

Vida útil: Período de tempo em o que um sistema, processo ou material é capaz de prestar o serviço para o qual foi desenhado, construído ou fabricado.

Volume Ativo: O volume real disponível em um digestor para a ação bacteriana.

Volume de gás específico: Volume diário de biogás produzido por unidade de volume do digestor.

Bibliografia

- Abbasi, T. and Abbasi, S.A.. (2010). *Renewable Energy Sources and Their Environmental Impact*. PHI Learning Private Limited. New Delhi. ISBN-97881-203-3994-1.
- Abbasi, T., Tauseef, S.M. and Abbasi, S.A. (2012). *Biogas Energy*. XIII, 169 p. ISBN: 978-1-4614-1039-3.
- Abraham, E.R., Ramachandran, S. and Ramalingam, V. (2007). *Biogas: Can it be an important source of energy?* Environmental Science and Pollution Research 14 (1), 67-71.
- Acharya C.N. (1958). *Preparation of fuel gas and manure by anaerobic fermentation of organic materials*. En: Indian Council of Agricultural research Bulletin no. 115.
- ADB (2014). Solid Waste Management in the Pacific. Appropriate Technologies. Asian Development Bank.
- ADB (2011). Technical Assistance Report: Solid Waste Management in the Pacific. Asian Development Bank.
- Advanced Holdings Ltd. (2008). Advanced to invest S\$1.8 million to Build and Operate Singapore 1st Biogas Plant. Advanced Holdings Limited.
- AEA – Bioenergy (2001). *“Biogas upgrading and utilization”*. Report of Task 24: Energy from biological conversion of organic waste. International Energy Agency Technology Environment, Culham, Oxfordshire (UK). 20 p. Available at: http://www.recyclenow.org/Report_IEA_Bioenergy_1MB.pdf
- AEBIG (2010). El Futuro del Biogás en España. Available at: www.aebig.es
- AEMA (2007). Inventario anual de gases de efecto invernadero de la Comunidad Europea 1990-2005 e informe del inventario 2007. *EEA Technical Report*, nº 7, 176 p. Available at: http://reports.eea.europa.eu/technical_report_2007_7/en/Full%20report%20Annual%20European%20Community%20greenhouse%20gas%20inventory%201990-2005%20and%20inventory%20report%202007.pdf.
- Ahring, B.K., Sandberg, M. and Angelidaki, I. (1995). *Volatile fatty acids as indicators of process imbalance in anaerobic digesters*. Applied microbiological Biotechnology. Vol. 43 (3).
- Ahring, B.K., Angelidaki, I. and Johansen, K. (1992). *Anaerobic treatment of manure together with industrial waste*. Water Science Technology. Vol 25 (7), page. 311-318.
- Ainia (2010). Available at: <http://www.slideshare.net/ainiappt/la-produccion-de-biogas-a-partir-de-residuos-ganaderos>
- Ainia (2007). *Gestión y mantenimiento de depuradoras en industrias agroalimentarias*. Disponible en: http://www.ainia.es/html/sites/09/portalsociado/cursos_depuradoras.pdf

- Al-Ansari, M.S., 2012. Municipal solid waste management systems in the Kingdom of Bahrain. *Int. J. Water Resour. Environ. Eng.* 4, 150–161.
- Álvarez Doménech, G., Gordillo Bolasell, M.A. y Sánchez Ferrer, A. (2001). *Estudio de los parámetros que afectan la producción de biogás en un vertedero controlado*. *Residuos*, 61: 28-33.
- American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation (1999). *Standard Methods for the Examination of Waste and Wastewater*. 20th edition. ISBN 0-87553-235-7.
- American Public Health Association, American water Works Association y Water Pollution Control Federation (1992). *Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales*. Díaz de Santos, 1ª Edición. Madrid España. ISBN: 9788479780319.
- Angelidaki, I. and Ahring, B.K. (1997). *Anaerobic digestion in Denmark. Past, present and future*. III curso de Ingeniería Ambiental, pp. 336-342. Lleida, octubre de 1997. España.
- Angelidaki, I. and Ellegaard, L. (2003). *Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 109: 95-105.
- Angelidaki, I. and Ahring, B.K. (1993). *Thermophilic digestion of livestock waste: the effect of ammonia*. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 38, 560–564
- Archer, D.B. and Kirsop, B.H. (1990). *The microbiology and control of anaerobic digestion*. In: Andrew, W. (Ed.), *Anaerobic Digestion: A Waste Treatment Technology*. Critical Reports on Applied Chemistry, vol. 31, pp. 43–91.
- Arvizu, J.L. y Huacuz J.M. (2003). *Biogás de rellenos sanitarios para producción de electricidad*. Boletín IIE. pp. 118-123. Available at: <http://www.iie.org.mx/boletin042003/apli.pdf>
- ASAE (2005). *Manure Production and Characteristics*. American Society of Agricultural Engineers. D384.2. Available at : http://evo31.ae.iastate.edu/ifafs/doc/pdf/ASAE_D384.2.pdf
- ASAE (2003) *Manure Production and Characteristics*. American Society of Agricultural Engineers. Standard D384.2. Disponible en : <http://large.stanford.edu/publications/coal/references/docs/ASAESTandard.pdf>
- ATEGRUS. (2010). *Observatorio sobre Vertederos Controlados de Residuos No Peligrosos, Peligrosos e Inertes en España*. Available at: http://www.bipro.de/waste-events/doc/events08/es_pres_10.pdf
- Balasubramaniam, U., Zisengwe, L.S., Meriggi, N. and Buysman, E. (2008). *Biogas production in climates with long cold winters*. Available at: http://www.susana.org/docs_ccbk/susana_download/2-1502-biogascoldclimatesweb-wecf0608.pdf
- Barker H.A. (1956). *Biological Formation of Methane*. En: *Bacterial Fermentations*: Chap. I De: John Wiley and Sons (Ed.). New York.pp:1.

- Barlaz M.A., Ham R.K. and Schaefer D.M. (1989). *Mass balance analysis of decomposed refuse in lab scale landfill*. Journal Environmental Engineering, 115:1088-1102.
- Bazara, X., Galimany, F. y Torres, R. (2003). *Digestión anaerobia en el tratamiento de efluentes y lodos residuales*. Tecnología del Agua., nº 233, pp.34-46, 2003
- Beerachee, B., 2012. Overview of wastes management in Mauritius. Solid Waste Management Division, Ministry of Local Government and Outer Islands.
- Bernal, P., Albuquerque, J.A., Bustamante, M.A. y Clemente, R. (2011). *Guía de utilización agrícola de los materiales digeridos por biometanización*. Ministerio de Ciencia e Innovación. Available at : www.probiogas.es
- Beyebach, A. (2005). *El biogás de vertederos*. Ambienta, 47: 66-69.
- BID (2011). *Análisis de la experiencia de América Latina y el Caribe con proyectos del Mecanismo para un Desarrollo Limpio*. Available at: http://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=proyectos+MDL+en+ALC&source=web&cd=1&ved=0CCwQFjAA&url=http%3A%2F%2Ffinanzascarbono.org%2Fcomunidad%2Fmod%2Ffile%2Fdownload.php%3Ffile_guid%3D3629&ei=mSO8UdnFD6KN7QbA8IH4Dg&usg=AFQjCNFX4nOBg4ZILmsvfPaW3XzZPZe0gg
- Binder, C.R., Mosler, H.J., 2007. Waste-resource flows of short-lived goods in households of Santiago de Cuba. Resour. Conserv. Recycl. 51, 265–283. Biogen, 2011. BIOGEN Corp. Ltd. signs an MoU with UNEP to promote Biomass.
- Botero, R. y Preston, T.R. (1986). *Manual de instalación de un biodigestor de bajo costo*. Centro para la investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (CIPAV), Cali, Colombia, 35p., Available at: <http://www.utaoundation.org>.
- Boulet, E., Brackmann, S., Breisinger, M., Terraza, H. y Willumsen, H. (2010). *Directrices sobre vertederos un enfoque favorable a la inversión en vertederos sin impacto sobre el cambio climático*. Documento del Banco Interamericano de Desarrollo. Available at: http://www.unclearn.org/sites/www.unclearn.org/files/inventory/idb07_spn.pdf
- Brakel, J. (1980). *Small-scale anaerobic digesters (Biogas Plants): A critical review of the pre-1970 literature*. Softbank, Ex-Library Delfy University Press.
- Braun, B., Huber, P. and Meyrath, J. (1981). *Ammonia toxicity in liquid piggery manure digestion*. Biotechnol. Lett. 3, 159–164.
- Brown, K.A. and Maunder, D.H. (1994). *Exploitation of Landfill Gas: a UK Perspective*. Water Science & Technology, 30:143-151.
- Burns, R. (2009). *Current State of Manure Anaerobic Digestion in the U.S. and Beyond*. Energy Production from Anaerobic Digestion of Dairy Manure. Madison, WI. September 28-29.
- Business Mega, 2011. Mauritius to Have Biogas Plant Soon. Disponible en. <http://business.mega.mu/2011/05/10/mauritius-have-biogas-plant-soon/>

- Buxton, D. and Brian, R. (2010). *Disposal of latrine waste: Is biogas the answer? A review of literature* Daniel Buxton & Brian Reed EWB-UK National Research Conference. Available at: http://www.hedon.info/docs/EWB_ENERGY_Daniel_Buxton_and_Brian_Reed_Disposal_of_latrine_waste_Is_Biogas_the_answer.pdf
- Buxton, D. and Reed, B. (2010). *From Small Steps to Giant Leaps...putting research into practice*. EWB-UK National Research Conference 2010. Hosted by The Royal Academy of Engineering 19th.
- Callagham, F.J., Wase, D.A.J., Thayanithy, K. and Foster, C.F. (1999). *Co-digestion of waste organic solids: batch studies*. Bioresource Technology. Vol 67, pag. 117-122.
- Campos, E., Bonmatí, A., Teira, M.R. y Flotats, X. (2001). *Aprovechamiento energético de lodos residuales y purines. Producción de Biogás*. Jornadas Técnicas sobre Energía. Barcelona.
- Carreras, N. (2011b). *PROBIOGÁS*. Vídeo de 11:00 minutos de duración. Dep. Legal M-1553-2011. Disponible en: <http://www.ciemat.es/portal.do?IDM=65&NM=2>.
- Carreras, N. (2011a). *Producción de energía en vertederos españoles. El vertedero Biorreactor*. Experiencias en EEUU. En XIII Conferencia ATEGRUS sobre vertederos controlados. Lleida. España.
- Carreras, N. (2010). *Tipos de digestores, selección en función del residuo*. Capítulo en: Energía de la Biomasa, volumen II, Energías Renovables. Sebastián, F., García, D., Rezeau, A. Eds. Eds. Prensas Universitarias de Zaragoza. . ISBN 978-84-15031-01-7.
- Carreras, N. (2008). *Clasificación, Planificación, Diseño, Construcción y Explotación de Vertederos*. En: Jornada Técnica sobre Gestión Integral de Vertederos Controlados. IFAES. Madrid.
- Carreras, N. y Dorronsoro J.L. (2006). *Generación de energía a través del biogás extraído de los vertederos españoles*. Residuos, 89: 66-70.
- Carreras, N., Dorronsoro J.L., Pérez, R. y Herraiz, I. (2005). *Estudio de la generación de gases a diferentes profundidades en un vertedero sin desgasificar de RSU clausurado hace más de siete años*. Residuos, 82: 76-84.
- CEDECAP. (2007), *Biodigestor de Polietileno: Construcción y Diseño*. Available at: <http://www.produccion-animal.com.ar/Biodigestores/11-polietileno.pdf>
- CEPAL, FAO e IICA. (2012). *Perspectivas de la agricultura y del desarrollo rural en las Américas: una mirada hacia América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile, FAO, 2012. ISBN13: 978-92-5-307355-9. 176 pag. Available at: <http://repiica.iica.int/docs/B2993E/B2993E.PDF>
- Chandrappa, R., Das, D.B. (2012). *Waste quantities and characteristics*. In: Chandrappa, R., Das, D.B. (Eds.), Solid Waste Management, Principles and Practice. Springer-Verlag, Heidelberg, p. 53.

- Chará, J., Pedraza, G. and Conde, N. (1999). *The productive water decontamination system: A tool for protecting water resources in the tropics*. Livestock Research for Rural Development 11
- Chawla, O.P. (1986) *Advances in biogas technology*. Publications and Information Division, Indian Council of Agricultural Research, New Delhi.
- Chen, Y., Jay, J. and Creamer, K.S. (2008) *Inhibition of anaerobic digestion process: A review*. Bioresource Technology 99, 4044-4064.
- Chen, Y.R. and Hashimoto A.G. (1978). *Kinetics of methane fermentation*. Biotechnology and Bioengineering Symp. Vol. 8.
- Chen, W.H., Han, S.K. and Sung, S. (2003). *Sodium inhibition of thermophilic methanogens*. J. Environ. Eng. 129 (6), 506–512.
- Chen, Y., Yang, G., Sweeney, S. and Feng, Y. (2009). *Household biogas use in rural China: A study of opportunities and constraints*. Renew Sustain Energy Rev.
- Choi, H.B., Hwang, K.Y. and Shin E.B. (1997). *Effects on anaerobic digestion of waste activated sludge pre-treatment*. Water Science and Technology, 35, 207-11.
- Chu, Steven y Majumdar, Arun (2012): “Opportunities and challenges for a sustainable energy future”. *Nature*, 488, (agosto), págs. 294 a 303. Disponible en: <http://www.nature.com/nature/journal/v488/n7411/full/nature11475.html>
- Colleran, E., Barry, M., Wilkie, A. and Newll, P.J. (1982). *Anaerobic digestion of agricultural wastes using the upflow anaerobic filter design*. Process Biochemistry. Vol. 17.
- Colleran, E., Finnegan, S., Lens, P. (1995). *Anaerobic treatment of sulphate-containing waste streams*. Anton. Van Leeuw. 67, 29–46.
- Colleran, E., Wilkie, A., Barry, M., Faherty, G., O’kelly, N. and Reynolds, P.J. (1983). *One and two stage anaerobic filter digestion of agricultural wastes*. In: Third international symposium on anaerobic digestion, Boston, MA.
- Colleran, E., Finnegan, S. and Lens, P. (1995). *Anaerobic treatment of sulphate-containing waste streams*. Anton van Leeuwenhoek. 67, 29–46.
- Colomer Mendoza, F.J. y Gallardo Izquierdo, A., (2007). *Identificación de peligros asociados a un vertedero controlado*. Residuos 97, 86-95
- Consigny, A., Paulus, E., Turcotte, A., 2005. Wastewater Biogas Digester System for a Rural Residence in Barbados. Bellairs Research Institute, McGill University.
- Coombs, J. (1990). *The present and future of anaerobic digestion*, en *Anaerobic digestion: a waste treatment technology*. Edited by Wheatley, A. Critical reports on applied chemistry. Vol. 31, pp. 93-138. Elsevier applied science LTD.
- Cooper, C.D. (1990). *Landfill Gas Emission—A Final Report of a Research Project Sponsored by the Florida Center of Solid and Hazardous Waste Management*, #90-1, May 15.

- Cseh, T., Czako, L., Toth, J. and Tengerdy, R.P. (1984). *Two-phase anaerobic fermentation of liquid swine waste to methane*. Biotechnology and Bioengineering, Vol. 26.
- Cuesta, M.J., Martín, F., Vicente, G. y Villar, S (2009). *Situación actual de la producción de biogás y de su aprovechamiento*. Informe de Vigilancia Tecnológica. ISBN: 978-84-612-9487-9.
- Curry, N. y Pillay, P. (2012): “*Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment*”. *Renewable Energy*, vol. 41 (mayo), págs. 200 a 209.
- De Baere, L.A., Devocht, M., Van Assche, P. and Verstraete, W. (1984). *Influence of high NaCl and NH₄Cl salt levels on methanogenic associations*. *Water Res.* 18, 543–548.
- De la Torre, N (2008). *Digestion anaerobia en comunidades rurales*. Available at: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/11627/1/PFC_Nadia_deLaTorre_Caritas.pdf
- Del Toro, A.G. (2001). *Producción de alcoholes*. Consorcio Ron Brugal República Dominicana. Tercer Taller Internacional de Producción de Alcoholes (TIPAL 01). Matanzas, Cuba. Abril, 2001.
- Deublein D. and Steinhauser A. (2008). *Biogas from Waste and Renewable Resources: An introduction*. Wiley-VCH editors Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 447 pp.
- Dinsdale, R.M., Premier, G.C. and Hawkes, D.L. (2000). *Two-stage anaerobic codigestion of waste activated sludge and fruit/vegetable waste using inclined tubular digesters*. *Bioresource technology*. Vol. 72. pp. 159-168.
- Domínguez, M.A. (2010). *Obtención y utilización del gas de vertedero*. Capítulo en: *Energía de la Biomasa, volumen II, Energías Renovables*. Sebastián, F., García, D., Rezeau, A. Eds. Prensas Universitarias de Zaragoza. ISBN 978-84-15031-01-7.
- Eastern Research Group Inc. and Tetra Tech (2011). *Resource Assessment for Livestock and Agro-Industrial Wastes-Dominican Republic*. Global Methane Initiative.
- Eden, R. (2005). *The three dimensional modelling of flare stacks combusting landfill gas*. Sardinia 2005. International Waste Management and Landfill Symposium Sta. Margherita di Paula, Italy.
- Energética XXI. (2006). *Los motores a gas Jenbacher de GE Energy apoyan un proyecto innovador de energía a partir del biogás en el noroeste de España*. *Energética XXI, Revista de Generación de Electricidad*, 54, Marzo. 2 p. http://energetica21.com/articulos/me/me_mar06_1.pdf
- Engelhart, M., Krüger, M., Kopp, J. and Dichtl, N. (2000). *Effects of desintegration on anerobic degradation of sewage excess sludge in downflow stationary fixed film digesters*. *Wat. Sci. Tech*, 41(3), 171-177.
- EPA (2010). *Overview of Anaerobic Digestion and Digesters*. EPA Region 2. NorthEast Biogas Webinar, March 24. Available at: http://www.epa.gov/wastes/conserve/foodwaste/docs/feasibility_stdy_st_bernrd_la.pdf

- EPA (2006). *Global Anthropogenic Non-CO₂ Greenhouse Gas Emissions: 1990-2020*. Report EPA 430-R-06-003.
<http://www.epa.gov/climatechange/Downloads/EPAactivities/GlobalAnthroEmissionsReport.pdf>
- EPA (2005). *First-Order Kinetic Gas Generation Model Parameters for Wet Landfills*. Report: EPA-600/R-05/072. Available at: <http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/P100ADRJ.pdf>
- EPA (2005b). *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide*. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302-guide.pdf>
- EPA (2004). *Global Anthropogenic Emissions of Non-CO₂ Greenhouse Gases 1990-2020*. (EPA Report 430-R-06-003) . Disponible en: <https://www.epa.gov/global-mitigation-non-co2-greenhouse-gases/global-anthropogenic-emissions-non-co2-greenhouse-gases>
- EPA (2003). Bioreactors. Disponible en : <http://www.epa.gov/osw/nonhaz/municipal/landfill/bioreactors.htm>
- EPA (1995). U.S. Environmental Protection Agency. *Compilation of Air Pollutant Emissions Factors*, AP-42, Fifth Addition, Volume 1: Stationary Point and Area Sources. January 1995. Section 2.4—Municipal Solid Waste Landfills. Available at: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/>
- Eurostat (2017). Municipal waste generated by country in selected years (kg per capita). http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/images/f/fe/Municipal_waste_generated_by_country_in_selected_years_%28kg_per_capita%29.png
- Evans, E.A., Evans, K.M., Ulrich, A., Ellsworth, S. and Abbasnezhad, H. (2009). *Anaerobic processes*. Water Environ Res 81(10):1293–1345. doi:10.2175/106143009X12445568399613
- Fachverband Biogas (2017). Development of the number of biogas plants and the total installed electric output in megawatt (MW) in Germany. [https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/17-10-13_Biogasindustryfigures-2016-2017.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/17-10-13_Biogasindustryfigures-2016-2017.pdf)
- Fachverband Biogas (2018). Branchenzahlen 2017 und Prognose der Branchenentwicklung 2018. [https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/18-05-25_Biogas_Branchenzahlen-2017_Prognose-2018_end.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/18-05-25_Biogas_Branchenzahlen-2017_Prognose-2018_end.pdf)
- Fachverband Biogas (2018). Development of the number of biogas plants and the total installed electric output in megawatt [MW] in Germany (as of 05/2018) [https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/18-07-05_Biogasindustryfigures-2017-2018_english.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfwb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/18-07-05_Biogasindustryfigures-2017-2018_english.pdf)
- Fadel M. and Massoud M. (2001). *Methane emissions from wastewater management*. Environmental Pollution. Vol. 114. 177-185.
- Fannin, K.F. (1987). *Start-up, operation, stability and control*. Anaerobic digestion of biomass. Ed. D.Y. Chynoweth and R. Isaacson. Elsevier applied science LTD.

- FAO (2017). *Global Action Programme on Food Security and Nutrition in Small Island Developing States*. Available at: <http://www.fao.org/3/a-i7297e.pdf>
- FAO (2016). *State of Food Security and Nutrition in Small Island Developing States (SIDS)*. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5327e.pdf>
- FAO (2014_b). Agriculture and food security statistics of the least developed countries, land locked developing countries and small island developing states. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i3943e.pdf>
- FAO (2014). *FAO Activities in Small Island Developing States*. Available at: <http://www.fao.org/3/a-i3984e.pdf>
- FAO (2013_b). Small Island Developing States In numbers. Disponible en: http://unohrlls.org/custom-content/uploads/2014/04/SIDS_IN_NUMBERS_121813_FA_WEB.pdf
- FAO (2013). Escritorio Regional de FAO para América Latina y el Caribe. Available at: <http://www.fao.org/americas/noticias/ver/pt/c/230145/>
- FAO (2012). *Biogás: una opción para diversificar la matriz energética y generar abonos naturales a partir de desechos orgánicos*. Available at: <http://www.rlc.fao.org/es/prensa/noticias/biogas-una-opcion-para-diversificar-la-matriz-energetica-y-generar-abonos-naturales-a-partir-de-desechos-organicos/>
- Feijoo, G., Soto, M., Mende'z, R. and Lema, J.M. (1995). *Sodium inhibition in the anaerobic digestion process: antagonism and adaptation phenomena*. Enzyme Microb. Technol. 17, 180–188.
- Fernández, N., Montalvo, S., Fernandez-Polanco, F., Guerrero, L., Cortes, I., Borja, R., Sanchez, E. and Travieso L. (2007). *Real evidence about zeolite as microorganisms immobilizer in anaerobic fluidized bed reactors*. Process Biochemistry 42(4), 721-728.
- Fernández-Polanco, F., y Gracia, P.A. (1993). *Tecnología y diseño de reactores*. Depuración anaerobia de aguas residuales. II. Retema, nº 6 (37), pp. 61-68.
- Fernández-Polanco, F., y Gracia, P.A. (2000). *Procesos biológicos anaerobios. Bases y parámetros de operación*. Jornadas sobre tratamientos biológicos de residuos orgánicos, Gobierno de la Rioja. Dirección General de Calidad Ambiental, Logroño.
- Fdz-Polanco, F., Fdz-Polanco, M. y García, P.A. (2002). *Criterios para la selección de tecnología de digestión anaerobia de residuos sólidos*. Available at: www.bvsde.paho.org/bvsacd/unam7/criterios.pdf.
- Fernández-Polanco, F., Nieto P., Pérez Elvira S.I. and Fernández-Polanco, M. (2006). *Automated manometric method to assess anaerobic toxicity of chemicals*. Water Science and Technology 54 (2), 95-101.
- Ferrer, I., Gamiz, M., Almeida, M. and Ruiz, A. (2009). *Pilot project of biogas production from pig manure and urine mixture at ambient temperature in Ventanilla (Lima, Peru)*. Waste Management 29(1), 168-173

- Ferrer, I., Uggetti, E., Poggio, D. y Velo, E. (2009). *Producción de biogás a partir de residuos orgánicos en biodigestores de bajo coste*. Available at: <http://grecdh.upc.edu/publicacions/congressos/energia-1/cng03-ferrer-et-al-ii-upc-sost-paper.pdf>
- Figueroa (2015). *Construirán fábrica de biogás en Yauco*. Disponible en: <https://www.elnuevodia.com/ciencia/ciencia/nota/construiranfabricadebiogasenyauco-2087587/>
- Finanzas Carbono (2012). Estadísticas MDL. Disponible en: <http://finanzascarbono.org/mercados/mecanismo-desarrollo-limpio/estadisticas/>
- Flotats, X. y Sarquella, L. (2008). *Produció de biogás per codigestió anaeròbia*. Col·lecció Quadern Pràctic, nº 1. Institut Català d'Energia. Barcelona. pp. 55.
- FMAM. (2005). El Fondo para el Medio Ambiente Mundial y los Pequeños Estados Insulares. Disponible en: <http://documents.worldbank.org/curated/en/332271468762006581/pdf/333380SPANISH0GEF1SIDS.pdf>
- François, V., Feuillade, G., Matejka, G., Lagier, T. and Skhiri, N. (2007). *Leachate recirculation effects on waste degradation: Study on columns*. Waste Management 27, 1259–1272.
- Fry, L.J (1973). *Methane Digesters* is also published, independently, as Newsletter No. 3, Spring 1973, by The New Alchemy Institute, Box 432, Woods Hole, Massachusetts 02543, Eigh© 1973 L. John Fry and Richard, M.
- Gallert, C., Bauer, S. and Winter, J. (1998). *Effect of ammonia on the anaerobic degradation of protein by a mesophilic and thermophilic biowaste population*. Applied Microbiology and Biotechnology. Vol 50, pag. 495-501.
- Gan, L. and Yu, J. (2008). *Bioenergy transition in rural China: Policy options and co-benefits*. Energy Policy 36, p. 531-540.
- Gandolla, M., C. Acaia, and C. Fisher, (1998). *Landfill gas migration in the subsoil. Experiences of control and remediation*. James&James Science Publishers, Ltd. London, UK. 237-245.
- Gannon, E., H. Marron, S. Regan, M. Walsh, J.J. Lenehan, K. Reidy, M. Maher, P. Blagden, W.L. Magette, and O.T. Carton. (1994). *Monaghan Agricultural Waste Management Study*. Study Commissioned from Teagasc by Monaghan County Council
- García Encina P.A. and Hidalgo, M.D. (2005). *Influence of substrate feed patterns on biofilm development in anaerobic fluidized bed reactors*. Process Biochemistry 40, 2509-2516.
- García, H., Rico, C., Garcia, P.A. and Rico, J.L. (2008). *Flocculants effects in biomass retention in a UASB reactor treating dairy manure*. Bioresource Technology 99, 6028-6036. 2008.
- Garfi, M., Ferrer-Martí, L., Villegas, V. and Ferrer, I. (2011). *Psychrophilic anaerobic digestion of guinea pig manure in low-cost tubular digesters at high altitude*. Bioresource Technology, 102(10), 6356-6359. doi:10.1016/j.biortech.2011.03.004.

- Gene, P. and Owen, W. (1986). *Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludges*. Journal of Environmental Engineering 112:867-916.
- Gendebien, A., Gendebien A., Pauwels M., Constant M., Ledrut-Damanet, M.J., Nyns, E.J., Willemsen, H.C., Butson, J., Fabry, R. and Ferrero, G. L. (1992). *Landfill gas from environment to energy*. Final Report - Contract No 88-B-7030-11-3-17 – Directorate General Energy – Commission of the European Communities – EUR 14017/1 EN – ISBN 92 92-826-3672-0.
- GIS, 2014. Two Waste to Energy Plants Operational in 2017.
<http://www.govmu.org/English/News/Pages/Two-Waste-to-Energy-plants-operational-inMauritius-in-2017,-announces-Minister-Aim%C3%A9.aspx>
- Gómez, M., Villén, D. and Sebastián, F. (2010). *Plantas de digestión anaerobia en países en vías de desarrollo*. Capítulo en: Energía de la Biomasa, volumen II, Energías Renovables. Sebastián, F., García, D., Rezeau, A. Eds Pressas Universitarias de Zaragoza. ISBN 978-84-15031-01-7.
- González-Fernández, C., León-Cofreces, C. and García-Encina, P.A. (2008). *Different pretreatments for increasing the anaerobic biodegradability in swine manure*. Bioresource Technology 99 (18), 8710-8714.
- Greeley, S.A. and Velzy, C.R. (1936). *Operation of sludge gas engines*. Sewage Works Journal 8 (1): 57-63.
- GTZ/EnDev (2010). *Installation manual for low-cost polyethylene tube digesters*. Germany. Available at:
https://energypedia.info/images/1/19/Low_cost_polyethylene_tube_installation.pdf
- GTZ/GIZ (1999). *Biogas digest: Volume 2: Biogas application and product development*. GTZ. Available at: <http://ebookbrowse.net/isat-gtz-1999-biogas-digest-volume-ii-biogas-application-and-product-development-pdf-d331669159>
- Guardia, Y. (2012). *Estudio de la digestión anaerobia en dos fases para el tratamiento de las aguas residuales de despulpe del beneficiado húmedo del café*. Tesis Doctoral. ETSIA. Available at: http://oa.upm.es/14684/1/YANS_GUARDIA_PUEBLA.pdf
- Gujer, W. and Zehnder, A.J.B. (1983). *Conversion Processes in Anaerobic Digestion*. Water Sci. Technol. 15, 127-167.
- Hashimoto, A.G. (1986). *Ammonia inhibition of methanogenesis from cattle waste*. Agric. Wastes 17, 241–261.
- Hernández, O. (2012). *Procesos y desafíos políticos del biogás en México y Brasil. Los casos de salinas Vistoria y Bandeirantes*. Fac. Latinoamericana de C. Sociales. México. Available at: http://www.flacso.edu.mx/biblioiberoamericana/TEXT/MGAP_X_promocion_2010-2012/Hernandez_O.pdf
- Hernández Muñoz, A. (2001). *Depuración y desinfección de aguas residuales*. Curso Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Quinta edición. España.

- Hettiarachchi, H., Meegoda, J. and Hettiaratchi, P. (2009). *Effects of gas and moisture on modeling of bioreactor landfill settlement*. Waste Management 29, 1018–1025
- Hidalgo, M.D. y García P.A. (2001). *Influencia del sulfato en la degradación anaerobia de materia orgánica*. Ingeniería Química, nº 383, pp. 183-191, 2001.
- Hilbert, J.A. (2005). *Manual para la producción de Biogás*. Instituto de Ingeniería Rural. INTA-Castelar. Pp. 57.
- Hivos (2013). Data on Africa biogas partnership programme. Available at: <http://sites.google.com/site/biogas4all/>
- Hoornweg, D and Ghada-Tata, P. (2012). *WHAT A WASTE A Global Review of Solid Waste Management*. World Bank. Disponible en: <http://documents.worldbank.org/curated/en/302341468126264791/pdf/68135-REVISED-What-a-Waste-2012-Final-updated.pdf>
- Hu, Q. (2006). *The Promotion of Rural Domestic Biogas Plants in P.R. China*.
- Hughes, K.L., Christy, A.D. and Heimlich J.E. (2005). *Bioreactor Landfills* Ohio State University Fact Sheet CDFS-139-05, 1-3.
- Hurtado, M.E. (2012). *Biogás 'mejoraría sustentabilidad del agro' en Latinoamérica*. Available at: <http://www.scidev.net/es/latin-america-and-caribbean/news/biog-s-mejorar-a-sustentabilidad-del-agro-en-latinoam-rica.html>
- IDAE (2007). *Biomasa: Digestores anaerobios*. Available at : http://www.idae.es/index.php/mod.documentos/mem.descarga?file=/documentos_10737_Biomasa_digestores_07_a996b846.pdf
- IICA (2009). *Installation of a low cost polyethylene biodigester*. Belize Audubon Society, IICA & Ministry of Agriculture and Fisheries.
- Imhoff, K. & G. Fair. (1956). *Sewage Treatment* (2nd ed.). John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Imhoff, P.T., Reinhart, D.R., Englund, M., Guérin, R., Gawande, N., Han. B., Jonnalagadda, S., Townsend, T.G. and Yazdani, R. (2007). *Review of state of the art methods for measuring water in landfills*. Waste Management 27. 729–745. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X06001486>
- Inglis, S. (2006). *Evaluating payback of farm-scale digesters*. In: Proceedings from the 6th Annual BioCycle Conference on Renewable Energy from Organics Recycling, Minneapolis, MN, October 30–November 1, 2006.
- IPCC (2006). *Directrices 2006 del IPCC para inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*, Volumen 5 (Desechos), Sección 3. Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>.
- IPS (2014_a). *Mecanismo de Desarrollo Limpio está en una encrucijada en Lima*. Disponible en: <http://www.ipsnoticias.net/2014/12/mecanismo-de-desarrollo-limpio-esta-en-una-encrucijada-en-lima/>

- IPS (2014_b). Si es bueno para los Estados insulares es bueno para el planeta. Disponible en: http://old.ipscuba.net/index.php?option=com_k2&view=item&id=10703:si-es-bueno-para-los-estados-insulares-es-bueno-para-el-planeta&Itemid=7
- Isaka, M., Mofor, L., Wade, H., 2013. Pacific lighthouses: renewable energy opportunities and challenges in the Pacific Islands Region (Samoa). Int. Renew. Energy Agency.
- ISKCON, 2004. ISKCON Vedic Farm Mauritius. Disponible en: http://www.iskconmauritius.org/iskcon_vedic_farm_iskcon_goshalla_and_biogas_plant.htm
- ISIS (2006). *Biogas China*. Report 02/10/06. Available at: <http://www.isis.org.uk/BiogasChina.php>
- ISWA (2004). Revista de la Asociación internacional de residuos sólidos (ISWA), *Waste Management World*, julio-agosto de 2004: *Landfill gas recovery plants. Looking at types and numbers worldwide*, Hans Willumsen, LFG Consult.
- ITRC (2005). *Characterization, Design, Construction, and Monitoring of Bioreactor Landfills*. ALT-3. Washington, D.C.: Interstate Technology & Regulatory Council, Alternative Landfill Technologies Team.
- Joysury, R., Abeeluck, D., 2013. Diagnostic Analysis of Wastewater Management in Mauritius. International Wrap-up Workshop on Safe use of Wastewater in Agriculture.
- Kashyap, D.R., Dadhich, K.S. and Sharma, S.K. (2003) *Biomethanation under psychrophilic conditions: a review*. *Bioresource Technology*, **87**, 147-153.
- Kennedy, K. and Van den Berg, L. (1982a). *Anaerobic digestion of piggery waste using a stationary fixed film reactor*. *Agric Wastes* 4(2):151–158. doi: 10.1016/0141-4607(82)90023-3.
- Khanal, S. (2009). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production*. Published online: March 27, 2009. DOI: 10.1002/9780813804545.
- Khanal, S.K. (2008). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications*. Wiley-Blackwell, Ames
- Klass, D. C. (1998). *Biomass for Renewable Energy, Fuels and Chemicals*. San Diego, Academic Press.
- Koster, I.W., Rinzema, A., De Vegt, A.L. and Lettinga, G. (1986). *Sulfide inhibition of the methanogenic activity of granular sludge at various pH levels*. *Water Res.* 20, 1561–1567.
- Kowlessar, P., 2012. Solid Waste Management in Mauritius. Solid Waste Management Division, Ministry of Local Government and Outer Islands.
- Kranert, M., Kusch, S., Huang, J., Fischer, K., 2012. Anaerobic digestion of waste. In: Karagiannidis, A. (Ed.), *Waste to Energy: Opportunities and Challenges for Developing and Transient Economies*. Springer, pp. 128–129.

- Krich, K., Augenstein, D., Batmale, J.P., Benemann, J., Rutledge, B., Salour, D. (2005). *A Sourcebook for the production and use of renewable natural gas in California*. California Institute for Energy and Environment. 282 p.
- KSET, 2012. Kievnov Science and Environmental Technologies Co. Ltd. Domestic Biogas. <http://www.kievnov.com/biogas/domestic-biogas/>
- Kumar, S., Mathieux, F., Onwuboly, G., Chandra, V., 2008. A Novel Powder Metallurgy-based Method for the Recycling of Aluminium Adapted to Small Island Developing States in the Pacific. CIRP International Conference on Life Cycle Engineering, Sydney.
- Lansing, S., Botero, R. and Martin, J.F.. (2008). *Wastewater treatment and biogas production in small-scale agricultural digesters*. Bioresource Technology 99, 5881-5890.
- Lansing, S., Martin, J.F., Botero, R., Nogueira a Silva, T. and , Dias da Silva, E. (2010). *Methane production in low-cost, unheated, plug-flow digesters treating swine manure and used cooking grease*. Bioresource Technology. 101, 12. pp 4362-4370.
- Lansing, S., Viquez, J. Martínez, H. Botero, R. and Martin, J. (2008). *Quantifying electricity generation and waste transformations in a low-cost, plug-flow anaerobic digestion system*. Ecological Engineering 34. pp. 332–348.
- Lay, J.J., Li, Y.Y. and Noike, T. (1997). *Influences of pH and moisture content on the methane production in high-solids sludge digestion*. Water Research, Vol. 31 (10). 1997.
- Lema, J.M. y Méndez, R.J. (1997). *Tratamientos biológicos anaerobios*. Chapter: Contaminación e ingeniería ambiental, volumen III, Contaminación de las aguas, Bueno, Julio, L. Sastre, H., Lavín, A. eds, F.I.C.Y.T, Oviedo, España.
- Lemoine, C. H. (2003). *Bioreactor landfills. An innovative solution or a risky experiment?* Alternative Service Delivery i Kampala City Council. Kampala City, Uganda.
- Letcher T.M. and Vallero D.A. (2011). *Waste*. Ed Elsevier.
- Lettinga, G. (2001). *Digestion and degradation: air for life*. Water Sci. Technol. 44 (8), 157–176.
- Lettinga, G., van Velsen, A.F.M., Hobma, S.W., de Zeeuw, W. and Klapwijk, A. (1980). *Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment*. Biotechnol Bioeng 22(4):699–734. doi:10.1002/bit.260220402.
- Lin, C.Y. (1992). *Effect of heavy metals on volatile fatty acid degradation in anaerobic digestion*. Water Res. 26, 177–183.
- Lin, C.Y. (1993). *Effect of heavy metals on acidogenesis in anaerobic digestion*. Water Res. 27, 147–152
- Lixin, Z. (2007). *Current Status and its Potential for Large and Middle-sized Biogas Plant in China*. Paper presented at the Methane to Markets Partnership Expo, Beijing, 30 October – 1 November.

- López, I., Passeggi, M., Odriozola, M., Borges, L. and Borzacconi, L. (2010). *Tratamiento anaerobio de destilería de caña de azúcar*. Disponible en: <http://aiquruguay.org/congreso/download/TL44.pdf>
- Lusk P. (1998). *Methane recovery from animal manures*. The current opportunities casebook. NREL, Golden. Colorado USA pp: 3-7.
- MAGRAMA (2010). *El Sector del Biogás Agroindustrial en España*. Available at: http://www.magrama.gob.es/es/ganaderia/temas/requisitos-y-condicionantes-de-la-produccion-ganadera/docbiogasversion21-09-2010_tcm7-5925.pdf
- Mahony, T., O'Flaherty, V., Colleran, E., Killilea, E., Scott, S. and Curtis, J. (2002). *Feasibility Study for Centralised Anaerobic Digestion for Treatment of Various Wastes and Wastewaters in Sensitive Catchment Areas*. R&D Report Series No. 16. Environmental Protection Agency
- Marañón, E., Fernández, Y. y Castellón, L. (2009). *Manual de Estado del Arte de la Co-digestión Anaerobia de Residuos Ganaderos y Agroindustriales*. Available at Proyecto Probiogás: www.probiogas.es
- Marchaim, U. (1992). *Biogas processes for sustainable development*. FAO. Available at: http://books.google.es/books?id=NLDRTXyp0lcC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbg_e_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Marshall, A.D. (2010). Agricultural Censuses in the Small Island Developing States (SIDS) – Recent country experiences. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/ess/documents/meetings_and_workshops/ICAS4/Agricultural_Censuses_in_the_Small_Island_Developing_States_SIDS_%E2%80%93_Recent_Country_Experiences.pdf
- Martí, J. (2008). *Biodigestores Familiares. Guía de diseño y manual de instalación*. Cooperación Técnica Alemana - GTZ. Bolivia. ISBN: 978-99954-0-339-3. Available at: <http://www.upc.edu/grecdh/cas/energia/publicacions.htm>
- Martí, N. (2006) *Phosphorus precipitation in Anaerobic Digestion Process*. Dissertation.com. Boca Raton. Florida. USA. ISBN: 1-58112-332-9.
- Martín González, S. (1997). *Producción y recuperación del biogás en vertederos controlados de residuos sólidos urbanos: análisis de variables y modelización*. Tesis Doctoral: pp. 211-220. Universidad de Oviedo.
- Mata-Alvarez, J. (2003). *Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes*. IWA Publishing, London, UK (2003) pp. 42.
- Mata-Álvarez, J., Macé, S. y Ilabrés, P. (2000). *Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives*. Bioresource Technology, vol. 74, pp. 3-16.
- McCarty, P.L. (1982). *Anaerobic Digestion*. D.E. Hughes, D.A. Stafford, B.F. Weatley, W. Beader, G. Lettinga, E.J. Nuns, W. Verstraete and R.L. Wentworth, eds. Elsevier Biomedical, Amsterdam, pp. 3-22. McCoy, J.H. (1962) J. Appl. Bact. 25:213-224.

- McCarty PL (1982). *One hundred years of anaerobic treatment*. In: Hughes DE, Stafford DA, Wheatley BI et al (eds) *Anaerobic digestion, 1981: proceedings of the second international symposium on anaerobic digestion*. Elsevier Biomedical, Amsterdam, pp 3–22.
- McCarty, P.L. and McKinney, R. (1961). *Salt toxicity in anaerobic digestion*. J. Water Pollut. Control Fed. 33, 399–415.
- Medina, M., 2011. Municipal solid waste management in third world cities: lessons learned and a proposal for improvement. Human Settlement Development-Vol. III, Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).
- Mehta, R., Barlaz, M., Yazdani, R., Augenstein, D., Bryars, M. and Sinderson, L. (2002). *Refuse decomposition in the presence and absence of leachate recirculation*. Journal of Environmental Engineering 128 (3), 228–236.
- Merry, S. M., (2000). *Project description: Field reconnaissance of Payatas landfill waste slide in Quezon City, Philippines*.
- Metcalf & Eddy. (1995). *Ingeniería de aguas residuales: tratamiento, vertido y reutilización*. McGrawHill. 3ª edición. España.
- Mohee, R; Mauthoor, S; Bundhoo, ZM; Somaroo, G3; Soobhany, N; Gunasee, S. (2015). Estado actual del manejo de desechos sólidos en pequeños estados insulares en desarrollo: una revisión. Waste Manag. 2015 Sep; 43: 539-49. doi: 10.1016 / j.wasman.2015.06.012. Epub 2015 23 de junio.
- Moletta, R. (2008). *La méthanisation*. ISBN 978-2-7430-1036-2. Ed. Lavoisier.
- Montes, M.E. (2008). *Estudio técnico-económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás. tesis doctoral*. E.T.S.I. de Caminos, Canales y Puertos. Available at: http://oa.upm.es/1049/1/MARIA_ESTELA_MONTES_CARMONA.pdf.
- Moss, A. and Lansing, S. (2010). *Small-scale digestion technology and applications*. In 10th Annual Conference on Renewable Energy from Organics Recycling, Des Moines, IA. BioCycle/JG Press, Emmaus, PA.
- Munasingha, S., & Wijesuriya, K. (2007). *Using a Biogas Digester*. Colombo, Sri Lanka: Practical Action.
- Muñoz Valero, J.A., Ortiz Cañavate, J. y Vázquez Minguela, J. (1985). "Técnica y Aplicaciones Agrícolas de la Biometanización". Mº Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Muñoz R., Villaverde S., Guieysse B. and Revah, S. (2007). *Two phase partitioning bioreactors for treatment of volatile organic compounds*. Biotechnology Advances 25(4) 410-422.
- Murray, W.D. and Van Den Berg, L. (1981). *Effects of nickel, cobalt, and molybdenum on performance of methanogenic fixed-film reactors*. Appl Environ Microbiol 42(3):502–505.

- Myles, R. (2001). **Implementation of Household Biogas Plant by NGO's in India**. VODO International Conference on Globalisation and Sustainable Development. Antwerp: Belgian Government.
- Nagpal, S., Chuichulcherm, S., and Peeva, L. (2000). *Microbial sulfate-reduction in a liquid-solid fluidized bed reactor*. Biotechnology & Bioengineering. 70: 370-380.
- Nallathambi, G.V. (1997). *Anaerobic digestion of biomass for methane production: a review*. Biomass & Bioenergy vol. 13 issues 1-2 1997. p. 83-114
- Neilson, C.E. (1998). *LM2500 Gas turbine modifications for biomass fuel operation*. Biomass and Bioenergy, 15(3): 269-273.
- Noguer, X. (2006). *Aprovechamiento energético de biogás en vertedero*. Seminario sobre tecnologías energéticas para la biomasa y residuos. Endesa. <http://www.fundacionenergia.es/>
- Noyola, A. (2012). *Inventario de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales municipales en América Latina y el Caribe y cuantificación de Gases de Efecto Invernadero en México*. Available at: http://cefimslp.gob.mx/9foro/P09/B/Ponencia_A.Noyola_SLP%2027-septiembre-2012.pdf
- Noyola, A., Padilla-Rivera, A., Morgan-Sagastume, J.M., Güereca, L.P. and Hernández-Padilla F. (2012). *Typology of wastewater treatment technologies in Latin America*. CLEAN – Soil, Air and Water. 40(9): 926-932.
- NREL (2013). *Feasibility Study of Anaerobic Digestion of Food Waste in St. Bernard, Louisiana*. NREL/TP-7A30-57082 Technical Report. Available at: http://www.epa.gov/wastes/conserve/foodwaste/docs/feasibility_stdy_st_bernrd_la.pdf
- Ocwieja, S. M. (2010). *Life cycle thinking assessment applied to three biogas projects in central Uganda*. Master's Report. Michigan Technological University. Retrieved October 11, 2011. Available at: <http://cee.eng.usf.edu/peacecorps/5%20-%20Resources/Theses/Assessment/2009Ocwieja.pdf>.
- Oleszkiewicz, J.A. and Sharma, V.K. (1990). Stimulation and inhibition of anaerobic process by heavy metals – a review. Biol. Wastes 31, 45–67.
- Oliveira, D. A. F., (2002). *Estabilidade de taludes de maciços deresíduos sólidos urbanos*. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília DF. 1-155.
- ONU (2017). Borrador del Plan de Trabajo y Presupuesto para el Subprograma de Evaluación y Gestión de la Contaminación Ambiental para 2017-2018. Disponible en: [file:///C:/Users/u3097/Downloads/LBS_COP3_UNEP\(DEPI\)CAR_IG.38-3_AMEP_Workplan_and_Budget-es.pdf](file:///C:/Users/u3097/Downloads/LBS_COP3_UNEP(DEPI)CAR_IG.38-3_AMEP_Workplan_and_Budget-es.pdf)
- ONU (2015). *La energía urbana sostenible*. Disponible en : <https://unchronicle.un.org/es/article/la-energ-urbana-sostenible-es-el-futuro>

- OPS (2010). *Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe*. IDB-MG-115. AIDIS -001/2011. Available at: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=36466973>
- OPS (2005). *Informe regional sobre la evaluación de los servicios de manejo de residuos sólidos municipales en la Región de América Latina y el Caribe*. Washington, D.C.: OPS. ISBN 92 75 32577 4. Available at: <http://www.bvsde.paho.org/cursos/mrsm/e/fulltext/informe.pdf>
- OPS, AIDIS y BID (2010). *Informe de la Evaluación Regional del Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en América Latina y el Caribe*. IDB-MG-115. AIDIS -001/2011. Available at: <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=36466973>
- Orozco, C., Barrientos, H., Lopezlena, A., Cruz, J., Selva, C., Osorio, El., Osorio, Ed., R. Chávez, R., Miranda, J., Arellano, J. y Giesseman, B. (2005). *Evaluación de una planta piloto de tratamiento de aguas residuales del procesamiento del café: características químicas*. Higiene y Sanidad Ambiental, 5: 123-131. Available at: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacd/cd27/higsand1.pdf>
- Owens, J.M. and Chynoweth, D.P. (1992). *Biochemical Methane Potential of MSW Components*. International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste, Venice, Italy. 15-17.
- Pacey, J., Augenstein D., Morck R., Reinhart D. and Yazdani R. (1999). *The bioreactor landfill - an innovation in solid waste management*. MSW Management., Sept/Oct, 53-60.
- Pavlostathis, S.G. and Giraldo-Gómez, E. (1991). Kinetics of anaerobic treatment. Wat. Sci.Tech. **24** (8), 35-59.
- Paz, A. y Cristóbal, S. (2008) *Estudio de biogás en biodigestores tubulares unifamiliares de bajo costo en el Departamento de Cajamarca*, Proceedings III Taller de Biodigestores, ITDG-Soluciones Prácticas, Cajamarca, Perú.
- Pazos Bazán, L. (2006). *Pilas de combustible para un "ecobarrio" en Madrid*. Weblog de Energía y Sostenibilidad de Madrid (diciembre). Available at: <http://weblogs.madrimasd.org/energiasalternativas/>
- Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., Giraldo, S. y Goraldo, L. (2002). *Evaluación de los biodigestores en geomembrana (PVC) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino*. Livestock Research for Rural Development, **14**.
- Peña, J.M., Carreras, N., Ruiz, B. y Pascual, A. (2012). La herramienta METANIZA. Sostenibilidad de plantas de biogás agroindustrial. CONAMA 2012. Congreso Nacional del Medio Ambiente. Madrid.
- People's Daily. (2009). *More rural areas turn to biogas*. Available at: <http://english.people.com.cn/90001/90778/90857/90860/6705135.html>

- Pérez, I. y Garrido, N. (2008). *Tratamiento de efluentes de la industria alcoholaera*. Ingeniería Química Nº 455. 148-153. Disponible en:
<http://www.inese.es/html/files/pdf/amb/iq/455/09ARTICULOEN.pdf>
- Pfeffer, J.T. (1974). *Reclamation of energy from organic refuse*. Final Report EPA-R-800776. Department of Civil Engineering. University of Illinois, Urbana.
- Pine, M.J. and Barker, H.A. (1956) **Studies on the Methane Fermentation**. XII. J. Bacteriol. 71:644.
- Poggio, D. (2007). *Diseño y construcción de dos digestores anaeróbicos en el altiplano andino peruano*. Bachelor Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya.
- Poggi-Varaldo, H.M., Rodriguez-Vazquez, R., Fernandez-Villagomez, G. and Esparza-Garcia, F. (1997). *Inhibition of mesophilic solid-substrate anaerobic digestion by ammonia nitrogen*. Appl. Microbiol. Biotechnol. 47, 284–291.
- Pontual, L., Fernando B. Mainier, F.B, Lima, G.B.A. (2015). The Biogas Potential of Pulp and Paper Mill Wastewater: An Essay. American Journal of Environmental Engineering. p-ISSN: 2166-4633, e-ISSN: 2166-465X. 5(3): 53-57. doi:10.5923/j.ajee.20150503.01
- Powers, W.J., Van Horn, H.H., Wilkie, A.C., Wilcox, C.J. and Nordstedt, R.A. (1999). *Effects of anaerobic digestion and additives to effluent or cattle feed on odor and odorant concentrations*. J. Anim. Sci. 77, 1412–1421.
- Prasad, R.D., 2012. Empirical study on factors affecting biogas production. ISRN Renew Energy 2012.
- Prasertsan, S., Sajjakulnukit, B., 2006. Biomass and biogas energy in Thailand: potential, opportunity and barriers. Renew. Energy 31, 599–610.
- Preston, T.R. and Rodríguez, L. (2002). *Low-cost biodigesters at the epicenter of ecological farming systems*. Proceedings Biodigester Workshop, March 2002.
- Quichun, H. (2006). *The Promotion of Rural Domestic Biogas Plants in P.R. China*. Disponible en: http://www.hedon.info/docs/20060406_Biogas_promotion_China.pdf
- Rajabapaiah, P., Jayakumar, S. and Reddy, A.K.N. (1993). *Biogas electricity. The Pura Village case study*. In: T. B. Johansson, H. Kelly, A. K. N. Reddy, and R. H. Williams (eds.), Renewable Energy Sources of Fuels and Electricity. Washington, D.C.: Island Press, pp. 787-815.
- Rajendran, K., Aslanzadeh, S. and Taherzadeh, M.J. (2012). *Household Biogas Digesters—A Review*. Energies 2012, 5, 2911-2942. Available at: <http://www.mdpi.com/1996-1073/5/8/2911>
- Ramos-Suárez, J.L. and Carreras, N. (2011). *Anaerobic co-digestion of the microalgae Scenedesmus sp.* Editorial Ciemat. Informe técnico 1229. ISSN: 1135-9420. Madrid.
- Ramos Suárez, J.L. and Carreras, N. (2012). *Anaerobic co-digestion of microalgae Scenedesmus sp. and Opuntia maxima*. 20th European Biomass Conference and Exhibition (EU BC&E 2012).

- REEEP Policy Database, 2012. Seychelles Renewable Energy. Disponible en: <http://www.reegle.info/policy-and-regulatory-overviews/SC>
- Reinhart D.R., McCreanor P.T. and Townsend T.G. (2002). The bioreactor landfill: Its status and future. Waste Manage Res. 20: 172–186.
- Reinhart D.R. and Townsend T.G. (1998). *Landfill bioreactor design and operation*. Lewis, New York, 1998.
- Reinhart D.R. and Townsend T.G. (1998). *Landfill bioreactor design and operation*. Lewis, New York, 1998.
- Reinhart D.R. and Townsend T.G. (1997). *Landfill bioreactor design and operation*. Lewis Publishers, New York, NY, 1997.
- Renard, P., Bouillon, C., Neveau, H. and Nyns, E.-J. (1993). *Toxicity of a mixture of polychlorinated organic compounds towards an unacclimated methanogenic consortium*. Biotechnol. Lett. 15 (2), 195–200.
- Rittmann, B. E., & McCarty, P. L. (2001). *Environmental biotechnology: Principles and applications* (International ed.). Singapore: McGraw Hill.
- Rodríguez, M., Peña, J.M., Carreras, N., Ramos, J.L., Ruiz, B. y Pascual, A. (2013). *AGROBIOMET, proyecto de demostración de un sistema sostenible de producción y uso de biometano en vehículos a partir de residuos ganaderos y biomásas alternativas*. Bioenergía 2013. Madrid.
- Rosillo-Calle, F., Woods, J., 2003. Individual Country Biomass Resource Assessment Profiles for Fiji, Kiribati, Samoa, Tonga, Tuvalu & Vanuatu. SOPAC Technical Report 364.
- Rowse, L.E. (2011). *Design of Small Scale Anaerobic Digesters for Application in Rural Developing Countries*. Thesis to obtain degree of Master. University of South Florida. Available at: <http://scholarcommons.usf.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4519&context=etd&seir=1&referer=http%3A%2F%2Fwww.google.es%2Furl%3Fsa%3Dt%26rct%3Dj%26q%3DRo%26wse%26ble%26design%26of%26digester%26source%3Dweb%26cd%3D1%26ved%3D0CCwQFjAA%26url%3Dhttp%253A%252F%252Fscholarcommons.usf.edu%252Fcgi%252Fviewcontent.cgi%253Farticle%253D4519%2526context%253Detd%26ei%3Db3O5UY2EloishQeEtlGgBw%26usg%3DAFQjCNFc4k-uu5Xx0zt-5PsUbcNJI1Rxwg#search=%22Rowse%20LE%20design%20digester%22>
- Sarasa, J. (2010). *Digestión anaerobia y dimensionado de biodigestores*. Capítulo en: Energía de la biomasa, volumen II, Energías Renovables. Sebastián, F., García, D., Rezeau, A. Eds. Prensas Universitarias de Zaragoza. ISBN 978-84-15031-01-7.
- Sebastián, F., García, D. y Rezeau, A. (2010). *Energía de la Biomasa (vol II)*. Prensas Universitarias de Zaragoza. 1ª Edición. SBN 978-84-15031-01-7.
- Second World Biomass Conference. Vol. II Ed. W. P. M. VAN SWAAIJ. (2004). ISBN 88-89407-04-2. pp. 1832-1835.

- Sharma, K, Liu, H., Lau, B.L.T., Li, J., Yu, T. and Liu, Y. (2009). *Biofilm fixed film systems*. Water Environ Res 81(10):1194–1216. doi:10.2175/106143009X12445568399532.
- Sharma, N., & Pellizzi, G. (1991). *Anaerobic biotechnology and developing-countries: 1. technical status*. Energy Conversion and Management, 32(5), 447-469. doi:10.1016/0196-8904(91)90006-5.
- Shirley, T (1659). Communicated a paper to the royal society on an inflammable gas which issued from a well near Wigan in Lancaster ; and Rev. John Clayton nearly a century later, in examining the locality, found that the gas issued from a bed of coal.
- SIDS (2013). *Small Island Developing States (SIDS) Statistics*. Available at: <http://unohrrls.org/custom-content/uploads/2013/09/Small-Island-Developing-States-Factsheet-2013-.pdf>
- SIDS Action Platform (2016). Bringing Biogas to Samoa. Available at: <http://www.sids2014.org/partnerships/?p=7630>
- SNV (2014). Senegal biogas programme closes. Available at <http://www.snvworld.org/en/regions/africa/news/senegal-biogas-programme-closes>
- Söhngen, N. L. (1906). Über bakterien, welche methan ab kohlenstoffnahrung and energiequelle gebrauchen. In: Parasitenkd. Infectionskr. Abt. 2(15): 513–7.
- Sosnowski, P., Wieczorek, A. and Ledakowicz, S. (2003). *Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic fraction of municipal solid wastes*. Adv. Environ. Res. 7, 609–616.
- Spagnoletta, S.A. (2007) Viability study for the application of small-size biodigesters in the Andean rural zone of Cajamarca (Peru), MSc. Thesis, Loughborough University. Available at: <http://www.upc.edu/grecdh/cas/energia/publicacions.htm>
- Speece, R. E. (1996). *Anaerobic biotechnology for industrial wastewaters* (1st ed.). Nashville, TN, USA: Archae Press.
- Squires, C.O., 2006. Public Participation in Solid Waste Management in Small Island Developing States. Caribbean Development Bank
- Stafford A.D. and Hawkes L.D. (1980). *Methane production from waste organic matter*. CRC Press, Inc., Boca Raton FL, USA. p:285.
- Stafford, D.A. (1974). Methane production from waste. Effluent Water Treatment Journal, 14, 73, 1974.
- Steffen, A. (1961). *Operation of full-scale anaerobic contact treatment plant for meatpacking wastes*, Proceedings of the 16th industrial waste conference. Purdue University, USA, pp 423–437.
- Steffen, R.; Szolar, O. and Braun, R. (1998). Feedstocks for Anaerobic Digestion. Q:\RODL\PROJEKTE\AD-NETT\FEEDNEW.DOC. Available at: http://www.adnett.org/dl_feedstocks.pdf

- Summer, R., and Bousfield, S. (1976). Practical aspects of anaerobic digestion. *Process Biochemistry*, 11, pp. 3-6 (5).
- Tanksali, A.S. (2013). Treatment Of Sugar Industry Wastewater By Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor. *International Journal of ChemTech Research*. Vol.5, No.3, pp 1246-1253 April-June 2013.
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L., & Stensel, H. D. (Eds.). (2003). *Wastewater engineering: Treatment and reuse*. New York, NY: McGraw Hill.
- Tchobanoglous G, Theisen H, and Vigil S. (1993). *Integrated Solid Waste Management, Engineering Principles and Management Issues*. New York: McGraw-Hill, Inc. pp. 381-417.
- Tchobanoglous, G., Theissen, H. y Vagil, S. A. (1998). *Gestión integral de residuos sólidos*, Ed. McGraw-Hill/ Interamericana de España S.A., pp 1107.
- Terraza, H. and Willumsen, H. (2009). *Guidance Note on Landfill Gas Capture and Utilization*. Inter-American Development Bank. Technical Notes Nº 108. Available at: http://www.resol.com.br/textos/guidance_note_on_landfill_gas_capture-idb.pdf
- Thaman, R.R., Morrison, R.J., Morrell, W.J., Thaman, B. (2003). Wasted Islands? Waste and the need for integrated waste management in the Pacific Islands-Current status and prospects for reduction and safe disposal. Invited Paper Presented at the Barbados Plan of Action +10 (BPoA+10) Meeting of Experts on Waste Management in Small Island Developing States (SIDS), Havana, Cuba, 27 October-1 November.
- The World Bank (2014). *GDP per capita (current US\$)*. <http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD>
- The World Bank (2011). Analysis of Technology Choices. Disponible en: <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTURBANDEVELOPMENT/EXTUSWM/0,,contentMDK:20239704~menuPK:497751~pagePK:148956~piPK:216618~theSitePK:463841,00.html>
- Tibbar Construction Services Inc. (2014). USVI Biomass Project FAQs. http://www.tibbarconstruction.com/usvi_biomass_faqs.html
- Tianren Trade News. (2009). *Over 30.5 million Chinese household are using biogas for cooking*. Available at: <http://www.tianren.com/en/news.asp?id=180>.
- Tilche, A. and Vieira, S.M.M. (1991). *Discussion report on reactor design of anaerobic filters and sludge bed reactors*. Water Science and Technology, Vol. 24. 1991.
- Titjen, C. (1975). *From Biodung to Biogas: Historical review of European experience*. Energy, agriculture and waste management. W.J. Jewell ed. Ann Arbor Science 347-59.
- Tolaymat, T., Kremer, F., Carson, D. and Davis-Hoover, W. (2004) Monitoring Approaches for Landfill Bioreactors. EPA/600/R-04/301. Available at: http://www.scsengineering.com/Pubs-News/bioreactor_Monitoring.pdf

- Townsend, T.G., Kumar, D. and Ko, J.H. (2008). *Bioreactor Landfill Operation*. A Guide For Development, Implementation and Monitoring. Hinkley Center for Solid and Hazardous Waste Management, 46 pp.
- Tshilumba, D. (2004). *Internal circulation reactor: pushing the limits of anaerobic industrial effluents treatment technologies*. Proceedings of the 2004 Water Institute of Southern Africa (WISA) Biennial Conference 2 –6 May 2004 ISBN: 1-920-01728-3.
- UN (1994). Programme of Action for the Sustainable Development of Small Island Developing States. <http://www.un-documents.net/sids-act.htm>
- UN (2015). Sustainable Development Knowledge Platform. Small Island Developing States. Disponible en: <https://sustainabledevelopment.un.org/topics/sids/list>
- UN (2010). *Trends in Sustainable Development Small Island Developing States*. Department of Economic and Social Affairs: Division for Sustainable Development. United Nations.
- UNDP (2014). *Pacific Island Greenhouse Gas Abatement through Renewable Energy Project*. Disponible en: <http://www.ws.undp.org/content/samoa/en/home/presscenter/articles/2014/03/13/samoa-where-garden-weeds-become-renewable-energy.html>
- UNEP (1996). Environmental Management in the Brewing Industry. Technical Report Series No. 33. ISBN 9280715232. 232 pp.
- UNEP, 1998. *Management of Wastes in Small Islands Developing States*. Progress in the implementation of the Programme of Action for the Sustainable Development of Small Island Developing States. Disponible en: <http://islands.unep.ch/dd98-7a2.htm>
- UNEP (1999). *Waste Management in Small Island Developing States*. Progress in the Implementation of the Programme of Action for the Sustainable Development of Small Island Developing States. Disponible en <http://islands.unep.ch/d99-6a2.htm>
- UNEP, 1999. *Waste Management in Small Island Developing States*. Progress in the Implementation of the Programme of Action for the Sustainable Development of Small Island Developing States. Disponible en <http://islands.unep.ch/d99-6a2.htm>
- UNESCO (2015). GRAPHIC. Aguas subterráneas y cambio climático. Disponible en <http://unesdoc.unesco.org/images/0024/002428/242861s.pdf>.
- UNESCO (2015). Afrontar los Retos. Estudios de casos e indicadores. Contribución de la UNESCO a la edición 2015 del informe de Naciones Unidas para el Desarrollo Hídrico Mundial. Disponible en: https://books.google.es/books?id=HXR5DAAQBAJ&pg=PA23&lpg=PA23&dq=PEID+tratamiento+aguas&source=bl&ots=Ngsc-ICCQA&sig=cGt5LHg8k3VqaGPf36BvW87oE34&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwi_msrTtt_XAhUIM8AKHbp_B9AQ6AEIKzAB#v=onepage&q=PEID%20tratamiento%20aguas&f=false

- USAID. (2009). *China – Nature Conservancy alternative energy project*. Indoor Air Pollution (IAP) Update, July 6. Disponible en: <http://iapnews.wordpress.com/2009/07/06/china-nature-conservancy-alternative-energy-project>
- USAID (2004). Draft Final: Study of the Market Potential for Recovered Methane in Developing Counties. Available at: http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNADK799.pdf.
- USEPA (2012). International Best Practices Guide for Landfill Gas Energy Projects. Disponible en: http://www.globalmethane.org/documents/toolsres_lfg_IBPGcomplete.pdf
- USEPA (2011). DRAFT: Global Anthropogenic Emissions of Non-CO2 Greenhouse Gases: 1990–2030. EPA 430-D-11-003. <http://www.epa.gov/climatechange/EPAactivities/economics/nonco2projections.html>
- USEPA. (2006). *Market opportunities for biogas recovery systems: A guide to identifying candidates for on-farm and centralized systems*. AgSTAR Program: USEPA, USDA, and DOE Energy and Pollution Prevention. EPA-430-8-06-004.
- USEPA. (2004). AgSTAR Handbook: A manual for developing biogas systems at commercial farms in the United States, 2nd ed. Roos, K.F., Martin, Jr., J.H., Moser, M.A. (Eds.). EPA 430-B-97-015.
- Valencia, R. (2008). Enhanced stabilization of municipal solid waste in bioreactor landfills. CSR Press/Balkema. ISBN 978-0-415-47831-1.
- Vallés., J. L. Flores., J. L. Lequerica y A. Madarro. (1980). *Producción de Metano por fermentación anaeróbica I. Descripción del proceso*. Rev. Agroquim. Tecnol. Aliment. 20(2). 189-208.
- Van den Berg, L. and Lentz, C. (1979). *Developments in the design and operation of anaerobic fermenters*, First Bioenergy R&D Seminar. National Research Council of Canada, Ottawa.
- Van Haandel, A., Kato, M.T., Cavalcanti, P.F.F. and Florencio, L. (2006) Anaerobic reactor design concepts for the treatment of domestic wastewater. Rev Environ Sci Biotechnol 5(1):21–38. doi:10.1007/s11157-005-4888-y.
- Varnero, M.T. (2011). *Manual de Biogás*. FAO 2011. ISBN 978-95-306892-0. Available at: http://www.fao.org/alc/file/media/pubs/2011/manual_biogas.pdf
- Vázquez Minguela, J. (1990). *Tratamiento anaerobio de aguas residuales agroindustriales: criterios de dimensionamiento y aplicación del biogás*. Curso Energías Renovables. UPM. Madrid.
- Velo, E. (2006). *Aprovechamiento energético de la biomasa*. En: Energía, participación y sostenibilidad. *Tecnología para el desarrollo humano*. Ed. E. Velo, J. Sneij, J. Delclòs, 131-144. Available at: <http://www.upc.edu/grecdh/cas/energia/publicacions.htm>
- Vesilind, P. A. (1998). *Wastewater treatment plant design* (4th ed.). London, UK and Alexandria, VA, USA: IWA Publishing and the Water Environment Federation.

- Visser, A., Hulshoff Pol, L.W. and Lettinga, G. (1996). *Competition of methanogenic and sulfidogenic bacteria*. Water Science and Technology. 33; 99-110.
- Volta, A. (1778). *Briefe über die natürlich entstehende, entzündbare Sumpfluft*. H.Steiner& Co., Winterthur 172 p.
- Walfer, M. (2008). Training material on anaerobic wastewater treatment. Ecosan Expert Training. Course, Version 3. Seecon gmbh, Switzerland.
- Waste Management Association of Australia (WMAA). (2008). *Bioreactor Landfill Technology*, 1-53.
- Water Environment Federation. (1996). *Operation of municipal water treatment plants*. Manual of practice Nº. 11. Volume III, Solids Processes, 5ª edition, Alexandria, VA, USA.
- Water Environment Federation and American Society of Civil Engineers. (1998). *Design of municipal wastewater treatment plants*, volume III, Solids Processing and disposal, 4ª edition, Alexandria, VA, USA.
- World Bank Group (1998). *Fruit and Vegetable Processing*. Pollution Prevention and Abatement Handbook. Disponível em: http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/b76bd080488552d8aca4fe6a6515bb18/fruitandvg_PPAH.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=b76bd080488552d8aca4fe6a6515bb18.
- Weiland, P. (2006). Biomass Digestion in Agriculture: A successful pathway for the energy production and waste treatment in Germany. Engineering in Life Sciences 6: 302-9.
- Werner, U., Stoehr, U., and Hees, N. (1989). *Biogas plants in animal husbandry*. A publication of the Deutsche Gesellschaft fuer Technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH.
- Widdel, F. (1988). *Microbiology and ecology of sulphate- and sulphur-reducing bacteria*. In Zehnder, A.J.B. (Ed.) Biology of anaerobic microorganisms, John Wiley & Sons, New York. Pp.469-585.
- Wilkie, A.C., Riedesel, K.J. and Owens, J.M. (2000). *Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks*. Biomass and Bioenergy, 19, 63-102.
- Williams, M. (2015). Gender and Climate Change Financing: Coming Out of the Margin. Ed. Routledge. ISBN1317440560, 9781317440567. Pp. 554.
- Williams, P.T. (2005). Waste treatment and disposal. Ed Jonh Wiley & Sons, Ltd.
- Willumsen, H. C. (2003). *Landfill gas plants: number and type worldwide*. Proceedings of the Sardinia'05. International Solid and Hazardous Waste Symposium. October 2005, published by CISA. University of Cagliari. Sardinia.
- Wong, M.H. and Cheung, Y.H. (1995). *Gas production and digestion efficiency of sewage sludge containing elevated toxic metals*. Bioresour.Technol. 54, 261–268.

- World Bank Group (1998). *Fruit and Vegetable Processing*. Pollution Prevention and Abatement Handbook. Disponível em: http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/b76bd080488552d8aca4fe6a6515bb18/fruitandvg_PPAH.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=b76bd080488552d8aca4fe6a6515bb18.
- WRAP (2013). *New Markets for Digestate from Anaerobic Digestion*. WRAP. ISS001-001, Date August 2011. Accessed on January 8, 2013. Available at: http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/New_Markets_for_AD_WRAP_format_Final_v2.c6779ccd.11341.pdf.
- Xiaohua, Wang, Jingfei and Li (2005). Influence of using household biogas digesters on household energy consumption in rural areas—a case study in Lianshui County in China. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 9, 229–236.
- Yazdani, R. Kieffer, J. and Akau, H. (2002). *Full scale bioreactor project at the Yolo county central landfill*. Final Technical Progress Report. Available at: <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/803846-rq5AMn/native/803846.pdf>
- Yazdani, R., Kieffer, J. and Sananikone, K. (2007). *Controlled Bioreactor Landfill. Program at the Yolo County Central Landfill*. Methane to Markets Partnership Expo. Beijing, China. https://www.globalmethane.org/expo-docs/china07/postexpo/landfill_yazdani.pdf
- Yazdani, R., Kieffer, J., Sananikone, K. and Augenstein, D. (2006). *Full scale bioreactor landfill for carbon sequestration and greenhouse emission control*. Final Technical Progress Report, 1-137.
- Yerkes, D.W., Boonyakitombut, S. and Speece, R.E. (1997). Antagonism of sodium toxicity by the compatible solute betaine in anaerobic methanogenic systems. *Water Sci. Technol.* 37 (6–7), 15–24.
- Young, J.C. and Dahab, M.F. (1983). *Effect of media design on the performance of fixed-bed anaerobic reactors*. *Water Sci Technol* 15(8–9):369–383
- Zeeman, G., Wiegant, W.M., Koster-Treffers, M.E. and Lettinga, G. (1985). The influence of the total ammonia concentration on the thermophilic digestion of cow manure. *Agric. Wastes* 14, 19–35.
- Zehnder, A. J., Ingvorsen, K., and Marti, T. (1982). *Microbiology of methane bacteria*. In: (D. E. Hughes et al., eds.) *Anerobic Digestion*, Elsevier Biomedical Press, Amsterdam, pp. 45-68.
- Zehnder, A.J.B. and Wuhrmann, X. (1977). *Physiology of a Methanobacterium strain*. *Arch. Microbiol.* 111, 199-205.
- Zehnder, A.J. (1978). *Ecology of methane formation*. In: *Water Pollution Microbiology*, II. John Wiley & Sons, Inc., New York, p.349.

Páginas Web

Associação *Methane to Markets*:

<http://www.methanetomarkets.org/>

Banco Asiático de Desenvolvimento, Iniciativa do mercado do carbono:

<http://www.adb.org/clean-energy/cmi.asp>

Banco Asiático de Desenvolvimento, programas sobre mudança climática:

<http://www.adb.org/documents/brochures/climate-change/default.asp>

Banco Asiático de Desenvolvimento, Programa de Energia Limpa e Meio Ambiente:

<http://www.adb.org/documents/clean-energy/ce-evolution.pdf>

Banco Mundial, avaliação ambiental:

<http://web.worldbank.org/wbsite/external/topics/environment/extenvass/0,,menupk:407994~pagepk:149018~pipk:149093~thesitepk:407988,00.html>

Directiva 1999/31/EC).

http://ec.europa.eu/environment/waste/landfill_index.htm

Diretrizes 2006 do IPCC para inventários nacionais de gases de efeito estufa, Volume 5 (Resíduos),

Seção 3: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol5.html>.

Diretrizes sobre aterros - Lista de consultas técnicas 2010:

[IDBDOCS-#35171997-IDBDOCS-#35168320-v1-](#)

[Landfill_Guidelines_list_of_technical_consultation_2010](#)

EPA, Modelo de emissões de biogás LandGEM, v. 3.02: <http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html>;

Especificações Técnicas para o Desenho e Construção de Biodigestores no México

<http://www.ance.org.mx/FIRCO/Documentos/EspecificacionesBiodigestores.pdf>

Estatísticas SIDS

<http://unohrlls.org/custom-content/uploads/2013/09/Small-Island-Developing-States-Factsheet-2013-.pdf>

Grupo do Banco Mundial: Marco estratégico sobre desenvolvimento e mudança climática, 12 de outubro de 2008, na página virtual sobre mudança climática:

<http://beta.worldbank.org>

IFC, Guias sobre meio ambiente, saúde e segurança para as plantas de manejo de resíduos, 10 de dezembro de 2007:

[http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/AttachmentsByTitle/gui_EHSGuidelines2007_WasteManagement_Spanish/\\$FILE/0000199659ESes+Waste+Management+Facilities+rev+cc.pdf](http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/AttachmentsByTitle/gui_EHSGuidelines2007_WasteManagement_Spanish/$FILE/0000199659ESes+Waste+Management+Facilities+rev+cc.pdf)

Informação essencial no espaço virtual do Banco Mundial:

<http://web.worldbank.org/wbsite/external/topics/extsdnet/0,,pagepk:64885161~contentmdk:22339544~pipk:5929285~thesitepk:5929282,00.html>

Informação sobre a lei de proteção da qualidade do ar:

<http://www.epa.gov/air/caa/index.html>

<http://www.epa.gov/lmop/international/tools.html>

Informação geral sobre produtos CATC (Clean Air Technology Center)

<http://www.epa.gov/ttn/catc/products.html>

Lei de proteção da qualidade do ar dos Estados Unidos:

<http://epw.senate.gov/envlaws/cleanair.pdf>

Mudança Climática

<http://beta.worldbank.org>

Observatório para a gestão dos resíduos urbanos:

http://www.ambiente.gob.ar/observatorios/informacion_geral/em_argentina.html

Programa de Aproveitamento do Metano dos Aterros – Modelos internacionais de biogás:

<http://www.epa.gov/lmop/international/tools.html>;

Programa de Aproveitamento do Metano dos Aterros. Modelo de emissões de biogás da América Central. Disponível em: <http://www.epa.gov/lmop/international/centroamericano.html>

Programa de Aproveitamento do Metano dos Aterros. Modelo de emissões de biogás do Equador. Disponível em: <http://www.epa.gov/lmop/international/ecuador.html>

Programa de Aproveitamento do Metano dos Aterros. Modelo de emissões de biogás da Colômbia. Disponível em: <http://www.epa.gov/lmop/international/colombia.html>

Programa de Aproveitamento do Metano dos Aterros. Modelo de emissões de biogás do México. Disponível em: <http://www.epa.gov/lmop/international/mexicano.html>

União Europeia, Diretiva relativa ao depósito de resíduos:

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:1999:182:0001:0019:É:PDF>

Em Revista PROACTIVA

http://www.proactiva.é/é/pt/images/stories/Proactiva/Mundo%20Proactiva/mundo_proactiva_n0.pdf Luis Roig. Diretor Adjunto de Resíduos

Alexandre Guyón. Coordenador de Projetos MDL

Em Energias Renováveis, 2013 <http://www.energias-renováveis.com/articulo/o-biogas-do-maior-aterro-de-mexico-20121210> e <http://www.finanzas.com/noticias/empresas/20121101/empresas-espanolas-gestionaran-gran-1600007.html>

Biogás de aterros sanitários para produzir eletricidade

<http://www.iie.org.mx/boletin042003/apli.pdf>

Carbon market program

<http://www.adb.org/documents/brochures/climate-change/default.asp>

Gestão de Resíduos Sólidos na América latina e projetos MDL

<http://reinnova.é/2011/pdf/05.02%20Francisco%20de%20la%20Torre.pdf>

Avaliação do manejo de resíduos sólidos urbanos na América Latina

<http://www6.iadb.org/Resíduos/informacion/InfoPais.bid>

Tratamento de resíduos

<http://www.universidadeur.edu.uy/retema/archivos/ResíduosLiliana.pdf>

Funcionamento de uma planta de biogás

<http://www.eren.jcyl.é/web/jcyl/binarios/778/246/Bloque%20II%20Plantas%20de%20biogas%20Veronica%20Ma%C3%B1anes%20DALDUR.pdf?blobheader=application%2Fpdf%3Bcharset%3DUTF-8&blobheadername1=Cache-Controle&blobheadername2=Expires&blobheadername3=Site&blobhead>

Avaliação de uma ETAP

<http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10383/3/Annex.pdf>

Real Decreto 1481/2001 sobre eliminação de resíduos em aterro

<http://www.boe.é/boe/dias/2002/01/29/pdfs/A03507-03521.pdf>

Legislação europeia

<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31999L0031:é:NOT>

Observatório nacional para a gestão de RSU

http://www.ambiente.gob.ar/observatoriorsu/informacion_geral/em_argentina.html

Inventario de plantas de tratamento de águas residuais municipais na ALC

http://cefimslp.gob.mx/9foro/P09/B/Ponencia_A.Noyola_SLP%2027-septiembre-2012.pdf

Índice de Figuras

Figura 1: SIDS com o maior crescimento populacional anual (1990-2010).....	8
Figura 2: Viagens e turismo em SIDS: contribuição total e direta ao PIB	9
Figura 3: Tipos de sólidos	13
Figura 4: Distribuição por número e por país das diversas tecnologias de tratamento para águas residuais municipais	29
Figura 5: Esquema das reações da digestão anaeróbica	37
Figura 6: Aplicações e produtos do processo de digestão anaeróbica.....	39
Figura 7: Potencial máximo de biogás de resíduos da indústria agroalimentar	42
Figura 8: Efeito da temperatura na atividade anaeróbica (Van Lier, 1993).....	47
Figura 9: Digestores de pequena escala instalados no mundo.....	64
Figura 10: Digestor anaeróbico de cúpula fixa	66
Figura 11: Digestor anaeróbico de tambor flutuante	67
Figura 12: Digestor anaeróbico tubular de polietileno	68
Figura 13: Classificação das tecnologias dos digestores anaeróbicos	81
Figura 14: Esquema de um digestor de Mescla Completa	82
Figura 15: Esquema de um digestor de Fluxo Pistão	83
Figura 16: Esquema de um digestor de Contato.....	84
Figura 17: Esquema de um digestor UASB ou Leito de lodos	85
Figura 18: Esquema de um digestor de Filtro Não Orientado	87
Figura 19: Esquema de um digestor de Camada Fixa	88
Figura 20: Esquema de um digestor de Leito Expandido	89
Figura 21: Esquema de um digestor de Leito Fluidizado	90
Figura 22: Esquema de um digestor de EGSB.....	91
Figura 23: Esquema de um digestor IC	92
Figura 24: Esquema de um digestor de Duas Fases	93
Figura 25: Distribuição dos digestores existentes no mundo.....	94
Figura 26: Evolução das plantas de biogás na Alemanha.....	95
Figura 27: Esquema do Digestor anaeróbico de Brugal em RD	97
Figura 28: Processo de formação de gases em um aterro.....	105
Figura 29: Poço com cabeça arqueada	108
Figura 30: Sistema de extração global de biogás em um aterro sanitário.....	109
Figura 31: Produção de metano em um aterro biorreator e um aterro convencional	115
Figura 32: Emissões mundiais de metano de aterros (2005).....	116
Figura 33: Metano acumulado na célula melhorada e na célula controle. Experiência piloto.	118
Figura 34: Metano acumulado nas células controle e biorreator. Projeto de demonstração	119
Figura 35: Ajuste produzido na célula controle e nas células anaeróbicas biorreatores.....	120
Figura 36: Composição do Biogás.....	123
Figura 37: Equivalências do biogás com outros combustíveis.....	124
Figura 38: Aplicações atuais do biogás de maior interesse e grau de refinamento necessário	125
Figura 39: Tratamento necessário ao biogás em função de sua utilização.....	130

Índice de Ilustrações

Ilustração 1: Digestor de cúpula fixa	66
Ilustração 2: Digestor tambor flutuante	67
Ilustração 3: Digestor tubular	68
Ilustração 4: Alguns suportes fixos utilizados.	86
Ilustração 5: Suporte fixo utilizado em digestores espanhóis.	87
Ilustração 6: Suporte móvel utilizado em digestores espanhóis.	89
Ilustração 7: Digestores da planta de tratamento de vinhaças de Rum Brugal	97
Ilustração 8: Planta de Biogás realizada no PROBIOGÁS	100
Ilustração 9: Tubos perfurados	107
Ilustração 10: Cabeça de poço de extração externa	107
Ilustração 11: Linhas de condução do biogás	108
Ilustração 12: Tocha instalada em aterro	108
Ilustração 13: Estação de regulação e medida	109
Ilustração 14: Estado das células controle e biorreator depois de anos de investigação	118

Índice de Tabelas

Tabela 1: SIDS que compõem as regiões do Caribe, Pacífico e AIMS.....	7
Tabela 2: Resíduos produzidos por distintas espécies animais (excrementos frescos).....	16
Tabela 3: Composição química de diversos resíduos de origem animal (valores médios sobre base seca)	17
Tabela 4: Porcentagem de sólidos totais e voláteis para distintas espécies pecuárias	17
Tabela 5: Características de resíduos pecuários em função da produção	17
Tabela 6: Os 5 principais parceiros comerciais dos SIDS	20
Tabela 7: População economicamente ativa na agricultura e porcentagem em relação ao total na região do Caribe.....	21
Tabela 8: População economicamente ativa na agricultura e porcentagem em relação ao total na região AIMS	21
Tabela 9: População economicamente ativa na agricultura e porcentagem em relação ao total na região do Pacífico.....	22
Tabela 10: Populações de SIDS da Região do Caribe	23
Tabela 11: Populações dos SIDS da Região do Pacífico.....	24
Tabela 12: Populações dos SIDS da Região AIMS.	24
Tabela 13: Taxa de geração de RSU per capita nos SIDS.....	25
Tabela 14: Composição média dos RSU nos SIDS	26
Tabela 15: Origem e biodegradabilidade dos principais componentes dos resíduos orgânicos	35
Tabela 16: Produção potencial de biogás a partir de distintos resíduos.....	41
Tabela 17: Produção de biogás a partir de distintos resíduos agroindustriais	41
Tabela 18: Produção potencial de biogás de distintos resíduos pecuários em função do conteúdo em SV do resíduo e algumas características destes resíduos	42
Tabela 19: Produção potencial de vários tipos de resíduos	43
Tabela 20: Características de um digestor tipo.	43
Tabela 21: Potencial Redox e Digestão.....	46
Tabela 22: Relação C/N para diferentes substratos	48
Tabela 23: Efeito da concentração de nitrogênio amoniacal em digestores anaeróbicos.....	49
Tabela 24: Concentrações estimulantes e inibidoras de cátions	49
Tabela 25: Inibidores mais comuns no processo microbiológico da digestão	50
Tabela 26: Valores de TRH para diferentes resíduos animais	51
Tabela 27: Gamas de Temperaturas e de Tempos de retenção na fermentação anaeróbica	51
Tabela 28: Requisitos das fases hidrólise/acidificação e metanogênese	53
Tabela 29: Parâmetros de operação da Digestão Anaeróbica.....	54
Tabela 30: Número de digestores construídos na Ásia e na África através de HIVOS e/ou SNV até 2013.....	65
Tabela 31: Produção de Esterco fresco diário por tipo de animal	69
Tabela 32: TRH em função da temperatura ambiente.....	69
Tabela 33: Relações entre o diâmetro e a longitude	70
Tabela 34: Materiais necessários para a construção de um digestor anaeróbico tubular	71
Tabela 35: Dimensões para a vala	71
Tabela 36: Parâmetros de funcionamento recomendados para aplicações no mundo em desenvolvimento rural.....	75
Tabela 37: Parâmetros característicos das tecnologias de digestão anaeróbica	93

Tabela 38: Comportamento das tecnologias de digestão anaeróbica	94
Tabela 39: Composição média da vinhaça	96
Tabela 40: Parâmetros ideais de operação do processo	98
Tabela 41: Composição do biogás da planta de digestão anaeróbica de rum Brugal	98
Tabela 42: Custos de investimento de uma planta de biogás de aterro sanitário	110
Tabela 43: Custos anuais de operação e manutenção para diferentes sistemas de biogás de aterro sanitário	111
Tabela 44: Composição do biogás em função do substrato utilizado	122
Tabela 45: Consumo de biogás e rendimento de aparelhos utilizados em países em desenvolvimento	125

Acrônimos

A

ABPP= Africa Biogas Partnership Program

AD= Anaerobic digestion.

ADEME = Environment Agency and Energy Management (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

AEBIG = Asociación Española del Biogás (Associação Espanhola de Biogás).

AEE = Agencia Extremeña de la Energía (Associação de Extremadura da Energia)

AEMA = European Environment Agency (Agencia Europea del Medio Ambiente)

AGV = Ácidos grasos volátiles.

AIDIS = Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (Associação Interamericana de Engenharia Sanitária e Ambiental).

AIMS = Africa, Indian Ocean, Mediterranean and South China Sea (África, Oceano Índico, Mediterrâneo e Mar do Sul da China).

ALC = América Latina y el Caribe (América Latina e Caribe).

APEI = Aliança dos Pequenos Estados Insulares

APHA = American Public Health Association (Associação Americana de Saúde Pública).

ASAE = American Society of Agricultural Engineers (Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas).

ASTM = American Society for Testing and Materials (Sociedade Americana de Testes e Materiais).

AWWA = American Water Works Association (Associação Americana criada para melhorar o abastecimento e a qualidade de água).

B

BID = Inter-American Development Bank (Banco Interamericano de Desenvolvimento).

BMP = Biochemical Methane Potential (Potencial Bioquímico de Metano).

BOD = Biochemical Oxygen Demand (Demanda biológica de oxigênio).

BOD₅ = 5-day Biochemical Oxygen Demand. The standard oxidation (or incubation) test period for BOD is 5 days at 20 degrees Celsius (°C). Demanda biológica de oxigênio - 5 dias (O período de teste padrão de oxidação (ou incubação) para BOD é de 5 dias a 20 graus Celsius (° C))

BTU = British thermal unit (a standard unit measure of energy) (medida padrão de energia).

C

CAA = Clean Air Act.

CARICOM = Comunidade do Caribe (Caribbean Community)

CDM = Clean Development Mechanism.

CEDECAP = Centro de Demostración y Capacitación en Tecnologías Apropriadas (Centro de Demonstração e Treinamento em Tecnologias Apropriadas)

CEPAL = Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe).

CERs = Certified Reduction Emissions (Certificados de Redução de Emissões ou Obrigações de Carbono autenticados pela ONU).

CHP = Combined heat and power (Planta combinada de calor e energia).

CIPAV = Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria (Centro de Pesquisa em Sistemas Sustentáveis de Produção Agrícola).

CMNUCC = Convenio Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima).

C/N = Relação carbono / nitrogênio.

COD = Chemical oxygen demand (Demanda química de oxigênio).

COV's = Compostos Orgânicos Voláteis

CSTR = Continuous stirred-tank reactor (Digestor completamente misturado).

D

DA = Digestão anaeróbica.

DBO₅ = Demanda biológica de oxigênio. O período padrão de teste de oxidação (ou incubação) para BOD é de 5 dias a 20 graus Celsius (° C).

BOD = DBO₅.

DQO = Demanda química de oxigênio.

DQO_s = demanda química por oxigênio solúvel.

DQO_t = demanda química por oxigênio total.

E

EGBS = Leito de Lodo Granular Expandido (Expanded Granular Sludge Bed)

EPA = Agência de Proteção Ambiental (Environmental Protection Agency of the U.S. federal government (USEPA)).

EPA = Environmental Protection Agency of the U.S. federal government (USEPA). Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos

EPER = European Pollutant Emission Register (Registo Europeu de Emissões de Substâncias Poluentes).

EWB = Engineers without borders (Engenheiros sem fronteiras).

F

FAO = Food and Agriculture Organization (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura).

FMAM = Fundo para o Meio Ambiente Global.

FORSU = Fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.

FSM = Federated States of Micronesia (Estados Federados da Micronésia).

FvB = Fachverband biogás (Associação Alemã de Biogás).

G

GEE = Gases com Efeito de Estufa.

GEF = Global Fund for the Environment (Fundo Global para o Meio Ambiente).

GTZ = Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (Organização Alemã de Cooperação Técnica).

GWP = Global-warming potential (Potencial aquecimento global).

H

HDI = Human development index (Índice de Desenvolvimento Humano).

HDPE = High density polyethylene (polietileno de alta densidade).

HLB = Huanglongbing (palavra de origem chinesa que significa greening de frutas cítricas, é uma doença bacteriana grave que afeta frutas cítricas).

HRT = Hydraulic retention time (Tempo de residência hidráulico).

I

IC = Internal Circulation (Circulação interna).

IDAE = Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (Instituto para a diversificação e economia de energia).

IDB = Inter-American Development Bank (Banco Interamericano de Desenvolvimento).

IFPRI = International Food Policy Research Institute (Instituto Internacional de Pesquisa em Políticas Alimentares).

IICA = Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura).

ILRI = International Livestock Research Institute (Instituto Internacional de Pesquisa Pecuária.).

INIA = National Institute of Agricultural Innovation Cajamarca – Peru (Instituto Nacional de Innovación Agraria de Cajamarca – Perú).

IOC = Indian Ocean Commission (Comissão do Oceano Índico).

IPCC= Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental de Especialistas em Mudança Climática).

ISF = Ingenieros sin fronteras (Engenheiros sem fronteiras).

ISIS = Institute of Science in Society (Instituto de Ciência na Sociedade).

ISWA = International Solid Waste Association (Associação de Limpeza Pública e Resíduos Urbanos).

ITDG = Instituto Técnico Diversificado Grajales – Colombia. (Instituto Técnico Diversificado Grajales-Colômbia).

ITRC = Interstate Technology & Regulatory Council (Conselho Interestadual de Regulamentação e Tecnologia).

L

LAC = Latin America and the Caribbean (América Latina e Caribe).

LFG = Landfill Gas (Biogás de aterro).

M

MDL = Mecanismo de Desarrollo Limpio (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.).

MS = Mineral solids.

MSW = Municipal solid waste (Resíduos sólidos urbanos).

N

NMOCS = Non-methane organic compounds (Compostos orgânicos que não incluem metano).

NREL = National Renewable Energy Laboratory (Laboratório Nacional de Energias Renováveis).

O

ODS = Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OFMSW = Organic fraction of municipal solid waste.

OLR = Organic loading rate (Taxa de carregamento orgânico).

ONGD = Organizações Não Governamentais para o Desenvolvimento.

ONU = Organização das Nações Unidas.

OPS = Organização Pan-Americana da Saúde).

P

PAM = Programa de Ação Mundial para a Proteção do Meio Marinho de Atividades Terrestres.
PCI = Poder calorífico inferior.
PEAD = Polietileno de alta densidade
PEID = Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento.
PIF = Pacific Islands Forum (Fórum das Ilhas do Pacífico)
PNG = Papua Nova Guiné
PNUD = Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento.
PTAR = Plantas de tratamento de águas residuais (Estações de tratamento de águas residuais).
PVC = Polyvinyl chloride (Cloreto de polivinila).

R

RCE = Reduções Certificadas de Emissão.
RSM = Resíduo sólido municipal.
RSU = Resíduos Sólidos Urbanos
Resíduo sólido doméstico

S

SEN= Sistemas Estatísticos Nacionais.
SNS = Samenwerkende Nederlandse Spaarbanken (Bancos de poupança holandeses quem cooperam).
SPREP = Secretariado do Programa Regional do Meio Ambiente do Pacífico .
SRT = Solids retention time (Tempo de retenção de sólidos).
SRTlim min = Solids residence time minimum (Tempo mínimo de retenção de sólidos).
SS = Sólidos em suspensão.
SSV = Sólidos suspensos voláteis.
SSM = Sólidos suspensos minerais.
ST = Sólidos totais.
SV = Sólidos voláteis.
STP = Standard Temperature and Pressure (Temperatura e pressão padrão).

T

TOC = Total organic carbon (Carbono Orgânico Total).
TPC = Technology Performance Certificate (Certificado de desempenho tecnológico)

U

UASB = Upflow anaerobic sludge blanket (Leito de lodo de fluxo ascendente).
UN = United Nations (Nações Unidas).
UNDP = United Nations Development Programme (Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento).
UNEP= United Nations Environment Programm (Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente).
UPC = Polytechnic University of Catalonia (Universidad Politécnica de Cataluña).
USA = United States of America (Estados Unidos da América).
USAID = United States Agency for International Development (Agência dos Estados Unidos para o Desenvolvimento Internacional).

USEPA = United States Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos).

UV = Ultravioleta.

V

VCO = Velocidade de carregamento orgânica

VFA = Volatile fatty acids (Ácidos graxos voláteis).

VOC's = Volatile organic compounds (Compostos orgânicos voláteis).

VS = Volatile solids (Sólidos voláteis).

VSS = Volatile suspended solids (Sólidos suspensos voláteis).

W

WAS = waste activated sludge.

WBG = World Bank Group (Grupo do Banco Mundial).

WARR= Waste Avoidance and Resource Recovery (Prevenção de resíduos e recuperação de recursos).

WARR ACT 2001 No 58= Lei para promover a eliminação de resíduos e a recuperação de recursos.

Símbolos e Abreviaturas

a = ano
aprox. = aproximadamente
Btu = Unidade de energia inglesa equivalente a 1055 joules (British Thermal Unit).
°C = graus Celsius
cal = calorias
d = dia
D = diâmetro
°F = graus Fahrenheit
ft³ = pés cúbicos (cubic foot)
ΔG⁰ = energia livre de Gibbs padrão
(g) = gás
g = grama
H = altura
hab. = habitante
% = porcentagem
J = joule
kg = quilograma
kcal. = quilocalorias
kg SV = quilogramas de sólidos voláteis
kPa = quilopascal
L ou l = litro
lb = libra
log = logaritmo na base 10
m = metro
Máx = máximo
mbar = milibar
mg = miligrama
MJ = mega joule
m.s.n.m. = metros sobre o nível do mar
μg = microgramas
μm = micra; micrometro
N = newton
n.d. = não determinado
Q = vazão (m³/d)
ρ = densidade (kg/m³)
P = pressão
Pa = Pascals
Pci = poder calorífico inferior
ppm = partes por milhão
s = segundo
US\$ = dólares dos Estados Unidos (United States)
T = temperatura
temp. = temperatura
V = volume

Fórmulas e símbolos químicos

C = carbono
CO₃²⁻ = íons carbonato
CO₂ = dióxido de carbono
CH₄ = metano

CH_3OH = metanol
 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ = etanol
 CH_3COOH = ácido acético
 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COOH}$ = ácido propiônico
 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ = ácido butírico
 $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ = glicose
 N = nitrogênio
 NH_3 = amoníaco
 P = fósforo
 S = enxofre
 Zn = zinco
 Pb = chumbo
 H_2 = hidrogênio gás
 O_2 = oxigênio
 H_2O = água
 H_2S = sulfureto de hidrogênio
 K_2O = óxido de potássio
 P_2O_5 = pentaóxido de fósforo
 SO_2 = dióxido de enxofre
 CaCO_3 = carbonato cálcico
 NaCO_3 = carbonato sódico

Autor: Carreras, N.