



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS - CECA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA DA BIOMASSA



JÉSSICA FRANCYNE FRIAS

**PROPOSTA DE UM BIODIGESTOR PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR
DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO – CAMPUS
A.C. SIMÕES**

Rio Largo,

2016

JÉSSICA FRANCYNE FRIAS

**PROPOSTA DE UM BIODIGESTOR PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR
DOS RESÍDUOS ORGÂNICOS DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO – CAMPUS
A.C. SIMÕES**

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Energia da Biomassa
da Universidade Federal de Alagoas,
como requisito parcial para a
obtenção do grau de Mestra em
Energia da Biomassa.

Orientador: Eduardo Lucena
Cavalcante Amorim

Rio Largo,

2016

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas

1. Biblioteca Central

2. Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário Responsável: Valter dos Santos Andrade

F897p

Frias, Jéssica Francyne.

Proposta de um biodigestor para geração de energia a partir dos resíduos orgânicos do Restaurante Universitário – Campus A. C. Simões / Jéssica Francyne Frias. – 2016. 64 f. : il.

Orientador: Eduardo Lucena Cavalcante Amorim.

Dissertação (Mestrado Profissional em Energia da Biomassa) – Universidade Federal de Alagoas. Programa de Pós-Graduação em Energia da Biomassa. Centro de Ciências Agrárias. Rio Largo, 2016.

Bibliografia: f. 60-64.

1. Resíduos orgânicos. 2. Metano. 3. Digestão anaeróbia. 4. Geração de eletricidade. 5. Biogás. I. Título.

CDU: 620.92

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por permitir mais esta realização e me dar forças para seguir em frente;

A meus pais, por proporcionarem toda a estrutura necessária para a minha caminhada até aqui;

A minha equipe de trabalho: Kamila Aderne e Isabela Lima, sem as quais não teria conseguido superar os inúmeros obstáculos deste trabalho;

Ao meu orientador, Eduardo Lucena, que foi luz quando acreditávamos que nada iria dar certo;

Ao Estúdio Aurora – Maquete e renderização, em nome de sua arquiteta, Eva Suellen, pela representação do projeto técnico;

Ao pessoal dos laboratórios: Ronaldson, Williane, Norma, Nadjane, Gabryel, Stephanie, Vinícius e Antônio, por toda ajuda e paciência;

Ao pessoal do RU: Tanyara, Milena, Amanda, sr. Luis, sr. André e sr. Henrique, pela presteza em fornecer as informações necessárias e pela força (literalmente) na pesagem das amostras;

Aos meus colegas de curso, em especial: Norma, Samy, Eduardo, Ana Maria e Analice, pelo companheirismo e apoio durante toda a jornada;

Ao meu namorado Jorge e as minhas amigas: Rozália, Swlamita, Cindy, Sheille, Fabrícia, Gesika, Larissa e Tuanne, por manter a minha sanidade em meio a todos os percalços;

A todos que contribuíram direta e indiretamente para este trabalho, o meu muitíssimo obrigada!

*“O período de maior ganho
em conhecimento e experiência
é o período mais difícil da vida de alguém.”*

Dalai Lama

RESUMO

Visando reduzir os custos com energia elétrica na Universidade Federal de Alagoas, bem como melhorar sua gestão de resíduos, este trabalho propõe uma configuração de biodigestor para tratamento dos resíduos orgânicos do restaurante universitário e a transformação do biogás gerado em energia. A redução do consumo de eletricidade proveniente do sistema de abastecimento, a qual se origina predominantemente em hidrelétricas, tende a reduzir a necessidade de construção de imensos reservatórios, os quais causam impactos em todo o ecossistema aquático, além das linhas de transmissão que percorrem grandes extensões. Além disto, a melhor gestão dos resíduos orgânicos evita que estes tenham destinação inadequada, causando danos ao meio ambiente, como poluição, proliferação de patógenos e emissão de gases de efeito estufa. Para este propósito, foi realizado levantamento da quantidade de resíduos gerados, além das tecnologias de biodigestão adequadas para este tipo de resíduo, concluindo-se que o modelo mais indicado é o reator de fluxo contínuo com agitação (Continuous Flow Stirred Tank Reactor – CSTR). Como este tipo de reator é amplamente utilizado na engenharia química, utilizaram-se métodos de dimensionamento advindos desta área de conhecimento. Para a estimativa de conversão em eletricidade, utilizou-se o teor de metano e sua taxa de conversão, encontrada na literatura. Analisando os valores da fatura de eletricidade da universidade e a estimativa de investimento inicial, conclui-se que a proposta apresenta um potencial de geração de eletricidade de aproximadamente 700kWh, a qual, em análise inicial, viabiliza sua implantação.

Palavras-chave: Resíduos orgânicos urbanos. Metano. Digestão anaeróbia. Geração de eletricidade.

ABSTRACT

Aiming at reducing electricity costs at the Federal University of Alagoas, as well as improving its waste management, this work proposes an anaerobic reactor configuration for the treatment of organic waste from the University's Restaurant and the transformation of the biogas generated in energy. Reducing the consumption of electricity from the national net, which originates predominantly in hydroelectric dams, tends to reduce the need to build huge reservoirs, which impact the entire aquatic ecosystem, as well as transmission lines that run large stretches. In addition, better management of organic waste prevents them from being disposed of inappropriately, causing damage to the environment, such as pollution, proliferation of pathogens and emission of greenhouse gases. For this purpose, it was carried out a survey of the amount of waste generated, in addition to the biodigestion technologies suitable for this type of residue. It was concluded that the most indicated model is the Continuous Flow Stirred Tank Reactor (CSTR). As this type of reactor is widely used in chemical engineering, sizing methods from this area of knowledge have been used. For the estimation of conversion in electricity, the methane content and its conversion rate, found in the literature, were used. Analyzing the values of the university's electricity bill and the initial investment estimate, it is concluded that the proposal has an electricity generation potential of approximately 700kWh, which, in an initial analysis, enables its implementation.

Key words: Urban organic waste. Methane. Anaerobic digestion. Electricity generation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama dos processos de conversão energética da biomassa	5
Figura 2 - Fluxograma da digestão anaeróbia	11
Figura 3 - Principais reatores anaeróbios de biomassa em suspensão.....	14
Figura 4 - Principais reatores anaeróbios de biomassa fixa	15
Figura 5 - Representação do Sistema Dranco	22
Figura 6 - Sistema Axpo Kompogas	24
Figura 7 - Representação do Sistema Valorga.....	26
Figura 8 - Representação do Reator Laran.....	27
Figura 9 - Representação do Sistema de Garagem	28
Figura 10 - Reator CSTR versão avançada	32
Figura 11 - Armazenamento de resíduos	35
Figura 12 - Armazenamento de resíduos	35
Figura 13 – Descongelamento e preparação do substrato para trituração	36
Figura 14 - Trituração do substrato.....	37
Figura 15 - Representação esquemática do sistema de biodigestão.....	39
Figura 16 - Representação esquemática com dimensões.....	43
Figura 17 - Representação tridimensional do sistema.....	44
Figura 18 - Local proposto para o sistema de biodigestão	45
Figura 19 - Biodigestor	47
Figura 20 - Tanque de armazenamento do digerido.....	47
Figura 21 - Tanque de longa duração do digerido	47
Figura 22 - Gasômetro.....	47
Figura 23 - Motor de conversão.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSTR: Reator de fluxo contínuo com agitação (Continuous Flow Stirred Tank Reactor)

DBO₅: Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO: Demanda Química de Oxigênio

ETA: Estação de tratamento de água

ETE: Estação de tratamento de esgoto

FORSU: Fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos

RALF: Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado

RSU: Resíduos sólidos urbanos

RU: Restaurante Universitário

ST: Sólidos totais

UASB: Reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	DETERMINAÇÃO DE OBJETIVOS	3
3.	REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1.	BIOMASSA	4
3.2.	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	6
3.3.	BIODIGESTÃO ANAERÓBIA	7
3.4.	INÓCULOS.....	12
3.5.	TIPOS DE BIODIGESTORES	13
3.6.	PRODUÇÃO DE METANO NO BIODIGESTOR	16
3.7.	USO DE REATORES ANAERÓBIOS NO BRASIL.....	16
3.8.	USO DE REATORES ANAERÓBIOS NO TRATAMENTO DE RSU	19
3.8.1.	Dranco	20
3.8.2.	Axpo Kompogas.....	22
3.8.3.	Valorga	24
3.8.4.	Sistema de garagem (Túneis de Metanização)	27
3.9.	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
4.	METODOLOGIA.....	34
4.1.	CARACTERIZAÇÃO E MEDIÇÃO DO SUBSTRATO.....	34
4.2.	DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR	38
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES:.....	41
5.1.	MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS.....	41
5.2.	ESCOLHA E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO	42
5.4.	PROPOSTAS DE UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO.....	45
5.5.	ESTIMATIVA DE CUSTOS.....	46
5.5.	VIABILIDADE	49
6.	CONCLUSÕES.....	50

3. INTRODUÇÃO

A demanda por eletricidade nos centros urbanos tem aumentado significativamente a cada dia. Da mesma forma, amplia-se a consciência da necessidade da sustentabilidade, utilizando fontes de energia não poluentes. Por outro lado, cresce também a geração de resíduos nas cidades, demandando alternativas adequadas para sua gestão.

A fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) pode ser utilizada para geração de energia, apresentando-se como uma possível solução para estas questões. Através da digestão anaeróbia, os resíduos orgânicos são convertidos em biogás, que pode ser utilizado para combustão ou geração de energia, e material orgânico rico em nutrientes, que pode servir de adubo orgânico.

Atentos a esta oportunidade, LEITE, et al (2009) avaliaram a eficácia do tratamento anaeróbio de resíduos sólidos orgânicos oriundos de feiras livres e centrais de abastecimento, concluindo que os sólidos voláteis foram reduzidos em 85%, com uma média de produção de biogás de $0,25 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ DQO}_{\text{alimentada}}$. Já LIBÂNIO (2002) avaliou a viabilidade do tratamento integrado de RSU e chorume em um reator anaeróbio, obtendo um valor de produção de gás de $0,15 \text{ L de CH}_4 / \text{g DQO}_{\text{remov}}$, enfatizando a eficácia na redução da DQO. BARCELOS (2009) analisou a eficácia de diferentes inóculos no tratamento de RSU, obtendo resultados entre 25% e 58% na degradação de SV, com produção de 117L a 144L de biogás.

Nota-se nestas pesquisas uma predominância de estudos sobre a viabilidade do tratamento e o potencial de geração de biogás, concordando com o que afirma a Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, em sua série de livros publicada em 2015 com a temática do biogás. Nesta, são enfatizadas as boas experiências nacionais da aplicação de tecnologias anaeróbias no tratamento de esgoto doméstico, dos resíduos da indústria e da agropecuária, mesmo que sem o aproveitamento de biogás gerado. O estudo chama também atenção para o setor de resíduos sólidos, que ainda tem muito potencial para ser desenvolvido, enfatizando que o aproveitamento da energia gerada, bem como do substrato digerido, pode contribuir para valorizar o investimento nas tecnologias de tratamento.

Nesta temática, LEITE, et al (2003) pesquisou sobre o aproveitamento do biogás da digestão dos RSU, utilizando para tal um reator anaeróbio compartimentado, obtendo uma

geração de $0,35 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \cdot \text{kg}^{-1} \text{ DQO}_{\text{aplicada}}$, avaliando também as dificuldades da aplicação de tecnologias de tratamento de efluentes líquidos para resíduos sólidos. Nesta linha, diversas pesquisas têm sido realizadas em universidades para o tratamento de resíduos de restaurantes universitários, com ênfase para os estados de Santa Catarina e Pará, que possuem vasta experiência nessa área.

Assim, após comprovar o potencial de geração de biogás dos RSU, verificar a existência de tecnologias adequadas para este tipo de resíduo e os diversos motivos que levam a sua não difusão (SNSA b, 2015), além da carência do aproveitamento energético dos gases gerados, este trabalho visa contribuir com a difusão da tecnologia de digestão anaeróbia específica para os resíduos orgânicos urbanos em escala real. Para isto, propõe a utilização de biodigestores para o tratamento dos resíduos orgânicos do Restaurante Universitário do Campus A. C. Simões, da Universidade Federal de Alagoas.

4. DETERMINAÇÃO DE OBJETIVOS

Objetivo geral:

Propor uma configuração de biodigestor adequada para produção de biogás a partir da fração orgânica dos resíduos sólidos do Restaurante Universitário do campus A. C. Simões.

Objetivos específicos:

- Mensurar a produção de resíduos orgânicos no restaurante universitário;
- Caracterizar estes resíduos;
- Propor um sistema de tratamento com armazenamento e aproveitamento do biogás;
- Dimensionar o sistema proposto;
- Estimar a área a ser utilizada pelo sistema;
- Propor um local adequado para instalação do sistema no campus A. C. Simões;
- Estimar custos (investimento inicial) e viabilidade da implantação do sistema de tratamento, considerando como possibilidades de aproveitamento do biogás a combustão direta ou a geração de eletricidade.

5. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. BIOMASSA

A biomassa é a fonte mais básica de obtenção de energia para as atividades dos seres humanos. Em suas diversas formas, está presente em todas as partes do planeta, sendo utilizada desde a combustão direta da madeira, uma tecnologia primitiva, até o reaproveitamento de gases tóxicos residuais de outros processos e sua transformação em combustível líquido, num processo denominado liquefação (ANEEL, 2005).

De acordo com a ANEEL (2005, p. 77): Do ponto de vista energético, biomassa é todo recurso renovável oriundo de matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia, seja ela mecânica, térmica ou elétrica. O Atlas de Energia Elétrica do Brasil, elaborado pela ANEEL em 2005, apresenta ainda como fontes de biomassa os vegetais lenhosos e não lenhosos; os resíduos orgânicos agrícolas, industriais e urbanos; e os biofluidos, representados pelos óleos vegetais.

Existem diversas tecnologias para a conversão de biomassa em energia e o uso de cada uma delas varia conforme a fonte utilizada. Citando as principais, temos a combustão direta, os processos termoquímicos, representados por: gaseificação¹, pirólise², liquefação³ e transesterificação⁴; e os processos biológicos, como a digestão anaeróbia e a fermentação (ANEEL, 2005, p. 87).

As tecnologias para cada fonte são apresentadas na figura 1:

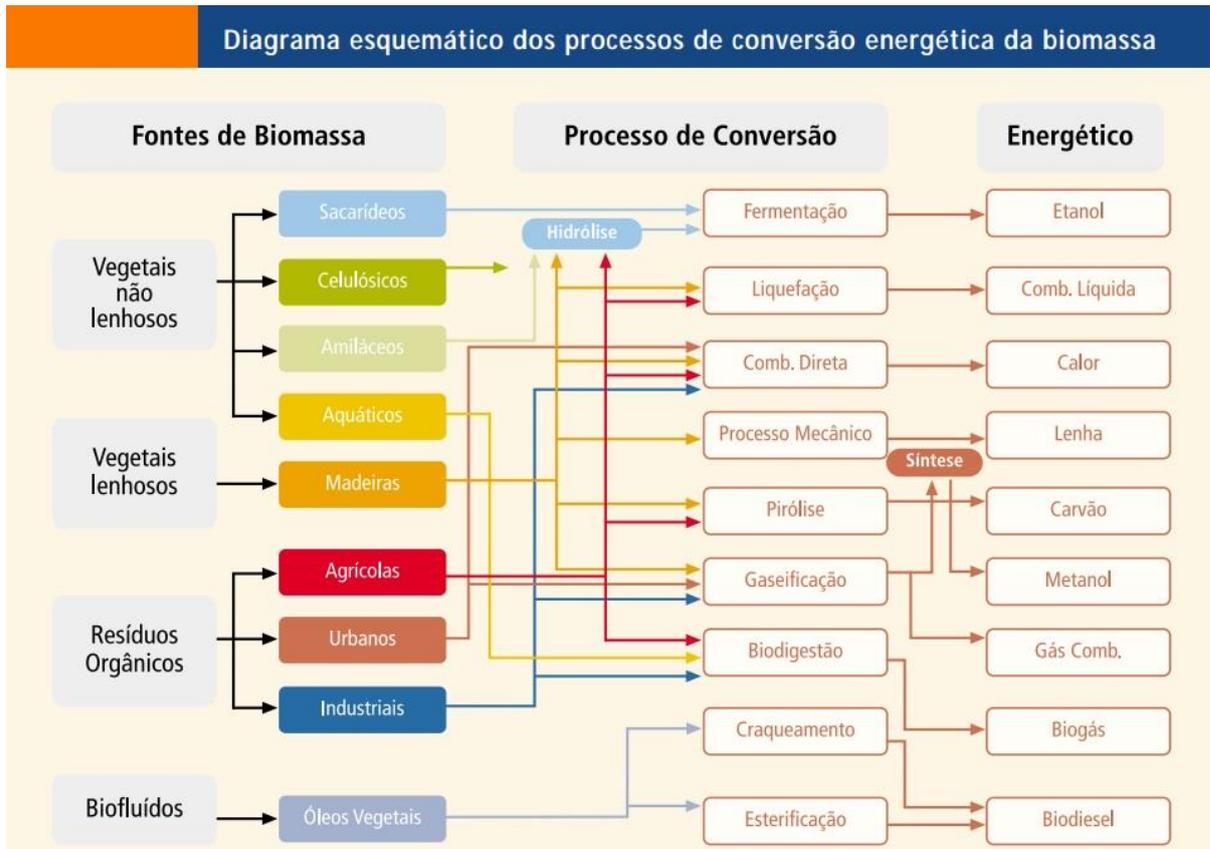
¹ Gaseificação é um processo que transforma combustíveis sólidos em gás.

² Pirólise é a queima em condições subestequiométricas de oxigênio, para extração do material volátil, gerando carvão.

³ Liquefação é a transformação de um combustível sólido em líquido.

⁴ Transesterificação é uma reação entre um éster e um álcool, através da qual se obtém o biodiesel.

Figura 1 - Diagrama dos processos de conversão energética da biomassa



Fonte: Balanço Energético Nacional - BEN, 1982 *apud* ANEEL, 2005.

Os principais exemplos de sucesso da aplicação da biodigestão para os resíduos orgânicos urbanos são encontrados em países europeus que, por possuírem restrições ao percentual de resíduos a ser aterrado, têm investido em tecnologias alternativas de tratamento. Destacam-se neste cenário Alemanha e Holanda, por possuírem instalações de digestores anaeróbios com a maior capacidade de tratamento por habitante, e com maior difusão da tecnologia por centro de tratamento, respectivamente (MATTHEEUWS e DE BAERE, 2012).

3.2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

De acordo com a Lei 12305 de 02 de agosto de 2010, resíduos sólidos correspondem a:

Material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido (...).

Para GARCIA (2012, p. 6),

A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é um dos grandes desafios da sociedade atual, especialmente nos países em desenvolvimento, mas com inúmeras oportunidades para a transição para uma Economia Verde⁵. Mais do que a redução na poluição, permite a diminuição do desperdício gerado pelas necessidades de consumo e o reaproveitamento de materiais para poupar recursos naturais, como também tem grande potencial de geração de empregos e inclusão social. O reaproveitamento dos resíduos sólidos como matéria-prima, energia ou composto orgânico tem contribuição direta na conservação de recursos naturais, sejam eles renováveis ou não, na preservação de ecossistemas e na eficiência dos processos produtivos, uma vez que conduz à otimização dos custos ambientais e econômicos associados ao ciclo de vida dos produtos.

Os resíduos sólidos urbanos são constituídos por matéria orgânica putrescível, papéis, resíduos de poda e varrição, plástico, vidro, metais, ossos e outros materiais inertes. A composição específica varia conforme os hábitos da população geradora. De acordo com a pesquisa realizada pela ABRELPE, em 2013 os brasileiros geraram 209.280 ton/dia de RSU, mas somente 189.219 ton/dia foram coletadas, o que representa um déficit de 20.061 ton/dia, as quais certamente tiveram destinação inadequada. Além disto, a pesquisa ainda aponta um crescimento de 4,1% na geração de RSU, comparado ao ano anterior, valor superior à taxa de crescimento populacional, que foi de 3,7% entre 2012 e 2013. Enfatiza-se ainda, que dentre os resíduos coletados, 41,74% tiveram destinação final inadequada, sendo depositados em lixões, sem qualquer controle ambiental.

Ainda segundo a ABRELPE (2013, p. 60), das 3.024 toneladas de RSU geradas por dia em Alagoas, apenas 2.413 toneladas foram coletadas, e destas, 57,8% foram destinadas a

⁵ Economia Verde: economia que resulta em melhoria do bem-estar da humanidade e igualdade social, ao mesmo tempo em que reduz significativamente riscos ambientais e escassez ecológica (PNUMA, 2011 apud GARCIA, 2012).

lixões, 38,3% para aterros controlados, e somente 3,9% tiveram como destino final um aterro sanitário. Estes dados evidenciam uma necessidade urgente da melhoria da gestão dos resíduos sólidos urbanos em nosso estado, buscando alternativas tecnológicas adequadas à realidade local.

GARCIA (2012, p. 7) aponta que do total de resíduos coletados no Brasil, 51,4% referem-se a materiais orgânicos como restos de alimentos e resíduos de jardinagem, e 32% correspondem a materiais recicláveis.

Em Maceió, o levantamento realizado por TAVARES et al. (2010, p. 4) aponta a predominância de matéria orgânica entre os resíduos sólidos coletados, correspondendo a 60% do total, seguida pelos plásticos com 13,1%, papel/papelão: 8,4%, metais: 1,8% e vidros: 1,0%. A média de geração de resíduos é de 0,9 kg/hab.dia.

Estes dados demonstram o grande potencial dos RSU gerados em Maceió, pois além de possuir 24,3% de material reciclável, a fração orgânica é predominante, podendo ser aproveitada para fins energéticos.

A reciclagem, a geração de energia e de compostos orgânicos utilizáveis como adubo, agregam valor econômico aos RSU, incentivando a sua destinação correta e a preservação ambiental.

3.3. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

Digestores anaeróbios têm sido amplamente utilizados no tratamento de resíduos sólidos, incluindo resíduos da agricultura, excrementos animais, lodo proveniente de sistemas de tratamento de esgoto e resíduos urbanos, e estima-se que milhões de digestores anaeróbios têm sido construídos ao redor do mundo para este fim (CHERNICHARO, 2007, p. 1).

A biodigestão anaeróbia vem sendo usada no tratamento de efluentes há mais de um século, quando os reatores, chamados digestores anaeróbios, consistiam simplesmente de tanques de concreto onde os resíduos eram colocados, devidamente misturados com água, permitindo a sua decomposição anaeróbia. Com o passar dos anos, descobriu-se que o

tempo de retenção hidráulica⁶, que girava em torno de 60 dias ou mais, poderia ser reduzido, com a manutenção da temperatura em torno de 35° e a mistura dos resíduos, promovendo sua homogeneização. Estas descobertas levaram a um reator anaeróbio de alta taxa, com tempo de retenção hidráulica entre 15 e 20 dias (GRADY e DAIGGER, 1999, p. 599).

A biodigestão nada mais é do que o processo natural de degradação da matéria orgânica, realizado pelos microrganismos. De acordo com GRADY e DAIGGER (1999, p. 599), o termo processo anaeróbio refere-se a diversas formas de sistemas de tratamento biológico de efluentes nos quais o oxigênio e o nitrogênio são excluídos. Na maioria dos casos, estes sistemas são operados para converter matéria orgânica biodegradável, solúvel e particulada, em metano e dióxido de carbono.

Sendo assim, podemos dizer que, em condições anaeróbias, a decomposição da matéria orgânica ocorre mais rapidamente do que na presença de oxigênio, e com a formação de gases como um de seus produtos. Estes gases são denominados biogás, e possuem elevado potencial energético.

O biogás é composto por: 40 a 70% de metano (CH₄), 30 a 60% de dióxido de carbono (CO₂), e traços de hidrogênio (H₂), sulfeto de hidrogênio (H₂S) e vapor de água. Este biogás pode ser usado para geração de energia elétrica, no aquecimento em processos industriais e, quando purificado, deixando apenas o metano, pode ser usado como combustível em motores Otto e como matéria prima na indústria química (ZANG e ZANG, 2012).

O aproveitamento energético do biogás promove a utilização ou reaproveitamento de recursos renováveis; colabora com a não dependência de fonte de energia fóssil; aumenta a oferta e possibilita a geração descentralizada de energia próxima aos centros de carga; promove economia no processo de tratamento de resíduos, aumentando a viabilidade da implantação de serviços de saneamento básico (ARCADIS Tetraplan, 2010, p. 4).

Além disto, a utilização do biogás para geração de energia impede que o metano nele contido seja liberado para a atmosfera, podendo incluir a atividade no MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), gerando renda com a venda de créditos de carbono.

⁶ Tempo de retenção hidráulica: tempo que o resíduo permanece no reator, até que a reação esteja completa e estabilizada.

Porém, para que a biodigestão ocorra de forma satisfatória, gerando biogás em quantidade e qualidade ideais para utilização nas atividades humanas, é preciso propiciar as condições adequadas para a atividade bacteriana.

Hoje, sabe-se que os fatores que influenciam na produção de biogás vão além da temperatura, a saber:

- Impermeabilidade ao ar: os microrganismos metanogênicos são essencialmente anaeróbios, portanto, o biodigestor deve ser perfeitamente vedado;
- Temperatura: A faixa ideal para produção de biogás é de 35 a 45 °C (microrganismos mesofílicos). Também se pode obter biogás com biodigestores operando na faixa de 50 a 60 °C (microrganismos termofílicos). O mais importante é que não deve haver variações bruscas de temperatura, pois as bactérias não sobrevivem e, portanto, a produção do biogás diminui consideravelmente;
- Alcalinidade e pH: Os microrganismos que produzem o metano sobrevivem em faixa estreita de pH (6,5 a 8,0). Assim, enquanto os microrganismos produtores de ácido (estágio 1 e 2 da digestão anaeróbia) estão em atividade, os microrganismos produtores de metano consomem esses ácidos, mantendo o meio neutro. Entretanto, as reações envolvidas nos estágios 1 e 2 são muito mais rápidas que a produção do metano, por isso, ao iniciar a produção do biogás, é necessário que uma população de microrganismos metanogênicos já esteja presente para que o processo seja bem-sucedido.
- Teor de água: o teor de água dentro do biodigestor deve variar de 60% a 90% do peso do conteúdo total.
- Nutrientes: Os principais nutrientes dos microrganismos são carbono, nitrogênio e sais orgânicos. Uma relação específica de carbono para nitrogênio deve ser mantida entre 20:1 e 30:1. A principal fonte de nitrogênio é o dejetos humano e de animais, enquanto os polímeros presentes nos restantes das culturas representam o principal fornecedor de carbono. A produção de biogás não é bem-sucedida se apenas uma fonte de material for utilizada (ANDREOLI et al., 2003, p. 125).

Para CHERNICHARO (2007, p. 5), digestão anaeróbia representa um ecossistema biológico precisamente balanceado, onde diferentes populações de microrganismos apresentam funções especializadas, e a quebra de compostos orgânicos é normalmente

considerada um processo de dois estágios. No primeiro estágio, um grupo de microrganismos anaeróbios facultativos converte (por hidrólise e fermentação) os componentes orgânicos complexos (carboidratos, proteínas e lipídeos) em materiais orgânicos simples, principalmente ácidos graxos voláteis, bem como dióxido de carbono e hidrogênio gasosos. No segundo estágio, os ácidos orgânicos e hidrogênio são convertidos em metano e dióxido de carbono. Esta conversão é realizada por um grupo especial de microrganismos, denominado metanogênicos, que são procarióticos estritamente anaeróbios. As *archaeas* metanogênicas dependem do substrato gerado pelos microrganismos formadores de ácidos, consistindo assim, de uma interação microbiana.

Este processo microbiológico pode ainda ser subdividido em outras etapas, convencionalmente quatro, sucessivas e interdependentes: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (Figura 2).

Hidrólise: corresponde à quebra de substratos complexos em cadeias de menor tamanho, através de enzimas produzidas pelos microrganismos fermentativos hidrolíticos, liberando moléculas assimiláveis. (CASSINI et al., 2003, p. 21). A hidrólise de carboidratos leva algumas horas, proteínas e lipídeos alguns dias, lignocelulose e lignina são degradadas lenta e parcialmente (DEUBLEIN e STEINHAUSER, 2011, apud KISPERGHER, 2013). Deste modo, a demora no processo de hidrólise pode ser um fator limitante à produção de metano. Para evitar que isto ocorra, muitas vezes são aplicados mecanismos físicos, químicos ou combinados para aumentar a biodegradabilidade dos resíduos, provocando a quebra dos polímeros, facilitando a solubilização (CASSINI et al., 2003, p. 21).

Acidogênese: Os produtos solúveis oriundos da fase anterior são metabolizados por microrganismos fermentativos, sendo convertidos em ácidos graxos voláteis, álcoois, hidrogênio e dióxido de carbono (PAULA JÚNIOR et al., 2003, p. 54).

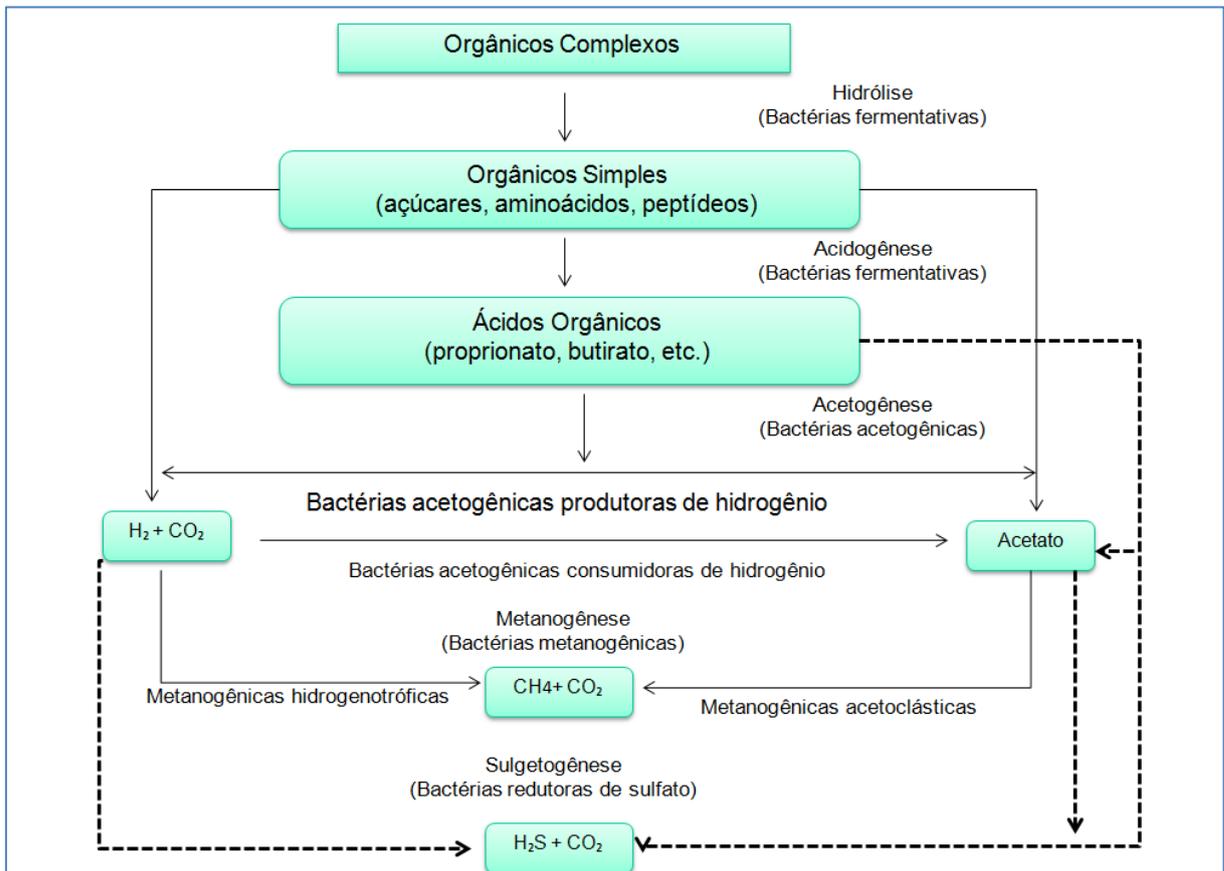
Acetogênese: Microrganismos acetogênicos oxidam os produtos gerados na fase acidogênica em substratos apropriados para os organismos metanogênicos. Os produtos desta fase são ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono (CHERNICHARO, 2007, p. 7).

Metanogênese: é a etapa final do processo, efetuada pelas *archaeas metanogênicas*, que são divididas em dois grupos principais em função de sua afinidade com diferentes substratos: acetoclásticas, que utilizam ácido acético na produção de metano; e

hidrogenotrófica, que utilizam hidrogênio e dióxido de carbono para a formação de metano (PAULA JÚNIOR et al., 2003, p. 54).

A rota de digestão anaeróbia pode ser visualizada na Figura 2:

Figura 2 - Fluxograma da digestão anaeróbia



Fonte: Fernandes, 2016.

Ainda segundo PAULA JÚNIOR et al. (2003, p. 54), quando há presença de sulfato no substrato, as bactérias redutoras de sulfato passam a competir com as demais pelos substratos disponíveis, e geram hidrogênio como produto final.

O resíduo da digestão anaeróbia é um composto orgânico rico em nutrientes, que, a depender de suas características, pode ser utilizado em substituição ao fertilizante sintético na agricultura. Mesmo que o resíduo não possa ser reutilizado, a digestão anaeróbia é válida devido à redução de volume e de patógenos, além do aproveitamento energético do biogás.

3.4. INÓCULOS

De acordo com LEITE et al. (2003, p. 98), os processos anaeróbios empregados no tratamento de resíduos sólidos ainda não constituem prática muito bem difundida no Brasil, pela falta de configurações de sistemas de tratamento e, sobretudo, pelo tempo bastante longo necessário para a bioestabilização anaeróbia dos resíduos sólidos orgânicos, quando comparados aos processos aeróbios. Para diminuir o tempo de bioestabilização, a utilização de inóculos tem mostrado resultados satisfatórios.

A co-digestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) com outros tipos de resíduos, notadamente excrementos animais, pode otimizar o processo de tratamento, melhorando a produção de biogás e acelerando o processo de digestão, pelo equilíbrio de nutrientes e fornecimento de inóculo⁷. Estudos apontam para percentuais entre 5% e 20% de lodo de esgoto sanitário, em relação ao lixo orgânico, para o incremento e aceleração da produção de biogás. Outros fazem esta relação com base no teor de sólidos totais presentes nos dois tipos de resíduos, indicando uma proporção de 80:20 entre lodo primário e FORSU (CRAVEIRO, 1982 e DEMIREKLER & ANDERSON, 1998, apud LEITE et al., 2003, p 104). Esta correlação é feita devido à relação entre a produção de biogás e o teor de sólidos voláteis existentes no substrato, visto que estes originam o gás. Procura-se, desta forma, minimizar a interferência de diferentes quantidades de sólidos voláteis no volume de gás final, para uma comparação precisa da atividade dos diferentes tipos de resíduos na eficiência do sistema.

Vários tipos de inóculos são propostos na literatura, tais como rúmen de bovinos e dejetos de bovinos e suínos, obtendo resultados entre 25% e 58% na degradação de SV, com produção de 117L a 144L de biogás (BARCELOS, 2009); lodos de estações de tratamento de efluentes sanitários (ETEs) (SILVA, 2014) e recirculação do chorume, previamente inoculado com lodo de ETEs, obtendo um valor de produção de gás de 0,15 L de CH₄ /g DQO_{remov} (LIBÂNIO, 2002).

Mesmo tendo como preponderante a eficiência de cada inóculo, o material ideal é o que exista em abundância próximo ao centro gerador e a unidade de tratamento de resíduos, por motivos de logística e redução de custos.

⁷ Inóculo: comunidade de microrganismos decompositores introduzidos no processo para promover o início e aceleração da degradação da matéria orgânica.

3.5. TIPOS DE BIODIGESTORES

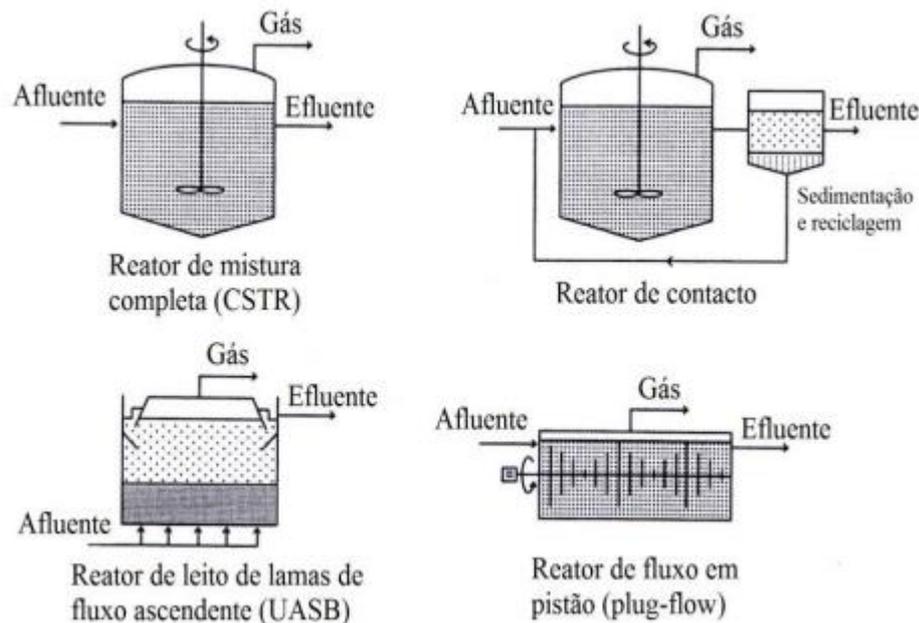
Conforme CETESB (2016), os reatores anaeróbios foram concebidos para tratar resíduos semissólidos como estrume de animais, lixo doméstico e para a estabilização de lodos provenientes dos tratamentos de efluentes. Esses reatores se constituem de tanques simples, sem recirculação de lodo com ou sem agitação. Seus tempos de retenção variam de 15 a 60 dias. São chamados de reatores convencionais, de baixa taxa.

Em processos intermitentes faz-se uso de reatores em batelada, nos quais o material entra, é processado e totalmente retirado do reator, que será preparado para nova reação. Já nos processos de geração contínua de material, a alimentação e reação no reator anaeróbio são contínuas, mantendo um fluxo constante de entradas e saídas. De acordo com FERNANDES (2013, p. 13) os modelos de digestores contínuos podem ser divididos em dois grupos fundamentais:

- Reatores de biomassa em suspensão (ou sem suporte)
- Reatores de biomassa fixa (ou com suporte)

Nos reatores de biomassa em suspensão, os resíduos formam flocos ou grânulos e encontram-se suspensos no líquido presente no interior do digestor. Particularmente indicados para o tratamento de resíduos semissólidos, com uma fração de sólidos voláteis que pode chegar aos 25%, estes digestores podem ainda ser dotados de sistemas de agitação e aquecimento (FERNANDES, 2013, p.13). Os tipos de reatores de biomassa em suspensão encontram-se ilustrados na figura 3:

Figura 3 - Principais reatores anaeróbios de biomassa em suspensão



Fonte: Fernandes (2013, p.13) apud CCE.

Ainda de acordo com FERNANDES (2013, p. 13), o modelo de digestor mais utilizado é o reator de fluxo contínuo com agitação (CSTR - Continuous Flow Stirred Tank Reactor), uma vez que é caracterizado pela alimentação e saída de efluente contínuas. O sistema de agitação proporciona o contato entre o afluente e os microrganismos, criando condições de mistura fundamentais ao funcionamento adequado do sistema. Necessita de um elevado tempo de retenção, de forma a garantir que mesmo a matéria de degradação mais lenta seja decomposta, visto que este modelo não usufrui de nenhum mecanismo para retenção da biomassa microbiana. Devido às suas características é adequado para a digestão de resíduos concentrados como resíduos pecuários e lamas de esgoto, com elevado teor de sólidos e de material grosseiro.

O reator de contacto é semelhante ao CSTR, apresenta um elevado tempo de retenção e tem como principal característica o controle da perda de biomassa ativa no digestor através de um sistema de separação e recirculação de lama.

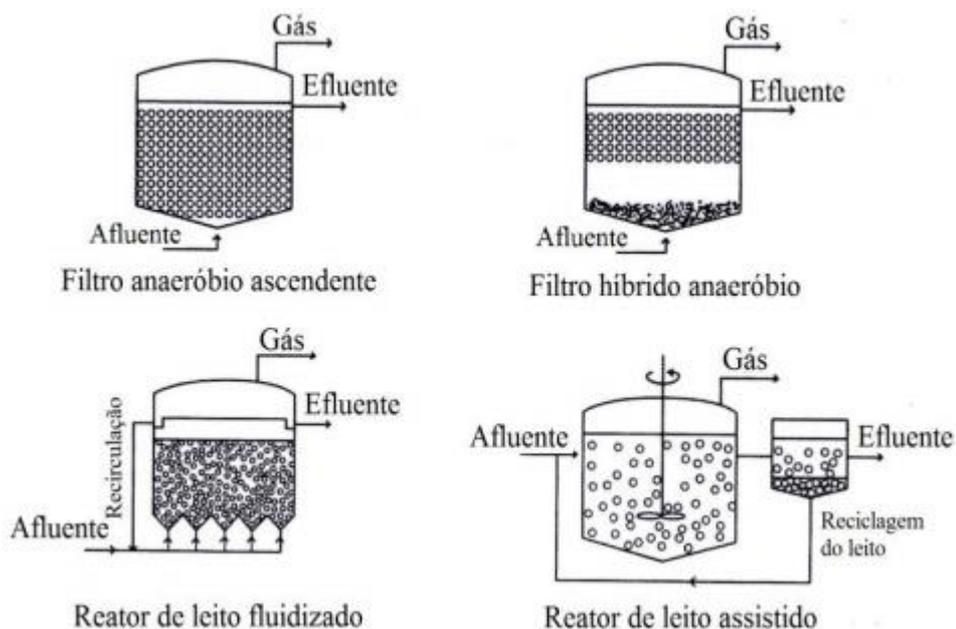
A nível industrial o processo de um UASB é o mais requerido, sendo muito usado no tratamento de águas residuais diluídas. Consiste na formação de densos grânulos de microrganismos que, devido à sua elevada densidade, apresentam facilidade de

sedimentação. O processo de um UASB tem capacidade para tratar elevadas cargas orgânicas de natureza solúvel com bons rendimentos.

Por fim, o modelo fluxo-pistão caracteriza-se pela entrada do resíduo num dos extremos do tanque, provocando o deslocamento de todo o conteúdo do digestor, culminando com a saída, do lado oposto, da mesma quantidade de resíduo tratado. O biogás formado fica retido numa cobertura em tela flexível e impermeável. (FERNANDES, 2013, p. 13)

Nos reatores de biomassa fixa é utilizado um meio de suporte onde os microrganismos podem se fixar, geralmente constituído por plástico (filtro anaeróbio e leito móvel), pedra ou partículas pequenas de plástico, areia, carvão, etc. Este suporte é usado de forma a proporcionar um tempo de retenção da matéria superior ao tempo de retenção hidráulico do efluente. Estes tipos de reatores são principalmente usados no tratamento de resíduos de maior solubilidade (FERNANDES, 2013, p.13-14). Os tipos de reatores de biomassa fixa encontram-se ilustrados na figura 4:

Figura 4 - Principais reatores anaeróbios de biomassa fixa



Fonte: Fernandes (2013, p. 14) apud CCE.

3.6. PRODUÇÃO DE METANO NO BIODIGESTOR

Para CASSINI (2003):

Nos reatores anaeróbios, a formação de metano é altamente desejável, uma vez que a matéria orgânica, geralmente medida como DQO, é efetivamente removida da fase líquida, pois o metano apresenta baixa solubilidade em água. Logo, procura-se acelerar o processo de digestão anaeróbia nos reatores, criando condições favoráveis, e estas se referem tanto ao próprio projeto do sistema de tratamento como às condições operacionais nele existentes.

Os microrganismos metanogênicos são anaeróbios estritos que compartilham uma bioquímica complexa para síntese de metano como parte de seu metabolismo para geração de energia. São microrganismos de crescimento lento e que apresentam grande sensibilidade as condições externas, sendo o primeiro grupo a sofrer os efeitos de situações de estresse ambiental (CHERNICHARO, 2007).

Para proteger os organismos, é necessário que o reator tenha baixa permeabilidade térmica, completo isolamento aeróbio e uma hidráulica que permita a homogeneização do substrato, a fim de permitir que todas as etapas da biodigestão se deem de maneira adequada. Além disto, a presença do oxigênio dissolvido pode vir constituir um problema, caso o projeto do reator seja inadequado, permitindo intensa aeração do substrato antes de entrar no sistema de tratamento (CHERNICHARO, 2007).

Em condições normais de produção, o biogás não é tóxico graças a seu baixo teor de monóxido de carbono (inferior a 0,1%). Por outro lado, em razão das impurezas que contém, o biogás pode ser muito corrosivo, principalmente pela ação do gás sulfídrico, que ataca, além de outros materiais, o cobre, o latão e o aço, dependendo de sua concentração. (CASSINI, 2003) Estes fatores devem ser levados em consideração na escolha dos materiais que devem compor o sistema de biodigestão, a fim de evitar corrosões e consequentes danos aos equipamentos.

3.7. USO DE REATORES ANAERÓBIOS NO BRASIL

A utilização energética de resíduos e efluentes orgânicos provenientes da produção agropecuária, da indústria e de serviços municipais de saneamento (RSU, esgotos e lodos sanitários), por meio da digestão anaeróbica, tem uma importância crescente no Brasil, uma

vez que essas tecnologias permitem aliar a produção energética aos serviços de saneamento básico ambiental (CETESB, 2016).

O tratamento através da digestão anaeróbia se mostra uma solução atrativa para o Brasil, por ser um tratamento aliado à produção energética aplicado em um país com condições climáticas favoráveis. Ressalta-se, entretanto que, em muitos casos, o processo anaeróbio não é suficiente para atingir os padrões de lançamento brasileiros, sendo necessário um pós-tratamento. O Brasil é experiente no uso da digestão anaeróbia no tratamento do esgoto doméstico, dos resíduos da indústria e da agropecuária, mesmo que sem o aproveitamento de biogás gerado. Apesar disso, o setor de resíduos sólidos ainda tem muito potencial para ser desenvolvido e o aproveitamento da energia gerada, bem como do substrato digerido, pode contribuir para valorizar o investimento nas tecnologias de tratamento (ARCADIS, 2015).

Os reatores de mistura contínua (CSTR - Continuous Flow Stirred Tank Reactor) são a tecnologia padrão para a digestão anaeróbia de substratos mais densos (ST de 15%), com características favoráveis para bombeamento e mistura. Essa tecnologia é mais aplicada nos setores da agropecuária, da indústria e no tratamento de lodos sanitários, sendo utilizada com menor frequência no tratamento de resíduos orgânicos urbanos, pois a tecnologia exige substratos praticamente livres de impurezas e suficientemente úmidos (SNSA a, 2015). No Brasil é pouco utilizada, e seu uso é predominante na digestão de resíduos animais.

As lagoas anaeróbias cobertas são fáceis de serem construídas e há grande experiência de uso no Brasil para o tratamento de efluentes provenientes da agropecuária, especialmente na zona rural da região sudeste (LUCAS JÚNIOR, 2009), da indústria (laticínios, carne e outros) e do tratamento do esgoto sanitário. Geralmente não são capazes de tratar completa e adequadamente os efluentes e, em muitos casos, não apresentam cobertura eficaz, deixando escapar gás metano para a atmosfera. As lagoas anaeróbias cobertas com misturador são muito comuns e representam o estado da arte em países com climas tropicais, como o Brasil, combinando vantagens das lagoas cobertas com as do CSTR. No setor agropecuário brasileiro, a maioria das lagoas anaeróbias necessita de melhorias para que o biogás possa ser aproveitado energeticamente. O problema das lagoas se encontra geralmente em sua manutenção, pois não há, no Brasil, serviço especializado. No

setor de tratamento de esgotos, por sua vez, as lagoas vêm sendo substituídas pelos reatores UASB (KOZAK et al, 2012).

Os reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) são os reatores mais compactos utilizados para o tratamento de efluentes industriais e, em locais de clima quente, também do esgoto sanitário. O UASB e suas variações técnicas, como o RALF (Reator Anaeróbico de Leito Fluidizado), têm como características básicas: o tratamento do efluente com baixo tempo de retenção hidráulica (4-12h), a entrada de efluente no fundo do reator, onde se forma um filtro biologicamente ativo de grânulos (lodo), e o fluxo ascendente à parte superior, onde se separam a biomassa, o biogás e o efluente tratado, através do separador trifásico. Vale ressaltar que o Brasil é um dos países com mais experiência na utilização de UASB para o tratamento de esgotos sanitários, porém, ainda são poucas as ETEs que aproveitam o biogás energeticamente. Destaca-se ainda que, no Brasil, o uso de UASB para efluentes industriais se limita ainda a casos especiais, por exemplo, em cervejarias. Em relação à crescente importância dessa tecnologia no mercado internacional e às boas experiências que existem no Brasil, na sua aplicação para o esgoto sanitário, o potencial para os efluentes industriais é muito grande. Na América Latina, estima-se que há cerca de 700 reatores UASB para tratamento de esgoto doméstico (CHERNICHARO, 2007).

Da mesma forma que o tratamento de esgoto, a digestão de lodo tem como objetivo o tratamento, ou seja, a estabilização de lodos do tratamento de esgoto.

Os reatores de digestão anaeróbia seca têm importância no tratamento de grandes volumes de substratos com pouca umidade, principalmente resíduos sólidos municipais e industriais. No Brasil, devido à quase inexistência de coleta seletiva dos resíduos urbanos, as tecnologias de digestão seca são mais apropriadas, pois são menos sensíveis à presença de impurezas. Caso haja segregação na fonte dos resíduos orgânicos ou coleta exclusiva de grandes geradores, pode-se utilizar a digestão úmida termofílica, que já promove a higienização do material digerido (SNSA a, 2015).

Um exemplo de uso dos reatores anaeróbios encontra-se no trabalho de BARBOSA (2016), o qual desenvolveu um modelo de biosistema integrado utilizando a biomassa gerada pela suinocultura, obtendo alta eficiência na remoção da Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅) analisados do efluente. A

produção média do biogás foi de $0,60 \pm 0,83 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, atingindo 68,1% de metano (CH_4); a média de produção de $0,41 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de CH_4 , sendo a produção máxima de $1,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de CH_4 . O gerador a biogás produziu o equivalente a 3 kVA.

3.8. USO DE REATORES ANAERÓBIOS NO TRATAMENTO DE RSU

Apesar dos inúmeros benefícios, a aplicação da metanização para o tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) ocorreu mais recentemente, tendo sofrido uma expansão expressiva na última década, principalmente na Europa (MATTHEUWS e DE BAERE, 2012).

De acordo com SNSA b (2015, p. 16):

Pelo fato dos sistemas de metanização terem sido desenvolvidos inicialmente para o tratamento de efluentes líquidos e operarem, portanto, como processo úmido, inúmeras variantes técnicas e operacionais foram sendo introduzidas com o intuito de que a metanização se tornasse um processo aplicável a resíduos e efluentes com diferentes características e que obtivesse cada vez maior eficiência.

O tratamento da FORSU, em particular, introduziu condicionantes antes não experimentadas com outros resíduos e efluentes, principalmente em função das particularidades destes resíduos (heterogeneidade, teor de sólidos, alto teor de materiais impróprios, etc.), o que acarretou no desenvolvimento e evolução de uma linha tecnológica focada exclusivamente nestes materiais.

Segundo AUSTERMANN et al. (2007), as tecnologias de metanização dos RSU podem ser diferenciadas conforme algumas características básicas de processo:

- Temperatura do processo, sendo mesofílico ($37^\circ - 42^\circ\text{C}$) ou termofílico ($50^\circ - 60^\circ\text{C}$);
- Sistema de operação, basicamente relacionado aos processos de introdução / extração do substrato, podendo ser por processo contínuo, semicontínuo ou descontínuo (bateladas sequenciais);
- Concentração de sólidos totais (ST), operando via úmida⁸, via seca⁹ ou extrasseca¹⁰;
- Divisão das etapas de digestão, em um estágio único ou multiestágio.

⁸ Via úmida: adição de água para diluição do substrato, até uma concentração máxima de 15% de sólidos totais.

⁹ Via seca: teores de sólidos totais entre 15% e 35%.

¹⁰ Via extrasseca: teores de sólidos totais na faixa de 35 a 50%. Fonte: SNSAb, 2015, p. 18.

Os processos de via úmida são caracterizados pela adição de água ou efluente líquido proveniente do lodo digerido no sistema ao resíduo até a obtenção do percentual de ST requerido pela tecnologia. Geralmente, utilizam reatores do tipo mistura completa, sendo a agitação do material realizada por agitadores mecânicos internos, recirculação via bombeamento do material em digestão ou pela injeção de biogás comprimido na base do reator (AUSTERMANN et al., 2007).

Processos via seca não diluem o material de entrada, mas comumente utilizam uma unidade para o condicionamento do resíduo, visando a sua inoculação, homogeneização e fluidificação antes de sua introdução no reator adicionando lodo da recirculação (AUSTERMANN et al., 2007). Devido à possibilidade de aplicação de uma maior carga orgânica, os reatores via seca requerem menor volume do que os via úmida; entretanto, devido à maior densidade do material em digestão, o processo requer a utilização de equipamentos mais potentes e robustos (SNSA b, 2015, apud VANDEVIVERE et al., 2002).

Já os sistemas extrassecos são reatores que operam com elevado teor de sólidos (35 a 50%), mas em operação descontínua, em regime de bateladas sequenciais, sendo a FORSU introduzida por pás carregadeiras em reatores do tipo túneis de metanização, também conhecido como sistemas garagem. Visando a continuidade de operação e, conseqüentemente, de produção de biogás, as plantas têm sido projetadas com quatro ou mais reatores, possibilitando a introdução e remoção de substrato de maneira sequencial e operação em estágios distintos de metanização (AUSTERMANN et al., 2007).

De acordo com o SNSA b (2015, p. 25), as tecnologias via seca e via extrasseca são referenciadas como os processos biológicos mais adequados para o tratamento da FORSU por serem mais estáveis e constituídas por sistemas mais robustos, que possuem menor consumo energético, geram menos efluente líquido e possuem uma menor demanda de água em comparação com os processos úmidos. Sendo assim, citam-se as principais tecnologias:

3.8.1. Dranco

A tecnologia Dranco é de propriedade da empresa belga fundada em 1988, Organic Waste Systems (OWS). O sistema Dranco é um processo de digestão anaeróbia termofílico

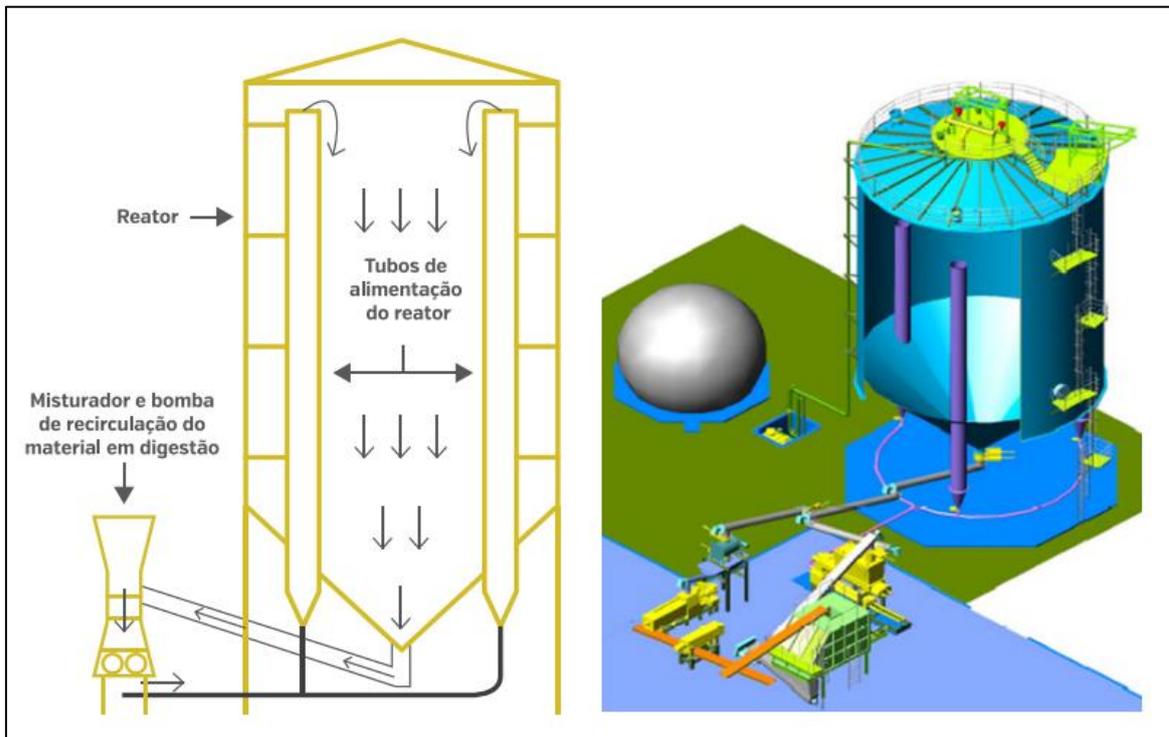
via seca. O reator é de único estágio, fluxo contínuo, vertical, de formato cilíndrico e fundo cônico, tendo seu design similar a um silo de armazenamento. Tal reator pode ser construído em concreto armado ou aço, aceita uma grande variedade de resíduos orgânicos e trabalha com teores de ST variando entre 15% e 40% na introdução (SNSA b, 2016).

Os resíduos de entrada são aquecidos via injeção de vapor, o que eleva sua temperatura a aproximadamente 50°C.

O processo de alimentação ocorre uma vez ao dia, via bombas similares às utilizadas no bombeamento de concreto, introduzindo o material na parte superior do reator e a extração pela base, promovendo um fluxo descendente do material. O sistema de mistura dispensa agitadores mecânicos, sendo realizado por recirculação do material em digestão, processo esse que ocorre geralmente de forma contínua. Durante esse processo, o resíduo a ser alimentado é misturado ao material em digestão em proporções de até de 6:1 (material digerido: resíduo fresco) (RIS INTERNATIONAL, 2005 p. 42).

O tempo de detenção hidráulica varia de 20 a 30 dias e a produtividade de biogás entre 80 e 120 Nm³ /t. O material extraído é desaguado via prensas a um teor de 50% de ST, sendo posteriormente estabilizado aerobiamente, por aproximadamente duas semanas e o líquido, com elevadas concentrações de matéria orgânica e amônia, necessita de tratamento posterior (RIS INTERNATIONAL, 2005 p. 42). A representação do sistema Dranco encontra-se na figura 5.

Figura 5 - Representação do Sistema Dranco



Fonte: SNSA b, 2015.

3.8.2. Axpo Kompogas

O processo Kompogas atualmente é de propriedade da Axpo, da Suíça. A tecnologia é licenciada em diversas partes do mundo, inclusive no Brasil, pela empresa alemã Kuttner. O sistema Kompogas é um processo de digestão anaeróbia via seca, majoritariamente operado na faixa termofílica (55°-60°C). O reator é de único estágio, fluxo pistão com alimentação semicontínua, horizontal de formato retangular e fundo cilíndrico ou totalmente cilíndrico, construído em concreto armado ou aço (SNSA b, 2015).

O resíduo que alimenta o reator, após ser triado e triturado, é armazenado em um tanque intermediário por dois dias, no qual é aquecido e o teor de matéria seca ajustada a 28%, com a adição do efluente líquido do processo de desaguamento do lodo digerido. Desse tanque, o material é direcionado ao reator com o auxílio de uma bomba de pistão. O material digerido é desaguado via prensas ou centrífugas até atingir um teor de matéria seca de 50%, sendo que o sólido resultante necessita ser estabilizado aerobiamente, por aproximadamente duas semanas e o líquido, com elevadas concentrações de matéria

orgânica e amônia, necessitando de tratamento posterior. A gestão do material digerido e do efluente do processo de desaguamento varia de unidade para unidade (RIS INTERNATIONAL, 2005).

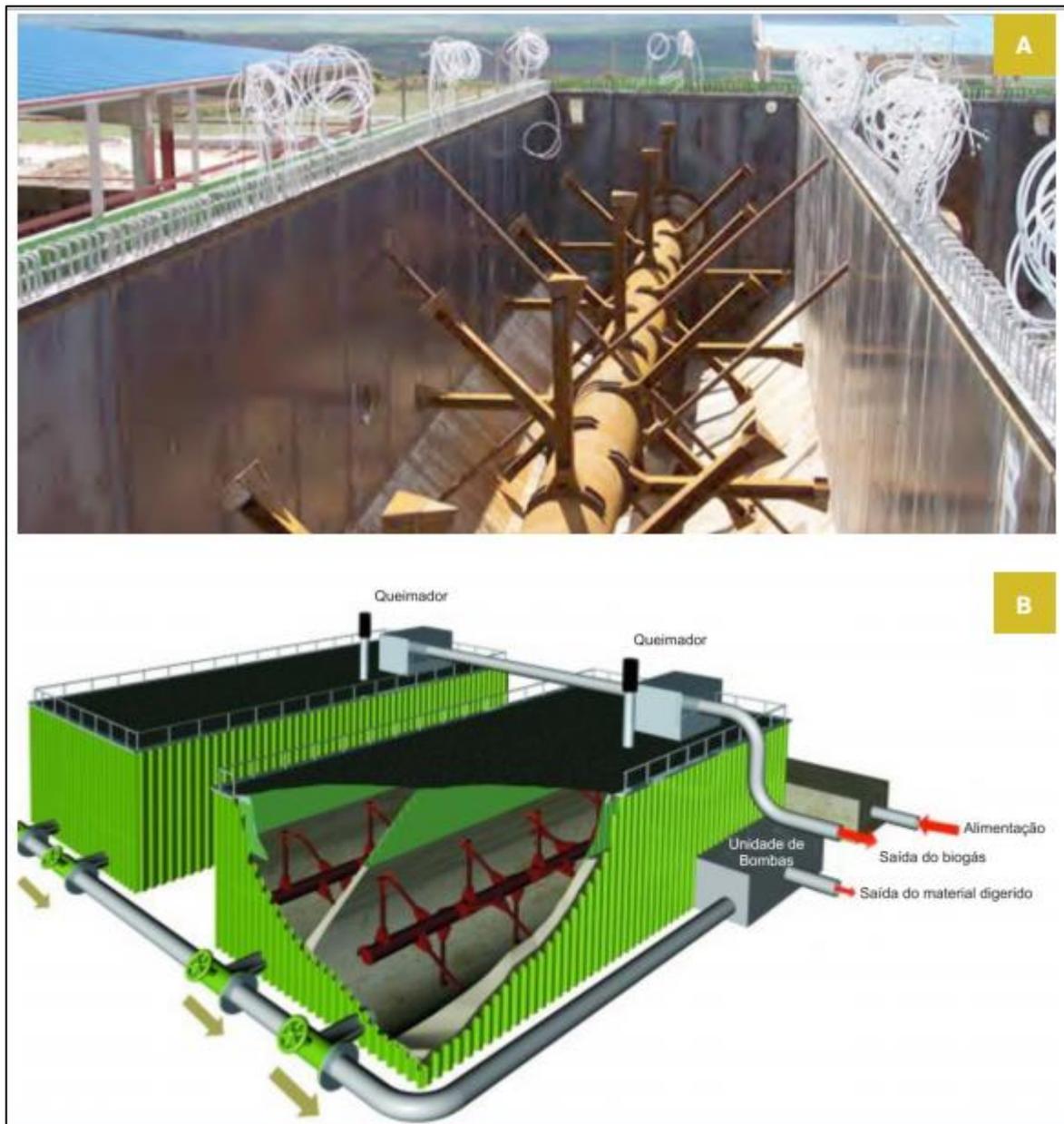
Em plantas de menor escala são utilizados reatores pré-fabricados em aço, com dimensões padrão de 25m de comprimento e 4m de diâmetro. Para unidades de maior capacidade, os reatores são construídos em concreto armado. A agitação do material em digestão é realizada pela rotação de pás fixadas transversalmente a um único eixo longitudinal ao reator (HZI, 2016). A representação do sistema encontra-se na figura 6.

Projetado especificamente para FORSU, os reatores com tecnologia Kompogas podem trabalhar também com resíduos de poda, de indústrias processadoras de alimentos, entre outros. Em termos de área, uma planta de 50.000t/ano necessita de aproximadamente 12.000m² (HZI, 2016).

A produção média esperada de biogás para plantas com tecnologia Kompogas é de 100 Nm³/t de resíduos orgânicos e 150 Nm³/t de resíduos com elevado teor de restos alimentares (HZI, 2016).

A tecnologia Kompogas é a única que possui representante comercial no Brasil, sendo representada desde 2009 pela Küttner Brasil (RIS INTERNATIONAL, 2005).

Figura 6 - Sistema Axpo Kompogas



Fonte: SNSA b, 2015.

3.8.3. Valorga

O processo Valorga foi originalmente desenvolvido na França com base na patente registrada por Ducellier G. e Isman M. Recentemente, a tecnologia foi adquirida pela empresa espanhola Urbaser. O processo Valorga foi inicialmente projetado para tratar resíduos orgânicos, mas, posteriormente, foi adaptado para o tratamento da FORSU (SNSA b, 2015).

O sistema Valorga é um processo de digestão anaeróbia via seca, majoritariamente operado na faixa mesofílica, sendo o reator de único estágio, fluxo semicontínuo, vertical, de formato cilíndrico, construído em concreto armado. O sistema de alimentação é realizado de forma semicontínua com a introdução do material via bombas similares às utilizadas para bombeamento de concreto. A extração do lodo se dá por um processo de abertura e fechamento de válvulas que, em função da coluna de lodo, exerce uma pressão que propicia a extração do material sem a necessidade da utilização de bombas. Como sistema auxiliar, uma bomba de pistão pode ser utilizada nesse processo (RIS INTERNATIONAL, 2005 p. 59).

No interior do reator existe uma parede com um comprimento de aproximadamente 2/3 do diâmetro do reator, separando a região de introdução da região de extração do lodo. Isso propicia ao material ser digerido em um sistema de fluxo pistão. O material digerido é desaguado via prensas ou centrífugas até atingir um teor de matéria seca de 50%, sendo que o sólido resultante necessita ser estabilizado aerobiamente, por aproximadamente duas semanas e o líquido, com elevadas concentrações de matéria orgânica e amônia, necessita de tratamento posterior (VALORGA INTERNATIONAL, 2015).

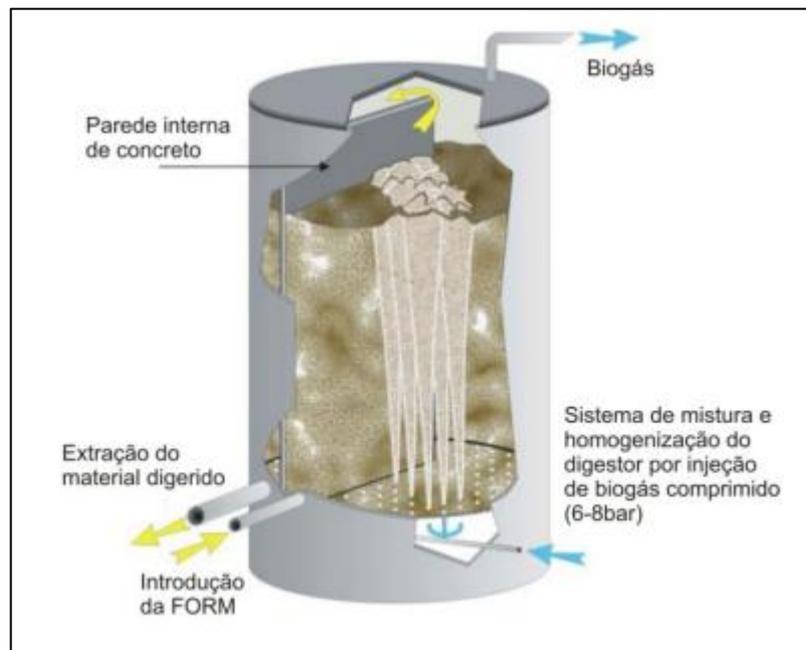
A agitação do material em digestão é realizada pela injeção de biogás comprimido (6 a 8 bar) através de orifícios localizados na base do reator, não existindo elementos mecânicos em seu interior. A manutenção da temperatura ocorre via injeção de vapor d'água aquecido no material afluente (VALORGA INTERNATIONAL, 2015). A representação do sistema Valorga encontra-se na figura 7.

Esses reatores operam com um teor de ST da ordem de 20 a 30%, um tempo de detenção hidráulica variando entre 18 e 30 dias, com taxa de produção de biogás variando entre 82 e 106 m³por tonelada de FORSU alimentada e consomem cerca de 25% da energia produzida (VALORGA INTERNATIONAL, 2015).

De acordo com informações da empresa¹¹, a capacidade média das plantas com tecnologia Valorga é de 127.652 t/ano, sendo a planta de Fos Sur Mer, na França, a de maior capacidade (497.600 t/ano). Atualmente existem 31 plantas construídas ou em construção, no mundo com tecnologia Valorga (VALORGA INTERNATIONAL, 2015).

¹¹ www.valorgainternational.fr

Figura 7 - Representação do Sistema Valorga



Fonte: SNSA b, 2015

3.8.4. Laran (Linde–BRV)

O processo Laran foi originalmente desenvolvido pela empresa Linde BRV Biowaste Technologies, atualmente é propriedade da austríaca STRABAG Umwelthanlagen GmbH.

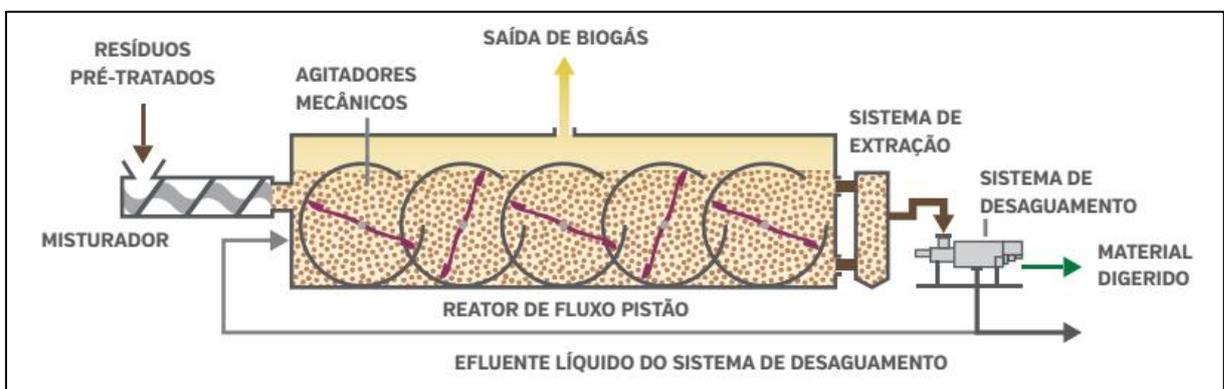
O sistema Laran, originalmente conhecido como Linde–BRV, é um processo de digestão anaeróbica via seca, que pode operar nas faixas termofílica ou mesofílica, com reator de único estágio, fluxo pistão semicontínuo, horizontal de formato retangular, construído em concreto armado (SNSA b, 2015).

Pode ser alimentado com diversos tipos de resíduos orgânicos, aceitando teores de matéria seca entre 15% a 45%. O resíduo é introduzido no reator por uma unidade compacta de alimentação. O material digerido é extraído com o auxílio de uma bomba e tanque de vácuo, podendo ser recirculado ou desidratado por uma prensa, seguida por uma centrífuga, sendo geralmente estabilizado em túneis de compostagem aeróbia. A produção de biogás esperada no reator Laran é da ordem de 100 Nm³ por tonelada de FORSU alimentada (STRABAG, 2015).

O sistema Laran trata diversos tipos de resíduos com elevado teor de sólidos, aceitando resíduos orgânicos de poda, agrícolas, de indústrias, além de FORSU. O processo de agitação é realizado com o auxílio de pás rotatórias perpendiculares às paredes laterais do reator, fixados em eixos perpendiculares ao fluxo do material em digestão. Esse sistema evita a formação de espuma e sedimentação de inertes. Um mecanismo de piso móvel auxilia no transporte e retirada da massa digerida. Devido ao registro de patente do reator cilíndrico da Kompogas, esse sistema foi desenvolvido com o formato retangular, o que impossibilitou a utilização do eixo longitudinal para fixação dos agitadores mecânicos (RIS INTERNATIONAL, 2005). A representação do sistema encontra-se na figura 8.

A capacidade média das plantas com tecnologia Laran é de 49.132 t/ano, sendo a planta de Valladolid, na Espanha, a de maior capacidade (200.000 t/ano). Em 2008 existiam 21 plantas construídas ou em construção com essa tecnologia no mundo (RIS INTERNATIONAL, 2005).

Figura 8 - Representação do Reator Laran



Fonte: STRABAG, 2015.

3.8.4. Sistema de garagem (Túneis de Metanização)

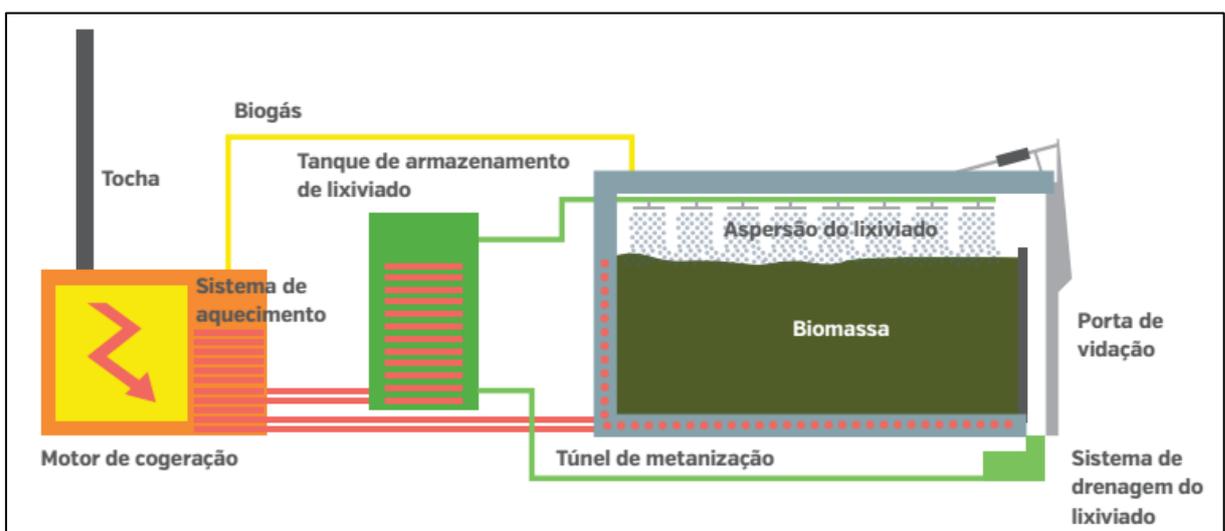
O sistema de metanização tipo garagem se caracteriza pela sua construção em forma de túneis, ou garagens, operando em bateladas sequenciais, ou seja, os túneis são sequencialmente abertos, esvaziados e alimentados com FORSU. Trata-se de um processo de digestão anaeróbia via extrasseca, operado na faixa mesofílica, sendo o reator disposto na horizontal, de formato retangular, construído geralmente em concreto armado (SNSA b, 2015).

O sistema de alimentação e extração é realizado via pá carregadeira. O resíduo permanece no interior do reator pelo período total de metanização. Como sistema auxiliar, realiza-se a recirculação do lixiviado, que é direcionado a um reator de líquido para posterior reintrodução no processo, via aspersão no material em digestão. No interior dos túneis de metanização não existe sistema de agitação, sendo o processo otimizado com a recirculação do lixiviado (SNSA b, 2015).

Terminado o processo de metanização, ar ambiente é injetado no túnel reator de forma a eliminar o metano presente, minimizando riscos de explosão durante a abertura do reator para a retirada do material digerido. Após a extração, o material digerido é encaminhado para compostagem, onde o processo de estabilização é finalizado (SNSA b, 2015). A representação do sistema encontra-se na figura 9.

O grande diferencial deste sistema é a possibilidade de utilização de resíduo com elevado teor de impróprios (plásticos, vidros, madeira pedras e outras). Devido ao fato do reator ser continuamente aberto para remoção do material digerido, não há possibilidade de acúmulo de impróprios no seu interior, fato que ocorre com frequência nas tecnologias de fluxo pistão e prejudica o funcionamento (SNSA b, 2015).

Figura 9 - Representação do Sistema de Garagem



Fonte: SNSA b, 2015

As principais características operacionais das diferentes tecnologias estão resumidas na tabela 1, comparando-se vantagens e desvantagens de cada uma.

Tabela 1 - Comparação das Características de Tecnologias de Metanização

PROCESSO / TECNOLOGIA	CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS
Processo Dranco	<p>Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> » Agitação via recirculação por bombas hidráulicas; » Inexistência de elementos internos ao reator, reduzindo problemas e demanda de manutenção; » Existência de departamento de pesquisa e desenvolvimento competente, ativo em publicações e melhorias de processo. <hr/> <p>Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> » Necessidade de correção do teor de matéria seca com adição de insumos que necessitam ser adquiridos (normalmente terras diatomáceas); » Necessidade de constante recirculação do material em digestão para impedir a sedimentação dos mesmos; » Sistema de introdução do material via bombas do tipo pistão, que necessitam limpeza manual diária; » Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento.
Processo Kompogas	<p>Pontos Fortes</p> <ul style="list-style-type: none"> » Sistema de agitação eficiente, apesar da presença de elementos mecânicos internos; » Experiência no mercado; » Experiência com diferentes tipos de substratos. <hr/> <p>Pontos Fracos</p> <ul style="list-style-type: none"> » Sistema de agitação mecânico e interno ao reator, sendo que a

	<p>manutenção dos mesmos requerer a interrupção do processo;</p> <p>» Possibilidades de falhas no sistema de extração, sendo necessário um procedimento manual de desobstrução da tubulação;</p> <p>» Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento.</p>
Processo Valorga	<p>Pontos Fortes</p> <p>» Engenharia do reator permite a instalação de plantas com elevada capacidade instalada;</p> <p>» Agitação pneumática, sem elementos mecânicos;</p> <p>» Maior simplicidade construtiva que as tecnologias secas tradicionais.</p> <hr/> <p>Pontos Fracos</p> <p>» Sistema de agitação via injeção de biogás comprimido na parte inferior, demandando limpeza manual diária para desobstrução dos canais de injeção;</p> <p>» Necessidade de constante recirculação do material em digestão, para impedir a sedimentação dos mesmos;</p> <p>» Sistema de introdução do material via bombas do tipo pistão, que necessitam limpeza manual diária;</p> <p>» Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento.</p>
Processo Laran	<p>Pontos Fortes</p> <p>» Sistema de extração eficiente;</p> <p>» Experiência no mercado.</p> <hr/> <p>Pontos Fracos</p> <p>» Sistema de agitação mecânico e interno ao reator, sendo que a manutenção dos mesmos requer interrupção do processo;</p> <p>» Sistema de extração por bomba de vácuo, necessitando tanques e equipamentos adicionais;</p>

	» Níveis muito altos de impurezas no RSU exigem pré-tratamento.
Túneis de metanização	Pontos Fortes <ul style="list-style-type: none"> » Índices de desempenho comprovados em escala real; » Robustez do processo biológico; » Suporta maiores teores de impróprios se comparada com outras tecnologias; » Utilização de grade lateral e canaletas ao longo dos túneis para auxiliar na drenagem do lixiviado.
	Pontos Fracos <ul style="list-style-type: none"> » Deficiência no processo de aeração do material; » Emissões fugitivas de metano.

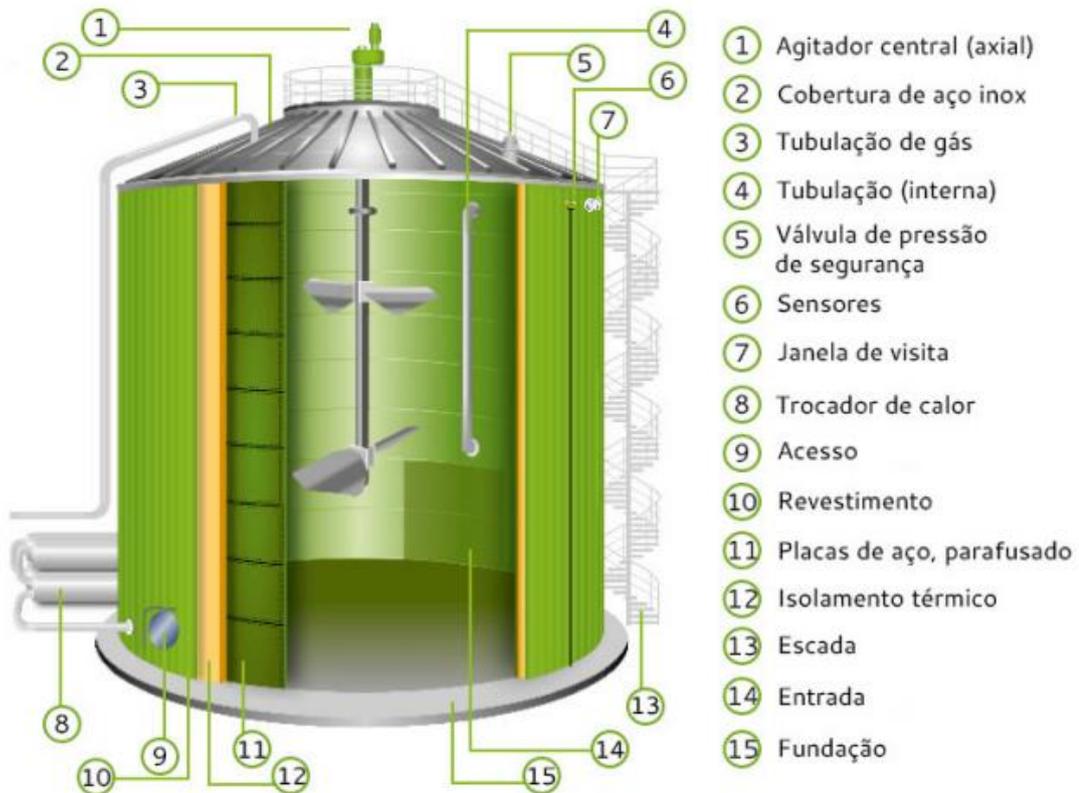
Fonte: SNSA b, 2015.

3.9. DIMENSIONAMENTO DE BIODIGESTORES

Os parâmetros de dimensionamento diferem conforme o tipo de biodigestor escolhido, mas todos têm em comum o fato de seu volume útil ser dado pela relação entre a carga orgânica recebida e o tempo de retenção, ou seja, qual a quantidade de afluente e por quanto tempo ela permanecerá no reator (SPERLING, 2013).

Para escolha do modelo utilizado neste trabalho, foi levada em consideração a dificuldade de operação das tecnologias de metanização seca, além da necessidade de importação dos equipamentos, o que encareceria a instalação. Desta forma, como o resíduo é proveniente de um grande gerador e praticamente isento de impurezas (pedras, metais, plásticos) optou-se pelo modelo CSTR, atuando em via úmida, dado teor natural de umidade do resíduo. Um reator CSTR completo é ilustrado na Figura 10:

Figura 10 - Reator CSTR versão avançada¹²



Fonte SNSA a, 2015, p. 41 apud Farmatic GmbH.

Como os reatores CSTR têm seu uso mais difundido nos setores de Engenharia Química, buscou-se nesta área de conhecimento os parâmetros necessários para seu dimensionamento. FOGLER (2013), afirma que a concentração e volume dentro do reator devem permanecer constantes. Para isto, a vazão de entrada deve ser equivalente a vazão de saída, considerando para isto a taxa de reação e quanto material fica retido, ou seja, o momento em que a reação entra em equilíbrio. O material retido deve possuir baixa densidade e permanecer em mistura para permitir a homogeneização, e as paredes devem possuir o isolamento térmico e ao ar necessários para o processamento adequado da reação.

¹² Versão avançada: usada no tratamento de resíduos industriais com maior valor energético, demandando maiores investimentos, devido à maior velocidade do processo e da elevada suscetibilidade a perturbações. O investimento referido, quando se trata de sistema CSTR, inclui gastos com automação para monitoramento e controle, como também a maior qualidade do material.

3.9. CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O Brasil possui imensa riqueza em fontes de biomassa, bem como de tecnologias adequadas para cada um dos tipos disponíveis, o que poderia diversificar nossa matriz energética, reduzindo custos e impactos ambientais das energias hídrica e térmica.

A biodigestão é uma alternativa bastante viável para geração descentralizada de energia, aliada ao tratamento de resíduos, tornando-se bastante útil em termos sanitários e energéticos.

O uso de inóculos tende a reduzir o tempo de retenção nos biodigestores, promovendo maior eficiência no uso da tecnologia e consequente redução de custos.

Para a geração de metano, é necessário garantir as condições adequadas ao processamento da reação, a qual é realizada por bactérias extremamente sensíveis a variações térmicas e a presença de oxigênio, além de substâncias inibidoras.

O Brasil está em boa posição quando se trata do uso de biodigestores para o tratamento de resíduos agropecuários, tem pouca expressividade no tratamento de resíduos industriais e deixa a desejar no uso de biodigestores para tratamento de resíduos orgânicos urbanos. Em todas as alternativas, o potencial de geração de biogás é promissor, e os ganhos financeiros devido a sua conversão em energia poderiam estimular a difusão da tecnologia.

As tecnologias existentes para o tratamento da FORSU estão bem consolidadas, porém seu uso ainda não está difundindo no Brasil, seja pela falta de políticas públicas de tratamento dos RSU, seja pela ausência de empresas representantes da tecnologia em solo nacional. Todavia, o mercado é bastante promissor, tendo como aliada a Política Nacional de Resíduos Sólidos e a crescente demanda por eletricidade de fontes renováveis.

6. METODOLOGIA

4.1. CARACTERIZAÇÃO E MEDIÇÃO DO SUBSTRATO

O substrato utilizado foi proveniente do Restaurante Universitário campus A. C. Simões, que atende a comunidade acadêmica. Este material é composto de resíduos orgânicos da preparação de alimentos e de restos deixados nos pratos. Não foi feita caracterização específica para os tipos de alimentos, pois, de acordo com ALIBARDI E COSSU (2015, p. 148), este tipo de caracterização tende a dificultar a tomada de conclusões a respeito do potencial de geração de biogás dos resíduos, dada à impossibilidade de repetição precisa das proporções dos diferentes alimentos. Além do que, a variabilidade dos alimentos apresentados em peso úmido leva a diferentes produções de biogás, seja por apresentarem melhores condições de operação ou simplesmente por um determinado tipo de alimento gerar mais gás que outro. Ao invés disto, o estudo foi baseado no teor de sólidos existente no substrato.

Através de pesquisa com as nutricionistas responsáveis pelo RU, identificou-se que a geração dos resíduos é dada em duas etapas. A primeira consiste nos resíduos da preparação das refeições, notadamente o almoço, portanto, no período da manhã. Este material é composto predominantemente por cascas, talos, sementes e folhas de vegetais, vísceras e, em menor quantidade, restos de sopa, macaxeira, inhame, batata doce, cuscuz e carnes. Seu descarte é feito por volta das 11h, e o material é coletado por terceiros para alimentação de suínos. A segunda parte é composta pelas sobras de alimentos, tanto dos servidos quanto dos deixados nos pratos pelos estudantes. Sua composição é dada por feijão, arroz, macarrão, farofa, verduras, frutas e carnes. Sua coleta é feita por volta das 14h, para os mesmos fins. Os resíduos gerados durante a noite ficam armazenados (Figuras 11 e 12) e são misturados aos da preparação de alimentos.

Figura 11 - Armazenamento de resíduos



Fonte: a autora, 2016

Figura 12 - Armazenamento de resíduos



Fonte: a autora, 2016

Sabendo desta dinâmica, foram realizadas duas pesagens diárias, nos horários de geração, afim de quantificar o resíduo. Esta ação foi realizada durante duas semanas, totalizando vinte pesagens (duas vezes ao dia, por dez dias úteis), a fim de obter material representativo da variação de cardápio e hábitos de geração. A cada pesagem foram coletadas amostras de aproximadamente 1kg, as quais foram sendo armazenadas em congelador, a fim de evitar degradação e perda de substâncias.

Para determinação do valor médio de geração, foram somados os valores diários e divididos pelo número de amostras.

Ao fim da coleta, o substrato foi misturado (figura 13) e triturado num liquidificador simples (figura 14), para reduzir o tamanho das partículas de material e aumentar a área superficial para atuação dos microrganismos, formando uma pasta homogênea, conforme os métodos propostos por SILVA (2014, p. 28) e CAMPUZANO e GONZALEZ-MARTINEZ (2015, p. 248). Não foi realizada mistura por quarteamento ou método similar devido a já homogeneização realizada pelo liquidificador, apenas realizou-se agitação do material triturado para a homogeneização completa.

Figura 13 – Descongelamento e preparação do substrato para trituração



Fonte: a autora, 2016

Figura 14 - Trituração do substrato



Fonte: a autora, 2016.

A fim de obter um material demonstrativo das características de operação do reator, a pasta de resíduo foi misturada ao inóculo, sendo utilizados para tal os dejetos suínos provenientes de criação no Centro de Ciências Agrárias – CECA, UFAL, na proporção de 10% em volume, conforme BARCELOS (2009, p. 39).

Realizou-se a correção do pH, sendo o inicial em torno de 4, e o final próximo a 7 (neutro), utilizando para tal solução de NaOH existente no laboratório de saneamento ambiental, em quantidade suficiente até atingir o pH desejado.

Determinou-se o teor de sólidos totais e o teor de sólidos voláteis presentes na mistura de pasta de resíduos e inóculo, tal como deve ocorrer no digestor, pois os teores de sólidos são determinantes para a estimativa de volume de biogás produzido. As análises foram realizadas conforme a metodologia do Laboratório de Saneamento Ambiental – CTEC, UFAL, a qual segue o *Standard Methods*. Seguindo a mesma referência metodológica, foi determinado também o parâmetro físico-químico de DQO (demanda química de oxigênio), sendo uma forma de mensurar o teor de matéria orgânica presente no afluente e a eficiência do tratamento, com a medição do mesmo parâmetro no digerido. (ALIBARDI e COSSU, 2015, p. 148).

De posse do valor da massa de resíduos, foi determinada a densidade média aparente, através da relação de densidade (equação 1), utilizando para tal um béquer e uma balança de precisão, realizando a medição da massa correspondente ao volume de 10 mL da mistura de pasta de resíduos e inóculo:

$$\rho = \frac{m}{v} \quad \text{equação 1: densidade aparente}$$

Onde:

ρ = densidade aparente

m = massa da mistura de resíduos e inóculo

v = volume ocupado pela mistura

4.2. DIMENSIONAMENTO DO BIODIGESTOR

Sabendo a massa de resíduos e sua densidade, calculou-se o volume de resíduos a serem processados no biodigestor. De acordo com a equação adaptada de FOGLER (2013, p. 34) para o dimensionamento de reatores CSTR, temos (equação 2):

$$V = \frac{va * t}{(-ra)} \quad \text{equação 2: volume do reator CSTR}$$

Na qual:

V = volume do reator

va = vazão de entrada do efluente

t = tempo de retenção

$-ra$ = fator de saída

Visando uma estrutura com menor área de contato, a fim de reduzir as trocas de calor com o ambiente, ao mesmo tempo em que se maximiza seu volume, o formato ideal seria o esférico; porém, considerando aspectos construtivos, optou-se por um digestor de formato cilíndrico reto, tendo seu volume definido pela equação 3:

$$v = \pi * h * r^2 \quad \text{equação 3: volume do cilindro}$$

Onde:

v = volume do cilindro

h = altura do cilindro

r = raio da base do cilindro

Sabendo-se que, no cilindro reto, diâmetro (D) = (h) altura, e possuindo o valor do volume, dado pela equação 2, encontram-se assim os valores de h (altura) e r (raio), que foram arredondados a fim de facilitar aspectos construtivos, conforme a equação 4:

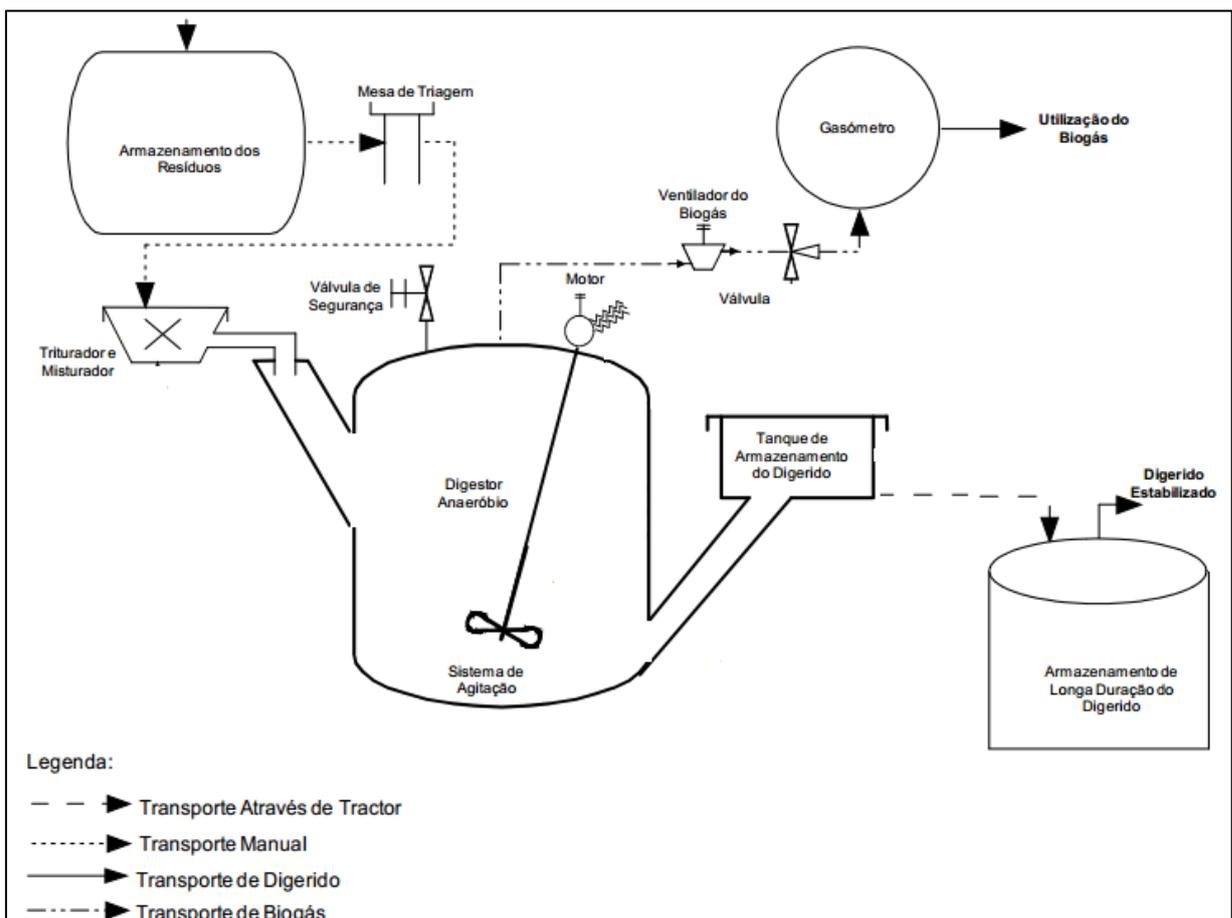
$$V = \pi * r^2 * 2r \Rightarrow V = 2 * \pi * r^3 \Rightarrow r = \left(\frac{V}{2 * \pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{equação 4: raio do reator}$$

4.3. ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE METANO

De acordo com NEVES (2008, p. 967) o potencial de geração de metano a partir dos resíduos de restaurante varia de 0,40 a 0,49 m^3 CH_4 /kg SV. De posse dos valores de sólidos voláteis, estimou-se o volume de gás através desta relação.

A representação do sistema encontra-se na figura 15.

Figura 15 - Representação esquemática do sistema de biodigestão



Fonte: adaptado de CARRILHO (2012, p. 81)

6.4. PROPOSTAS DE UTILIZAÇÃO DO METANO

6.4.1. Cenário A: Uso como gás de cozinha

Na ausência de dados sobre o consumo de GLP na cozinha do restaurante universitário, estimou-se o valor através da equação:

$$\text{quantidade de refeições servidas diariamente} * \text{período analisado} * \\ \text{consumo médio de GLP por refeição} = \text{consumo mensal de GLP}.$$

Onde o consumo médio de GLP = 0,00243 kg/ refeição (SOUZA, 2012).

Para a conversão em biogás, utilizou-se a equação:

$$\text{quantidade de GLP consumida no período} / \text{densidade do GLP} * \\ \text{relação entre GLP e biogás} = \text{quantidade de biogás consumida por mês}.$$

Onde:

Densidade do GLP = 2,5 m³/Kg (SUPRAGÁS, 2017)

E 1 m³ biogás = 1,5 m³ GLP (POMPERMAYER e PAULA JÚNIOR, 2003).

Para a estimativa de custos, utilizou-se a equação:

$$\text{Consumo de GLP} / \text{Quantidade de GLP por botijão} * \text{preço de cada botijão} = \\ \text{Valor a ser economizado com o uso do biogás}.$$

6.4.2. Cenário B: Conversão em Eletricidade

Para a conversão do biogás em eletricidade, utilizou-se o fator de conversão apresentado em FEN (2013): 0,84 kwh/m³ de metano:

$$\text{Eletricidade} = \text{fator de conversão} \left[\frac{\text{kwh}}{\text{m}^3} \right] * \text{quantidade de metano gerada} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{mês}} \right]$$

E, para estimar a economia financeira com o uso do biogás como fonte de energia, utilizou-se o valor do kwh apresentado pela ELETROBRÁS (2016) na fatura do mês de outubro = R\$ 0,70, multiplicando-se este valor pela geração de eletricidade encontrada na equação anterior.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES:

5.1. MEDIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS

A partir da pesagem dos resíduos do restaurante universitário, obtiveram-se os valores apresentados na tabela 2:

Tabela 2 - Massa de resíduos coletados no RU

Data	Dia	Manhã (preparo) [kg]	Tarde (sobras) [kg]	Soma [kg/dia]
02/ago	terça	119,2	221,7	340,9
03/ago	quarta	337,9	257,4	595,3
04/ago	quinta	200,0	198,0	398,0
05/ago	sexta	386,15	129,3	515,5
09/ago	terça	437,7	147,3	585,0
12/ago	sexta	186,1	198,1	384,2
15/ago	segunda	372,4	390,7	763,1
17/ago	quarta	343,7	141,6	485,3
18/ago	quinta	327,7	197,8	525,5
22/ago	segunda	128,7	221,9	350,6
		2839,55	2103,66	4943,21
Total [kg/10 dias]				4943,21
Total médio [kg/dia]				494,3

Fonte: a autora

Observa-se que a maior parte dos resíduos é gerada durante a preparação dos alimentos (período da manhã), e que o descarte oriundo de sobras é bastante expressivo, necessitando de ações de conscientização perante a comunidade acadêmica para redução do desperdício, incluindo estudantes e colaboradores do RU, os quais servem porções superiores à capacidade de saciedade dos estudantes, seja a pedido destes ou por falta de treinamento adequado.

A partir das análises feitas à mistura de pasta de resíduos e inóculo, realizadas no Laboratório de Saneamento Ambiental do CTEC – UFAL, obtiveram-se os valores de parâmetros físico-químicos apresentados na tabela 3:

Tabela 3 - Parâmetros físico-químicos

Parâmetros	Valores
sólidos totais [mg/L]	144.833,33
sólidos voláteis [mg/L]	116.583,33
DQO [mg/L]	34.893,77

Fonte: a autora

Observa-se que o teor médio de sólidos voláteis (linha 2) corresponde a 80% dos valores de sólidos totais (linha 1) e a 10% da massa de resíduos (tabela 2, penúltima linha), valores compatíveis com os encontrados na literatura, em BARCELOS (2009, p. 43).

5.2. ESCOLHA E DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE BIODIGESTÃO

Para escolha do modelo utilizado neste trabalho, foi levada em consideração a dificuldade de operação das tecnologias de metanização seca, além da necessidade de importação dos equipamentos, o que encareceria a instalação. Desta forma, como o resíduo é proveniente de um grande gerador e praticamente isento de impurezas (pedras, metais, plásticos) optou-se pelo modelo CSTR, atuando em via úmida, dado teor natural de umidade do resíduo.

Utilizando a equação 1, encontrou-se que a densidade aparente da mistura entre substrato e inóculo é igual a 1076 g/L. Multiplicando este valor pela massa de resíduos (500 kg/dia), levando em consideração as adequadas conversões de unidades, obteve-se o volume do material a ser digerido: 0,465 m³/dia.

Aplicando estes valores na equação 2, temos o volume do biodigestor:

$$V_{biodigestor} = \frac{0,465 \left[\frac{m^3}{dia} \right] * 30 \left[\frac{dias}{1 \text{ mês}} \right]}{(1)} = 13,941 \text{ m}^3/\text{mês}$$

Onde 30 dias é o tempo de retenção, conforme CARRILHO (2012, p. 22), e 1 é a taxa de saída, visto que a saída do reator CSTR é constante e equivalente à entrada a partir do fim da reação (FOGLER, 2013, p. 10), que só deve ser atingido após o período de retenção.

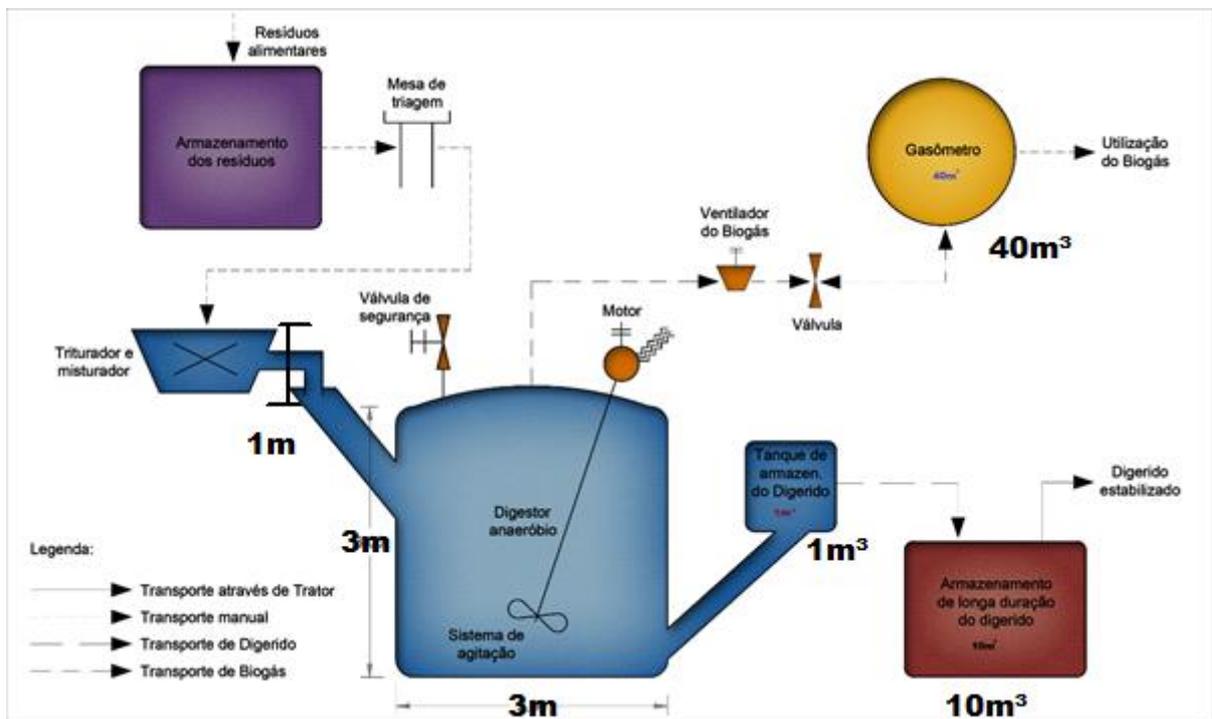
Para a estimativa do volume de metano a ser gerado, utilizou-se a taxa máxima de conversão apresentada em NEVES (2008, p. 967): $0,49 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg SV}$. Observando a tabela 3, sabemos que os sólidos voláteis correspondem a 10% do total de resíduos, ou seja, $54,17 \text{ kg SV}/\text{dia}$, ou ainda, $1625,23 \text{ kg SV}/\text{mês}$ durante o tempo de retenção. Multiplicando este valor pela taxa de conversão, temos que o volume de metano a ser gerado é de:

$$V_{\text{metano}} = 1625,23 * 0,49 = 796,36 \text{ m}^3/\text{mês}$$

Como estes valores foram obtidos em condições normais de temperatura e pressão, é possível reduzir este volume ao aplicar a lei dos gases ideais ($\text{Pressão}=\text{Volume}*\text{Temperatura}$) comprimindo a uma pressão de 20 MPa (INMETRO, 2007, p. 2), obtendo um volume de $4,03 \text{ m}^3$ de metano.

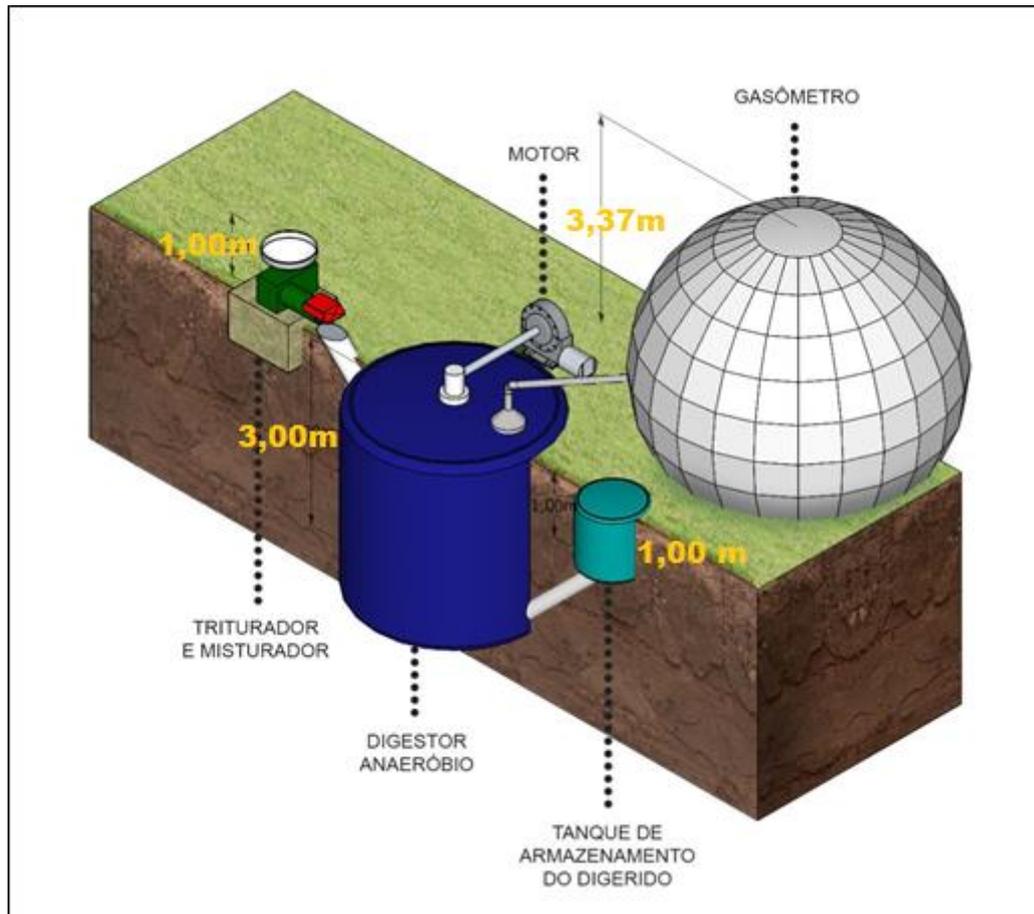
As dimensões do sistema encontram-se ilustradas na Figura 16 e a representação tridimensional na Figura 17.

Figura 16 - Representação esquemática com dimensões



Fonte: adaptado de CARRILHO (2012, p. 81) com dados da autora.

Figura 17 - Representação tridimensional do sistema



Fonte: Estúdio Aurora Maquete e renderização, sob projeto da autora.

5.3. ÁREA A SER UTILIZADA E PROPOSTA DE LOCALIZAÇÃO

Somando as áreas ocupadas pelos equipamentos de geração de gás, temos:

$$1 + \pi * 3^2 + 1 + \pi * (3,4)^2 = 66,6 \text{ m}^2.$$

Adicionando a isto as conexões e espaços entre equipamentos (CAMAROTTO, 2006), temos uma adição de 10% na área, estimando o espaço total em 75 m², considerando apenas os equipamentos de produção de biogás. Se o gás for utilizado na cozinha, não há necessidade de acréscimo de área. Caso opte-se por convertê-lo em eletricidade, deve-se adicionar a área ocupada pelo motor de conversão, a qual será definida pelo modelo escolhido. Propõe-se que o sistema seja instalado em terreno adjacente à fonte geradora, conforme apresentado na figura 18:

Figura 18 - Local proposto para o sistema de biodigestão



Fonte: Google maps (2016) com marcação da autora.

7.4. PROPOSTAS DE UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PRODUZIDO

7.4.1. CENÁRIO A – COMBUSTÃO DIRETA

O Restaurante Universitário do Campus A. C. Simões atende diariamente cerca de 1400 comensais, com almoço e jantar (UFAL, 2017). Considerando um consumo de 0,00243 kg GLP/refeição (SOUZA, 2012), temos um consumo de 6,8 kg de GLP por dia, ou 204,2 kg GLP/ mês:

$$1400 [\text{refeições}] * 2 \left[\frac{\text{refeições}}{\text{dia}} \right] * 30 [\text{dias}] * 0,00243 \left[\frac{\text{kg GLP}}{\text{refeição}} \right] = 204,2 \left[\frac{\text{kg GLP}}{\text{mês}} \right].$$

Em termos de biogás, isto equivale a 54,4 m³/ mês:

$$204,2 \left[\frac{\text{kg GLP}}{\text{mês}} \right] / 2,5 \left[\frac{\text{kg GLP}}{\text{m}^3 \text{GLP}} \right] * 1,5 \left[\frac{\text{m}^3 \text{GLP}}{\text{m}^3 \text{biogás}} \right] = 54,4 \left[\frac{\text{m}^3 \text{biogás}}{\text{mês}} \right].$$

Fontes: 1 kg GLP = 2,5 m³ (SUPRAGÁS, 2017); 1 m³ biogás = 1,5 m³ GLP (POMPERMAYER e PAULA JÚNIOR, 2003).

Considerando o preço do botijão com 13 kg de gás de cozinha em torno de 50 reais (G1, 2016), temos uma economia mensal estimada em 785,08 reais/mês:

$$204,12 \left[\frac{\text{kg GLP}}{\text{mês}} \right] / 13 \left[\frac{\text{kg GLP}}{\text{botijão}} \right] * 50 \left[\frac{\text{reais}}{\text{botijão}} \right] = 785,08 \left[\frac{\text{reais}}{\text{mês}} \right].$$

Para a geração de metano de 796,4 m³, em um mês será gerado biogás suficiente para atender a 15 vezes a demanda do restaurante, podendo o acréscimo ser utilizado para outros fins, como a geração de eletricidade.

7.4.2. CENÁRIO B - CONVERSÃO EM ELETRICIDADE

De acordo com FEN (2013, p. 5) 1 m³ de metano equivale a 0,84 kwh de eletricidade. Utilizando esta relação, temos que o potencial de geração de eletricidade mensal do sistema é de:

$$E = 0,84 \text{ kwh/m}^3 * 796,36 \text{ m}^3/\text{mês} = 668,95 \text{ kwh/mês}$$

Este valor equivale ao consumo mensal de cinco residências, ou seja, 20 pessoas.

O consumo médio de eletricidade no Campus A. C. Simões, incluindo o hospital universitário, é de 942610 kWh (Eletrobrás, outubro de 2016). Logo, o biodigestor tem potencial para atender a 0,07% da demanda, o que, considerando o custo médio do kWh em R\$ 0,70 (Eletrobrás, outubro de 2016), proporciona uma redução de custos de R\$ 468,3/mês.

7.5. ESTIMATIVA DE CUSTOS

O sistema de biodigestão inicia-se pela trituração dos resíduos, a fim de reduzir seu tamanho e aumentar a área superficial, facilitando a ação das bactérias. Em seguida, o triturado é enviado para o biodigestor, que é um reservatório anaeróbio, sugerindo-se a utilização de uma caixa d'água tipo tanque com tampa de rosca (figura 19). O gás deve ser armazenado em um reservatório específico, sugerindo o tipo denominado gasômetro, formado por uma manta de pvc de alta resistência (figura 20). O material tratado vai para um reservatório do digerido, sugerindo a utilização de caixa d'água comum de mil litros (figura 21), e após isto, vai para um reservatório de longa duração para estabilização do digerido, que pode ser também uma caixa d'água comum com volume de dez mil litros (figura 22). Além destes, é necessário um motor para homogeneização do material dentro do digestor, além do gerador para conversão do biogás em eletricidade (figura 23).

Figura 19 - Biodigestor



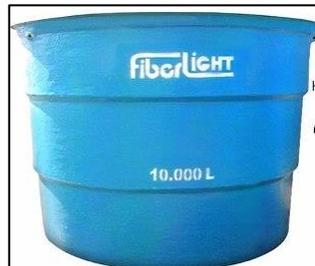
Caixa d'água fortlev 20000 L em polietileno = R\$ 11.900,00 (Mercado Livre, 2016)

Figura 20 - Tanque de armazenamento do digerido



Caixa d'água fortlev 1000 L em polietileno = R\$ 299,00 (Mercado Livre, 2016)

Figura 21 - Tanque de longa duração do digerido



Caixa d'água fiberlight 10 000L em fibra de vidro = R\$ 2.799,00 (Mercado Livre, 2016)

Figura 22 - Gasômetro



Instalado sobre uma base de concreto e é constituído por uma membrana exterior, uma interior, e outra inferior. Preço: R\$ 70.000,00 (Mercado Livre, 2016)

Figura 23 - Motor de conversão

Grupo Gerador De Energia MWM 100 Kva. Preço: R\$ 42.000,00 (Mercado Livre, 2016)

Para o cenário A, temos a estimativa de custo das principais unidades apresentada na Tabela 4:

Tabela 4 - Custos dos principais equipamentos - A

	Equipamento	Preço
Biodigestor	Caixa d'água Fortlev 20000L em polietileno	R\$ 11.900,00
Armazenamento do digerido	Caixa d'água Fortlev 1000L em polietileno	R\$ 299,00
Armazenamento de longa duração	Caixa d'água Fiberlight 10000L em fibra de vidro	R\$ 2.799,00
Gasômetro	Membrana de PVC	R\$ 70.000,00
	Total equipamentos	R\$ 84.998,00
	Total + mão de obra e acessórios	R\$ 127.497,00

Fonte: Mercado Livre, 2016.

Acrescentando 50% do valor da mão de obra, mais os acessórios (tubos e conexões) (ARQUITECASA, 2016), estima-se um investimento inicial de 130 mil reais.

Para o cenário B, com o biogás utilizado para geração de eletricidade, acrescenta-se o custo do motor de conversão, modelo específico para biogás, sem necessidade de tratamento prévio:

Tabela 5 - Custos dos principais equipamentos - B

	Equipamento	Preço
Biodigestor	Caixa d'água Fortlev 20000L em polietileno	R\$ 11.900,00
Armazenamento do digerido	Caixa d'água Fortlev 1000L em polietileno	R\$ 299,00
Armazenamento de longa duração	Caixa d'água Fiberlight 10000L em fibra de vidro	R\$ 2.799,00
Gasômetro	Membrana de PVC	R\$ 70.000,00
Motor de conversão	Grupo gerador de energia 100 kVa MWM	R\$ 42.000,00
	Total equipamentos	R\$ 126.998,00
	Total + mão de obra e acessórios	R\$ 190.497,00

Fonte: Mercado Livre, 2016.

Desta forma, considerando novamente o acréscimo de 50% do valor da mão de obra, mais os acessórios (tubos e conexões) (ARQUITECASA, 2016), estima-se um investimento inicial de 200 mil reais.

5.5. VIABILIDADE

Como a estimativa de economia com a implantação do uso do biodigestor varia entre 500 e 800 reais/mês (combustão e geração de eletricidade, respectivamente), a recuperação do investimento inicial se daria em até 11 anos, considerando apenas a redução dos custos com a fatura de energia elétrica e uma taxa de juros de 13,5% a.a. (BCB, 2016).

Hoje, os resíduos produzidos no restaurante são doados para alimentação animal, constituindo riscos de patogenicidade para os suínos que os consomem, bem como para os seres humanos que venham a se alimentar destes. Além disto, esta prática não beneficia a comunidade acadêmica, consistindo apenas de uma atividade de gestão dos resíduos que impede o seu descarte em local inadequado.

Com o uso do biodigestor, além da redução de custos com eletricidade, agrega-se valor a estes resíduos, podendo participar do comércio de créditos de carbono, devido à utilização do metano gerado e seu não lançamento para a atmosfera. Além disto, há a possibilidade de comercialização do material digerido, a tarifas módicas, como biofertilizante.

Além disto, o biodigestor proporciona uma fração de autonomia energética para a comunidade acadêmica, reduzindo a total dependência da rede convencional de abastecimento elétrico.

8. CONCLUSÕES

Após a realização deste trabalho, conclui-se que o restaurante universitário do campus A. C. Simões descarta cerca de meia tonelada de resíduos orgânicos por dia, material que hoje é utilizado na alimentação de suínos. Estes resíduos apresentam um potencial de geração de biogás que extrapola em 15x o consumo mensal do RU para preparação de alimentos, ou, um potencial de geração de eletricidade de quase 700 kwh, quantidade suficiente para atender a 0,07% da demanda do Campus, um equivalente populacional de cinco residências, ou 20 habitantes. Esta geração poderia ser incrementada com o aproveitamento energético do metano proveniente do tratamento do esgoto sanitário do Campus, aumentando consideravelmente o suprimento de eletricidade.

Para isto, é necessário investir na construção de um biodigestor, cujo modelo recomendado é o reator de fluxo contínuo com agitação (CSTR), devido a sua operação simples e características hidráulicas compatíveis com a do substrato.

Nota-se ainda que o investimento necessário estimado é da ordem de 200 mil reais, gerando uma economia de até 800 reais por mês, levando ao retorno do investimento em até 11 anos, o que viabiliza sua construção. Sugere-se que seja feita uma análise mais aprofundada da viabilidade econômica, sendo incontestável a viabilidade ambiental, dada a redução do potencial poluidor do resíduo, seja através de contaminação de animais por patógenos ou pela emissão de gases de efeito estufa.

Recomenda-se a construção de uma planta piloto, bem como realização de análises ao final do tratamento para avaliar sua eficácia, além da definição da destinação final do digerido, a qual se recomenda uso em áreas de cultivo da universidade, especialmente no Centro de Ciências Agrárias.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE: Associação Brasileira das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2013. Disponível em: <<http://goo.gl/v7uo3o>> Acesso em: 01/04/2015.
- AUSTERMANN, S.; ARCHER, E.; WHITING, K. J. **Comercial Assessment - Anaerobic Digestion Technology for Biomass Projects, Juniper for Renewables East**. Juniper for Renewable East, 2007. Disponível em: <[http://www.biomassenergycentre.org.uk/pls/portal/docs/PAGE/RESOURCES/REF_LIB_RES/PUBLICATIONS/RENEWABLES%20EAST%20-%20ANAEROBIC%20DIGESTION%20\(FULL%20REPORT\).PDF](http://www.biomassenergycentre.org.uk/pls/portal/docs/PAGE/RESOURCES/REF_LIB_RES/PUBLICATIONS/RENEWABLES%20EAST%20-%20ANAEROBIC%20DIGESTION%20(FULL%20REPORT).PDF)> Acesso em: 15/11/2016.
- ALIBARDI, L.; COSSU, R. Composition Variability of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Effects on Hydrogen and Methane Production Potentials. **Waste Management** vol. 36, p. 147-155. México: Elsevier, 2015.
- AMORIM, E. L. C. **Efeito da Concentração de Glicose e da Alcalinidade na Produção de Hidrogênio em Reator Anaeróbico de Leito Fluidificado**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2009.
- ANDREOLI, C. V.; FERREIRA, A. C.; CHERNICHARO, C. A.; BORGES, E. S. M. Secagem e Higienização de Lodos com Aproveitamento do Biogás: In CASSINI, S. T. (Coord.). **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos com Aproveitamento do Biogás**. Vitória, ES: RiMa, 2003, p. 121 – 165.
- ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**, 2ª ed. 2005. Disponível em: <<http://goo.gl/KAogT7>> Acesso em: 30/10/2014.
- ARCADIS Tetraplan. Produto 6 – Resumo Executivo. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD. Ministério do Meio Ambiente – MMA. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://goo.gl/dVCmvq>> Acesso em: 15/02/2015.
- ARQUITECASA. **Simulador de Reforma e Construção**. Disponível em: <<http://simulador.arquitecasa.com.br/>> Acesso em: 11/06/2016.
- BARBOSA, J. H. **Modelo de um Biosistema Integrado a Partir da Energia da Biomassa de Resíduos de Suínos**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Alagoas, 2016.
- BARCELOS, B. R. **Avaliação de Diferentes Inóculos na Digestão Anaeróbia da Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Domésticos**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, 2009. Disponível em: <<http://goo.gl/dwYlvZ>> Acesso em: 01/04/2015.

BCB = Banco Central do Brasil. **Histórico das taxas de juros**. Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/Pec/Copom/Port/taxaSelic.asp#notas>> Acesso em: 01/02/2017.

BRASIL, **Lei 12305, de 02 de agosto de 2010: Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Disponível em: <<http://goo.gl/8Xoy66>> Acesso em: 01/04/2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA) a. **Tecnologias de Digestão Anaeróbia com Relevância Para o Brasil: Substratos, Digestores e Uso de Biogás**. Probiogás. Brasília, DF. Ministério das Cidades, 2015. Disponível em: < <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-tecnologias-biogas.pdf>> Acesso em: 18/07/2016.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA) b. **O Estado da arte da Tecnologia de Metanização Seca**. Probiogás. Brasília, DF. Ministério das Cidades, 2015. Disponível em: < <http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/probiogas-metanizacao-rsu.pdf>> Acesso em: 18/07/2016.

CAMAROTTO, J.A. **Projeto de Unidades Produtivas**: Apostila. Universidade Federal de São Carlos, 2006. Disponível em: <http://www.simucad.dep.ufscar.br/simucad/Proj_Unid_Produtivas_2009/apostila_projeto_fabrica.pdf> Acesso em: 31/01/2017.

CAMPUZANO, R.; GONZÁLEZ-MARTINÉZ, S. Extraction of Soluble Substances From Organic Solid Municipal Waste to Increase Methane Production. **Bioresource Technology** vol. 178, p. 247-253. Pádova: Elsevier, 2015.

CARRILHO, N. F. Q. **Valorização de Bio-Resíduos Alimentares por Digestão Anaeróbia Descentralizada – Caso de Estudo: Campus da FCT/UNL**. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, 2012. Disponível em: <https://run.unl.pt/bitstream/10362/7975/1/Carrilho_2012.pdf> Acesso em: 09/10/2016

CASSINI, S. T.; VAZOLLER, R. F.; PINTO, M. T. Hidrólise e Atividade Anaeróbia em Lodos: In CASSINI, S. T. (Coord.). **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos com Aproveitamento do Biogás**. Vitória, ES: RiMa, 2003, p. 1 - 21.

CETESB. **Reatores**. Disponível em: <<http://biogas.cetesb.sp.gov.br/biogas/reatores/>> Acesso em 26/10/2016.

CHERNICHARO, C. A. L. **Anaerobic Reactors**. Biological Wastewater Treatment, vol. 4. Londres: IWA Publishing, 2007.

FEN: Fundação Ecológica Nacional. **Biogás**. 2013. Disponível em: <<http://fen.org.br/wp-content/uploads/2013/05/Fontes-Alternativas-de-Energia.pdf>> Acesso em: 07/11/2016

FERNANDES, C. **Digestão Anaeróbia**. UFCG, 2016. Disponível em: <<http://www.dec.ufcg.edu.br/saneamento/DigeAnae.html>> Acesso em: 10/01/2017.

FERNANDES, C. H. R. **Biodegradabilidade Termofílica dos resíduos sólidos urbanos e potencialidade em biogás**. Dissertação de mestrado. Universidade de Lisboa, 2013. Disponível em: <http://repositorio.ul.pt/bitstream/10451/10214/1/ulfc106051_tm_Carina_Fernandes.pdf> Acesso em: 09/10/2016

FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. p. 10 - 34.

G1. **Canal de Notícias Globo**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2016/11/gas-de-cozinha-deve-ficar-mais-caro.html>> Acesso em: 30/01/2017.

GARCIA, E. E. C. **Resíduos Sólidos Urbanos e a Economia Verde**. Fundação Brasileira para o Desenvolvimento Sustentável – FBDS, 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/2VV4q4>> Acesso em: 19/02/2015.

GRADY, C.P.L.Jr; DAIGGER, G.T.; LIM, H.C. **Biological Wastewater Treatment**. 2. ed. Nova Iorque: Marcel Dekker, 1999.

HZI (Hitachi Zosen Inova). **Anaerobic Digestion**. Disponível em: <http://www.hz-inova.com/cms/en/home?page_id=256> Acesso em: 11/01/2017.

INMETRO. **Portaria n.º 417**, de 22 de novembro de 2007. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/rtac/pdf/RTAC001242.pdf>> Acesso em 06/11/2016.

KOZAK, C., JUSTINO, M. N., CRISTO, A. C., SILVEIRA, J. W. P. **Comparação Entre Tratamento Biológico Aeróbio e Anaeróbio de Esgotos Domésticos**. Artigo. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012. Disponível em: <<http://saeq.pg.utfpr.edu.br/site/artigos/2012/5.pdf>> Acesso em: 11/01/2017.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; BELLI FILHO, P.; PINTO, R. O.; CASTILHOS JR, A. B.; SOARES, H. M.; LIBÂNIO, P. A. C. **Bioestabilização de Resíduos Sólidos Orgânicos: In CASSINI, S. T. (Coord.). Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos com Aproveitamento do Biogás**. Vitória, ES: RiMa, 2003, p. 94 – 120.

LEITE, V. D.; LOPES, W. S.; SOUSA, J. T.; PRASAD, S.; SILVA, S. A. **9**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 13, n. 2, p. 190-196, 2009. Campina Grande, PB.

LIBÂNIO, P. A. C. **Avaliação da Eficiência e Aplicabilidade de um Sistema Integrado de Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Chorume**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2002. Disponível em: <<http://goo.gl/jHREtn>> Acesso em: 01/04/2015.

LUCAS JÚNIOR, J. **Manejo de Dejetos em Suinocultura: Biodigestores**. Artigo. Universidade do Estado de São Paulo – Campus Jaboticabal, 2009. Disponível em: <<http://www.acrismat.com>>

com.br/novo_site/arquivos/25112009065720Jorge%20de%20Lucas.pdf> Acesso em: 15/11/2016.

MATTHEEUWS, B.; DE BAERE, L. Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Europe – Status, Experience and Prospects. **Waste Management**, Vol. 3: Recycling and Recovery, p. 517-526. TK, 2012.

MERCADO LIVRE. **Agro, Indústria e Comércio**. Disponível em:< <http://www.mercadolivre.com.br/>> Acesso em: 09/11/2016.

NEVES, L.; GONÇALO, E.; OLIVEIRA, R.; ALVES, M. M. Influence of Composition on the Biomethanation Potential of Restaurant Waste at Mesophilic Temperatures. **Waste Management** vol. 28 p. 965–972. Braga, Elsevier, 2008.

PAULA JÚNIOR, D. R.; MORAES, L. M.; CHERNICHARO, C. A.; PONTES, P. P.; CASSINI, S. T.; GONÇALVES, R. F.; BELLI FILHO, P.; SOARES, H. M. Estabilização Anaeróbia de Lodos: In CASSINI, S. T. (Coord.). **Digestão de Resíduos Sólidos Orgânicos com Aproveitamento do Biogás**. Vitória, ES: RiMa, 2003, p. 54 – 93.

POMPERMAYER, R. S. e PAULA JÚNIOR, D. R. **Estimativa do potencial brasileiro de produção de biogás através da biodigestão da vinhaça e comparação com outros energéticos**. Em: Encontro de Energia no Meio Rural, Ano 3., 2003 - Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022000000200055&lng=en&nrm=abn>. Acesso em: 30/01/2017.

RIS INTERNATIONAL. **Feasibility of Generating Green Power through Anaerobic Digestion of Garden Refuse from the Sacramento Area - Final Report**. Report to SMUD Advanced Renewable and Distributed Generation Program – Ris International Ltda. and MacViro Consultants Inc. Sacramento, EUA. 2005. Disponível em: <http://www.nerc.org/documents/sacramento_feasibility_study.pdf> Acesso em: 15/11/2016.

SAVIAN, T. V.; MUNIZ, J. A.; MENDES, P. N. **Ajuste de Modelos de Degradabilidade Ruminal Por Meio da Técnica de Produção de Gases: Uma Abordagem Clássica**. In: 53ª Reunião anual da Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, Lavras, 2008. Disponível em: <<http://goo.gl/tTJyry>> Acesso em: 20/04/15.

SILVA, M. C. P. **Avaliação de Lodo Anaeróbio e Dejeito Bovino Como Potenciais Inóculos Para Partida de Digestores Anaeróbios de Resíduos Alimentares**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. Disponível em: <<http://goo.gl/ScPKgp>> Acesso em: 01/03/2015.

SOUZA, W. J.; BITENCOURT, L. **Sustentabilidade na Produção de Refeições em um Restaurante Institucional do Município de Ouro Preto - MG**. Resumo expandido: Seminário de Iniciação Científica. Instituto Federal de Minas Gerais, 2012. Disponível em: < <http://www2.ifmg.edu.br/sic/edicoes-anteriores/resumos-2012/sustentabilidade-na-producao-de->

refeicoes-em-um-restaurante-institucional-do-municipio-de-ouro-preto-mg.pdf> Acesso em: 25/01/17.

SPERLING, M. V. **Princípios Básicos do Tratamento de Esgoto**. Princípios do Tratamento de Águas Residuárias, vol 2. Minas Gerais: UFMG, 2013.

STRABAG. **Wet Digestion In The LARAN® Loop Digester**. Disponível em: <http://www.strabag-umwelttechnik.com/databases/internet/_public/content.nsf/web/EN-STRABAGUM

SUPRAGÁS. **Sobre GLP**. Disponível em: < <http://www.supragas.com.br/glp.php> > Acesso em: 30/01/2017.

WELTTECHNIK.COMN-nassvergaerung_schlaufen.html#?men1=2&men2=undefined&sid=220&h=undefined> Acesso em: 11/01/2017.

TAVARES, J. C. L.; MELO, E. N. C.; PINHEIRO, Q. M. L.; CALLADO, N. L. **Caracterização e Geração per Capita de Lixo por Região Administrativa do Município de Maceió**. In: SIBESA, 2010, Maceió. Anais X Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2010.

VALORGA INTERNATIONAL. **Our Activities**. Disponível em: <<http://www.valorgainternational.fr/en/pag17-ACTIVITIES---PROFESSION.html>> Acesso em: 11/01/2017.

WOODS END LABORATORIES Inc. **Biogas Methane Potential**. Disponível em: <<https://woodsend.org/biogas-bioenergy/>> Acesso em: 12/04/2015.

ZANG, J. W.; ZANG, W. A. F. **Biogás**. Comissão de Ciência, Tecnologia, Inovação, Comunicação e Informática – CCT Audiência Pública “Política Nacional de Biogás”, 2012. Disponível em: <<http://goo.gl/xceEFE>> Acesso em: 18/03/2015.