

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA  
DO RIO DE JANEIRO



**Leticia Vidal Ozorio**

**Desenvolvimento de um simulador para a geração  
de energia elétrica a partir do biogás oriundo de  
resíduos alimentares**

**Projeto de Graduação**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da PUC-Rio

Orientador: Florian Alain Yannick Pradelle  
Coorientadora: Thaís Cristina Campos de Abreu

Rio de Janeiro  
Julho de 2018

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, que mesmo tão jovens, mostraram que amor não se planeja. Obrigada por todo apoio, incentivo, compreensão e confiança nesses anos de vida. Se foi possível, é porque eles sempre estiveram lá, transmitindo a serenidade necessária aos momentos mais difíceis.

Aos meus avós, que de diferentes formas, me transmitiram tanta sabedoria.

Ao Colégio Teresiano, colégio no qual vivi uma história muito bonita e que me deu a base para chegar aonde cheguei e me tornar antes de qualquer coisa, humana. Às amizades que lá fiz, que andam comigo até hoje, me fazendo lembrar quem sou e quem eu sempre quis ser.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação, desde os mais básicos ensinamentos, obrigada pela inspiração e sabedoria. Sei o quão é difícil atuar nesta profissão em nosso país.

Ao meu orientador, Prof. Florian Pradelle, pela disponibilidade, dedicação e incentivo ao longo desse período. Obrigada por transmitir, de uma forma tão leve, tanta sabedoria.

À minha coorientadora, Prof. Thaís Abreu, pela confiança, paciência e apoio durante toda essa jornada dentro da pesquisa.

Ao Núcleo Interdisciplinar de Meio Ambiente da PUC-Rio, por todo o apoio, ferramentas e conhecimento transmitido nesses anos de trabalho.

Um agradecimento especial à Joana Meirelles, minha parceira de pesquisa e minha amiga para a vida. Não teria sido possível sem seu apoio e compreensão, obrigada pela força feminina que tanto nos une.

## RESUMO

O aumento da demanda energética e sua expressiva dependência em combustíveis fósseis, assim como a crescente geração de resíduos sólidos e sua disposição inadequada, estão associados a altas emissões de gases do efeito estufa, fator de grande desequilíbrio ambiental. Desta forma, o tratamento de resíduos através da digestão anaeróbia surge como uma alternativa para ambas as questões, devido ao seu principal produto, o biogás, de alto potencial energético. Diante disso, o objetivo deste trabalho é, a partir do levantamento de dados na literatura, obter correlações entre os parâmetros mais importantes do processo, e estimar a quantidade de biogás e de matéria orgânica necessária para suprir a demanda de energia elétrica da Estação de Educação Ambiental da PUC-Rio. Os processos estudados indicam uma temperatura de trabalho média de 37°C, implicando em um caráter mesofílico, com valores médios para o pH e volume do reator de 6,9 e 9,5 L respectivamente. Também foi identificado que as produções de metano (CH<sub>4</sub>) mais elevadas são oriundas de processos contínuos de uma só fase com substratos que sofreram codigestão e que os valores médios de produção de biogás e CH<sub>4</sub> são de 0,509 e 0,343 m<sup>3</sup>/kg.VS, sendo o teor médio de CH<sub>4</sub> no biogás de 62,17%. A partir dos dados coletados e de suas médias, da demanda de energia elétrica levantada e da escolha de um cenário em que um motor Diesel opera em modo *dual*, com substituição parcial de um biogás com 85% de CH<sub>4</sub>, se estimou a necessidade de um volume de biogás de 414 m<sup>3</sup>/mês e 39,4 kg TS/dia de alimentação de matéria orgânica ao biodigestor. A universidade, por sua vez, diante de sua geração diária de resíduos alimentares, poderia suprir 38,6% da demanda energética.

**Palavras-chave:** Digestão anaeróbia, Resíduos sólidos, Demanda energética, Biogás, Energia, Matéria orgânica

## ABSTRACT

### **Development of a simulator for the generation of electric energy from biogas deriving out of food waste**

The increase in energy demand and its significant dependence on fossil fuels, as well as the growing generation of solid wastes and their inappropriate disposal, are associated with a high number of greenhouse gas emissions, a factor of great environmental imbalance. That being, the treatment of residues through anaerobic digestion appears as an alternative to both issues, due to its main product, biogas, which has high energy potential. Therefore, the aim of this work, based on data collection in the literature, is to obtain correlations between the most important parameters of the process, and to estimate the amount of biogas and organic matter needed to supply the electricity demand of the Environmental Education Station of PUC-Rio. The processes studied indicate an average working temperature of 37° C, implying a mesophilic character, with mean values for pH and reactor volume of 6.9 and 9.5 L, respectively. It has also been found that the higher methane (CH<sub>4</sub>) productions come from single-phase continuous processes with substrates from codigestion and that the average biogas and CH<sub>4</sub> production values are 0.509 and 0.343 m<sup>3</sup> / kg.VS, with an average content of CH<sub>4</sub> in the biogas of 62.17%. Based on the collected data and their averages, the raised demand for electric energy and the selection of a scenario in which a diesel engine operates in *dual fuel* mode, with partial replacement of a biogas with 85% CH<sub>4</sub>, the need for a biogas volume of 414 m<sup>3</sup>/month and 39,4 kg TS/day of organic matter feed to the digester was estimated. Therefore, considering the daily food waste production in the university, it would be possible to meet 38,6% of electrical energy demand.

**Keywords:** Anaerobic digestion, Solid wastes, Energy demand, Biogas, Energy, Organic matter

## Sumário

1.	Introdução .....	10
2.	Revisão Bibliográfica.....	12
2.1	Cenário Geral .....	12
2.2	Resíduos sólidos orgânicos e biogás .....	13
2.3	Tipos de Biomassa .....	15
2.3.1	Aspectos Gerais.....	15
2.3.2	Resíduos alimentares .....	16
2.4	Digestão Anaeróbia .....	18
2.5	Tipos de biodigestores .....	22
2.5.1	Classificação quanto ao teor de matéria seca .....	22
2.5.1.1	Digestão úmida .....	22
2.5.1.2	Digestão seca.....	23
2.5.2	Classificação pelo tipo de alimentação .....	23
2.5.2.1	Contínua e Semicontínua .....	23
2.5.2.2	Descontínua (em batelada) .....	23
2.5.3	Classificação pelo número de estágios .....	24
2.5.4	Modelos de biodigestores .....	24
2.5.4.1	Modelo chinês .....	24
2.5.4.2	Modelo indiano .....	25
2.6	Composição.....	26
2.7	Purificação do biogás .....	28
2.7.1	Remoção da umidade (secagem) .....	29
2.7.1.1	Condensação .....	29
2.7.1.2	Adsorção .....	30
2.7.1.3	Absorção .....	30
2.7.2	Separação por membranas .....	30
2.7.3	Tratamento biológico .....	30
2.8	Aproveitamento do biogás .....	31
2.8.1	Motores de combustão interna .....	31
2.8.1.1	Ciclo Otto.....	32
2.8.1.2	Ciclo Diesel.....	32
2.8.2	Turbinas e microturbinas a gás.....	32

2.8.3 Células a combustível .....	33
3. Metodologia.....	35
4. Resultados e discussão .....	37
5. Conclusão .....	61
Referências Bibliográficas .....	64
Apêndices.....	71

## Lista de Figuras

Figura 1 – Oferta interna de Energia no Brasil em 2016. Fonte: Resenha Energética Brasileira (2017).....	13
Figura 2 – A composição do resíduo alimentar gerado na etapa de produção (a) e na etapa de consumo (b). Adaptado de Xu (2018). ....	17
Figura 3 - Etapas do processo de digestão anaeróbia. Fonte: FNR, 2010 .....	20
Figura 4 – Biodigestor modelo chinês. Fonte: Deganutti et al., (2002). ....	25
Figura 5 – Biodigestor modelo indiano. Fonte: Deganutti et al., (2002). ....	26
Figura 6 - Técnicas de purificação de impurezas do biogás. Fonte: Khan (2017) ....	29
Figura 7 – Relação entre produção de CH <sub>4</sub> e VS visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II .....	37
Figura 8 – Relação entre produção de CH <sub>4</sub> e TS visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II .....	38
Figura 9 – Relação entre o teor de sólidos voláteis e o teor de sólidos totais do substrato introduzido ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	39
Figura 10 – Relação entre produção de CH <sub>4</sub> e volume do biodigestor visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	40
Figura 11 – Relação entre produção de CH <sub>4</sub> e a carga orgânica introduzida ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	41
Figura 12 – Relação entre produção de CH <sub>4</sub> e o pH do processo, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	43
Figura 13 – Relação entre produção de CH <sub>4</sub> e o tempo de retenção hidráulica do sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	44
Figura 14 – Relação entre produção de CH <sub>4</sub> e a temperatura do sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	45
Figura 15 – Relação entre o tempo de retenção hidráulica do processo e a temperatura do sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	46
Figura 16 – Relação entre o tempo de retenção hidráulica do processo e o volume do reator, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	46

Figura 17 – Relação entre o tempo de retenção hidráulica do processo e a carga orgânica introduzida ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	47
Figura 18 – Relação entre o tempo de retenção hidráulica do processo e o teor de sólidos voláteis do substrato introduzido ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II. ....	47
Figura 19 – Relação entre o teor de metano no biogás e o teor de sólidos voláteis do substrato introduzido ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	48
Figura 20 – Relação entre o teor de metano no biogás e o teor de sólidos totais do substrato introduzido ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	49
Figura 21 – Relação entre o teor de metanos no biogás e o volume do biodigestor, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II. ....	50
Figura 22 – Relação entre o teor de CH <sub>4</sub> no biogás e a carga orgânica introduzida ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	51
Figura 23 – Relação entre o teor de CH <sub>4</sub> no biogás e o pH do processo de digestão anaeróbia, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II. ...	52
Figura 24 – Relação entre o teor de CH <sub>4</sub> e o tempo de retenção hidráulica do sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.....	53
Figura 25 – Relação entre o teor de CH <sub>4</sub> e a temperatura do processo, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II. ....	54
Figura 26 – Relação entre a produção de biogás e o teor de CH <sub>4</sub> presente no mesmo, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II. ....	55
Figura 27 – Fluxo energético inverso do processo de digestão anaeróbia para o fornecimento de energia elétrica a partir do biogás .....	58



## Lista de Tabelas

Tabela 1- Biomassas geralmente utilizadas em processos de digestão anaeróbia e suas características principais. Fonte: Vasco Correa (2018).....	15
Tabela 2- Produção de biogás a partir de certos tipos de substratos. Adaptado de Xu <i>et al.</i> (2018) .....	17
Tabela 3 - Classificação das técnicas de geração de biogás conforme diferentes critérios. Adaptado de FNR (2010). ....	22
Tabela 4 - Composição básica do biogás. Fonte: Marques, 2012 apud CETESB (2011) .....	26
Tabela 5 - Variação do poder calorífico inferior em relação à composição do biogás. Fonte: Avellar (2001) apud Iannicelli (2008). ....	27
Tabela 6 - Reações químicas envolvidas em processos de reforma do CH <sub>4</sub> . Fonte: Alves <i>et al.</i> (2013) .....	33
Tabela 7 – Tópicos selecionados para o levantamento de dados das distintas bibliografias .....	35
Tabela 8 – Categorização para a geração de gráficos relacionados ao processo ...	36
Tabela 9 – Relações lineares entre VS e TS para os substratos da categorização II. ....	40
Tabela 10 – Dados de consumo de potência e energia elétrica referentes à Estação de Educação Ambiental da PUC-Rio. ....	56
Tabela 11 – Valores de potência, energia, massa e volume envolvidos no processo para três bibliografias consultadas como referência para uma suposta aplicação experimental.....	58
Tabela 12 – Carga orgânica em termos de VS necessária para suprir a demanda de energia elétrica na Estação de Educação Ambiental da PUC-Rio.....	58
Tabela 13 – Parcela de contribuição dos resíduos orgânicos (em termos de sólidos totais) gerados diariamente na PUC-Rio para suprir a demanda de energia elétrica da Estação de Educação Ambiental.....	5

## 1. Introdução

A relação do ser humano com o consumo de energia é presente em todas as fases da história da civilização, inclusive marca seu início, uma vez que tarefas que hoje nos parecem simples, como cozinhar ou aquecer a casa em períodos frios, demandam energia. Este conceito, por sua vez, é amplo, podendo ser descrito em diversas formas – potencial, cinética, química, elétrica, térmica – e adquiridos por diferentes fontes podendo ser elas, fóssil, nuclear e renovável, por exemplo.

Contudo, a partir da Primeira Revolução Industrial e com a constante e progressiva modernização da sociedade e crescimento populacional, a demanda de energia aumentou exponencialmente, tornando-se, conseqüentemente, o maior fator de desequilíbrio ambiental. Estes impactos são decorrentes de diversas etapas no processo de geração de energia, como por exemplo, a queima de combustíveis fósseis – forte agente na emissão de gases do efeito estufa, aquecimento global e poluição atmosférica.

Grande parte do fornecimento energético global ainda é oriunda de combustíveis fósseis – carvão, petróleo e gás natural – portanto o papel de energias renováveis é de extrema importância para que a demanda de energia seja coberta de forma menos nociva ao meio ambiente. A matriz energética brasileira é considerada como uma das mais limpas do mundo, tendo como fonte principal recursos hídricos. Para a geração de eletricidade, contudo, é de extrema importância o estímulo e desenvolvimento tecnológico de outras formas complementares de energias renováveis. Segundo Souza (2004), além das vantagens ambientais, as tecnologias com base em fontes renováveis podem ser atreladas a vantagens sociais, uma vez que são alternativas atrativas devido a possibilidade de desenvolvimento de fontes de suprimento em pequena escala e descentralizada.

Em paralelo à questão do fornecimento de energia, surge a preocupação com a crescente produção e disposição final de resíduos. Segundo Bidone (2001) apud Soto (2016), a noção de sobra ou lixo não existe dentro do contexto natural e sua perspectiva negativa configura-se como uma característica antrópica, que surge quando a capacidade de absorção natural pelo meio, através de organismos

decompositores, é ultrapassada. Desta forma, tal desperdício resulta em problemas ambientais, uma vez que sua intensa disposição sem tratamento adequado ocasiona diversas contaminações e emissão de gases do efeito estufa (GEE). Segundo Reis (2012), a compostagem, processo de decomposição aeróbia que resulta em compostos aplicáveis à agricultura, se configura atualmente como o mais utilizado no tratamento de resíduos sólidos orgânicos.

Contudo, a problemática dos resíduos e de uma matriz energética diversificada vem, nos últimos tempos, ganhando espaço entre as políticas públicas de diversos países, e tal iniciativa consequentemente despertou o desenvolvimento de pesquisas e estudos sobre o reaproveitamento de resíduos orgânicos e seu potencial energético. Desta forma, processos anaeróbios, que ocorrem em reatores hermeticamente fechados, vem sendo uma alternativa cada vez mais explorada, uma vez que apresentam como produto o biogás, combustível gasoso de grande potencial calorífico.

No contexto da PUC-Rio, a quantidade de resíduos gerados em restaurantes da universidade representa 58% do total gerado diariamente na universidade (Soto, 2016). Em particular, o Bandeirão, que por sua vez, possui um expressivo caráter gerador de resíduos orgânicos, onde 540 kg de matéria orgânica é descartada diariamente. Tendo em vista o cenário da PUC-Rio em relação a disposição de resíduos orgânicos, e número significativo de pesquisas no mundo sobre o uso de resíduos alimentares como insumo ao processo de digestão anaeróbia, este trabalho propõe o levantamento de um banco de dados da literatura acerca de tal processo com a perspectiva de atrelá-lo a um possível projeto de geração de energia elétrica no campus da universidade.

A partir dos perfis traçados entre diferentes parâmetros para várias configurações de digestão anaeróbia, um ponto de partida mais evidente poderá ser tomado para relacionar a demanda de energia elétrica da Estação de Educação Ambiental da PUC-Rio (pertencente ao NIMA) e o volume de biogás e quantidade de matéria orgânica necessários ao processo, em um cenário de substituição de um motor tradicional com óleo diesel por um motor funcionando com biogás – através da substituição total ou parcial.

## **2. Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Cenário Geral**

A oferta de componentes energéticos, água e alimentos e o desenvolvimento das nações são questões diretamente inter-relacionadas, e são dificilmente abordadas isoladamente (Souza G.R et *al.*, 2009). A necessidade de fontes locais de energia surgiu primeiramente com a crise do petróleo nos anos 1970, momento no qual os países importadores de recursos fósseis enfrentaram consequências imediatas na sua economia e tiveram grandes problemas de adaptação, devido a sua dependência com os recursos fósseis.

Diante da necessidade de contornar tal crise, o Brasil – que naquele contexto adquiria em torno de 80% do seu óleo bruto de fonte externa (Karlsson, 2016) – respondeu a esta questão através da elaboração de algumas estratégias, entre elas, o programa Proálcool, que incentivou o uso do álcool como combustível e facilitou a entrada de biocombustíveis no mercado de forma geral.

Posteriormente, a atenção voltada para as fontes alternativas retornou como um objeto de grande interesse dos governos, a nível mundial, devido ao crescente consumo de energia elétrica em países em desenvolvimento e com índice populacional elevado (Marques, 2012).

Com a intensificação da preocupação e consciência ambiental na década de 1990, a Agenda 21 Global surge como o plano de ação estabelecido a partir da conferência RIO 92. A partir dela, foi estabelecido um novo padrão de desenvolvimento em escala mundial tendo como objetivo, a substituição de 50% das fontes energéticas por renováveis até o ano 2020 (BRASIL, 2018).

Os combustíveis fósseis, por sua vez, ainda são protagonistas no que diz respeito a produção e consumo de energia atual global – o que indica riscos ao planeta se mantidos como fonte a longo prazo, devido ao seu caráter poluente e gerador de gases de efeito estufa (GEE) (Albarracin, 2016). No Brasil, a estrutura da oferta interna de energia (OIE) de 2016 é ilustrada através da Figura 1 e permite a comparação da situação atual a nível nacional e global.

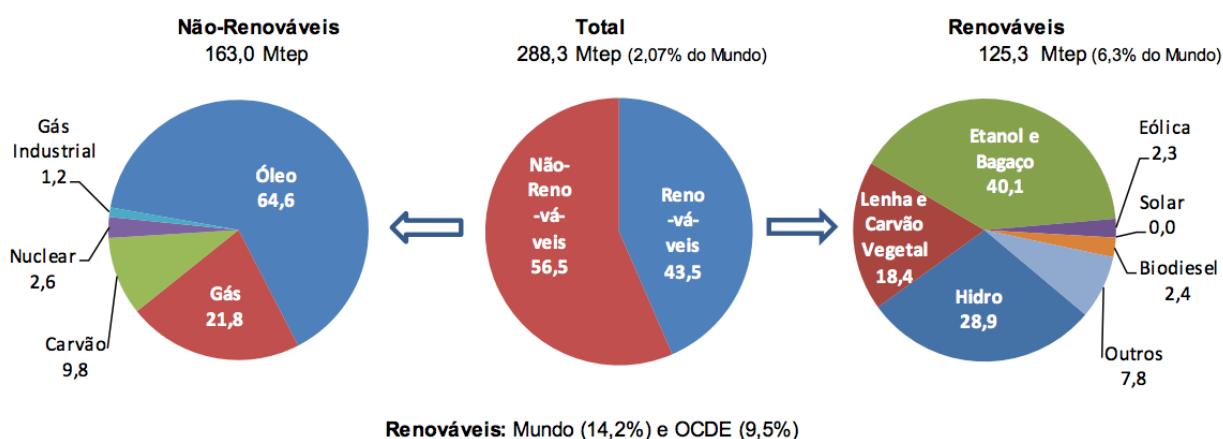


Figura 1 – Oferta interna de Energia no Brasil em 2016. Fonte: Resenha Energética Brasileira (2017)

É possível notar a expressiva vantagem que o Brasil possui em comparação a outras nações, com a participação de 43,5% de fontes renováveis em sua matriz energética, contra apenas 9,5% nos países da OCDE (Organização para a Cooperação de Desenvolvimento Econômico) e 14,2% na média mundial (Resenha Energética Brasileira, 2017). Segundo o Ministério de Minas e Energia (2017), o bom desempenho das fontes renováveis no Brasil é resultado do crescimento de participação das fontes eólica, lixívia da indústria de celulose e resíduos da biomassa, que expandiram 10% no ano de 2016.

Segundo Massotti (2011) apud Marques (2012), em paralelo ao aumento da demanda mundial de energia, há também uma necessidade crescente da redução da produção de lixo, o que consequentemente deu início a pesquisas e estudos sobre o reaproveitamento do potencial energético de resíduos orgânicos. Tais estudos, por sua vez, tem como foco o biogás - nome atribuído à mistura gasosa resultante da fermentação anaeróbia da matéria orgânica (Costa, 2006) – e suas aplicações, como por exemplo a sua utilização prática e simples como combustível para o acionamento de equipamentos estacionários (Souza, 2009).

## 2.2 Resíduos sólidos orgânicos e biogás

O amplo uso de combustíveis fósseis no avanço de sociedades industrializadas e o aumento na quantidade de lixo doméstico, industrial e agrícola possuem fortes impactos no que diz respeito ao meio ambiente e saúde pública (Dhar, 2011).

Ao contrário da significativa vantagem que o Brasil possui em relação a outros no cenário energético, a situação do país em termos de disposição final de resíduos sólidos orgânicos não é tão positiva. Apesar de ter presenciado uma queda de 2% na quantidade gerada em 2016 em relação a 2015 – provavelmente devido a crise econômica – a disposição final dos resíduos sólidos urbanos (RSU) coletados demonstrou piora comparado ao índice do ano anterior, de 58,7%, para 58,4%, ou seja, 41,7 milhões de toneladas enviadas para aterros sanitários – sendo que 29,7 milhões destes últimos são dispostos sem as medidas necessárias contra danos e degradações ao meio ambiente (ABRELPE, 2016).

A partir da composição gravimétrica média do Brasil, realizada em 2008, concluiu-se que resíduos orgânicos representam pouco mais da metade dos resíduos urbanos gerados no Brasil, com um percentual de 51,4% (Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012). Tais resíduos sofrem degradação espontânea e, conseqüentemente, reciclam os nutrientes nos ciclos biogeoquímicos. Contudo, quando dispostos de maneira inadequada e em grande volume – como frequentemente visto no cenário brasileiro –, eles indicam diversos riscos ambientais devido à emissão de gases nocivos na atmosfera, produção de lixiviado e contribuição com a proliferação de vetores de doenças (Rocha, 2016).

No Brasil, os estudos sobre a produção de energia elétrica com o biogás foram iniciados somente a partir de 1996 de maneira mais intensa. Uma das áreas que se mostra expressivamente em desenvolvimento no panorama nacional é a produção proveniente da biomassa gerada por dejetos suínos (Marques, 2012).

Segundo Ferreira *et al.* (2015), o setor de tratamento e disposição de resíduos perde apenas para as atividades agropecuárias em termos de responsabilidade de emissão de gás metano no Brasil. Sendo assim, destaca-se a importância do papel da disposição dos RSU nas emissões de GEE, visto que em 2012, este setor foi responsável pela emissão de cerca de 42 MtCO<sub>2</sub>, sendo 89,3% na forma de CH<sub>4</sub>, em consequência da decomposição anaeróbia da fração orgânica que constitui tais resíduos.

Para que o biogás seja aproveitado da melhor forma, tanto do ponto de vista energético quanto ambiental, a alternativa mais adequada é decompor a matéria orgânica em um biodigestor, de forma que o metano – 22 vezes mais impactante que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em termos de aquecimento global – não seja

decomposto livremente na atmosfera, sem poder aproveitar seu poder calorífico (Karlsson, 2016).

Desta forma, o aproveitamento desta biomassa se mostra como uma alternativa que une a sustentabilidade ambiental no âmbito energético com resoluções para o aproveitamento e disposição de resíduos animais e orgânicos em áreas urbanas (Marques, 2012).

## 2.3 Tipos de Biomassa

### 2.3.1 Aspectos Gerais

Existe um amplo espectro de tipos de matéria orgânica, indicados na Tabela 1, que podem ser aplicados ao processo de digestão anaeróbia, e estes dependem sobretudo da disponibilidade regional.

Tabela 1- Biomassas geralmente utilizadas em processos de digestão anaeróbia e suas características principais. Fonte: Vasco Correa (2018).

Tipo de substrato	Características	TS [%]	Produção de biogás [m <sup>3</sup> /kg VS]
Dejetos animais	Geralmente codigerido com biomassas com alto teor de carbono	2 - 20	0.1 - 0.6
Fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (RSU)	Composição altamente variável	20 - 50	0.3 - 0.6
	Necessitam de redução de tamanho e separação no pré-processamento		
Resíduos alimentares (FW)	Composição altamente variável e disponibilidade abundante	5 - 30	0.3 - 0.8
	Necessitam de redução de tamanho		
	Facilmente digerível, pode gerar inibição por acidificação		
Resíduos agrícolas e de culturas energéticas	Altamente recalcitrante: necessitam de pre-tratamento para aumentar a sua digestibilidade	20 - 80	0.2 - 0.5
	Subproduto de tratamento de esgoto		
Lodo de esgoto	Rico em sólidos, patógenos e nutrientes	20 - 35	0.8 - 1.2
	Baixa digestibilidade, estrutura recalcitrante, pre-tratamento e codigestão com outros tipos de substratos podem ajudar		
Algas		2 - 30	0.5 - 0.8

De acordo com Meyer *et al.* (2018), no ano de 2015, a produção do biogás na União Europeia contava com 17% dos substratos oriundos de lodo de esgoto, 9% de aterros sanitários e 74% de outros tipos como agrícolas, co-substratos (ex.: folhas, resíduos orgânicos industriais) e resíduos sólidos municipais.

Também vale ressaltar, que a partir de 2010, 50% da produção total europeia de biogás se deu na Alemanha. Contudo, tal concentração pode ser explicada pelo forte uso do milho como substrato para o processo, que por sua vez implica em danos ao meio ambiente devido ao intensivo cultivo de “monoculturas energéticas”. Devido a tais implicações negativas, é esperado que esta fonte principal de substrato saia de cena em breve.

Já em países em desenvolvimento, segundo Bond *et al.* (2011), a expansão dos sistemas de recuperação de biogás tem sido baseada em reatores de escala pequena, voltados para a digestão suína, bovina e avícola. Segundo Leite *et al.* (1999), a concentração de sólidos presente em um dado substrato é muito importante para a indicação da massa total a ser tratada, e ela pode ser tanto de origem orgânica quanto inorgânica. No Brasil, os resíduos sólidos urbanos são compostos, em sua maioria, por umidade, matéria orgânica putrescível, plástico, papel e papelão. Contudo, em termos de digestão anaeróbia, a fração orgânica do substrato mostra maior relevância para o processo, visto que somente nela que ocorre a bioconversão. Logo, a taxa de conversão do resíduo em biogás é diretamente proporcional ao teor de sólidos voláteis, entre outros fatores.

### **2.3.2 Resíduos alimentares**

De acordo com Xu (2018), apesar da digestão anaeróbia ser uma tecnologia relativamente consolidada e amplamente aplicada no tratamento de efluentes, lodos de esgoto e dejetos animais, seu emprego com resíduos alimentares ainda enfrenta uma série de questões e obstáculos.

Resíduos alimentares podem ser oriundos de diversas etapas de uma cadeia de abastecimento alimentar, como a produção, processamento, distribuição, armazenamento, comercialização, cozimento e porções servidas (Food Waste Reduction Alliance (2016) apud Xu *et al.* (2018)). Em cada etapa, os resíduos possuem diferentes composições. A Figura 2 ilustra a composição do resíduo alimentar após a etapa de produção e consumo, respectivamente.



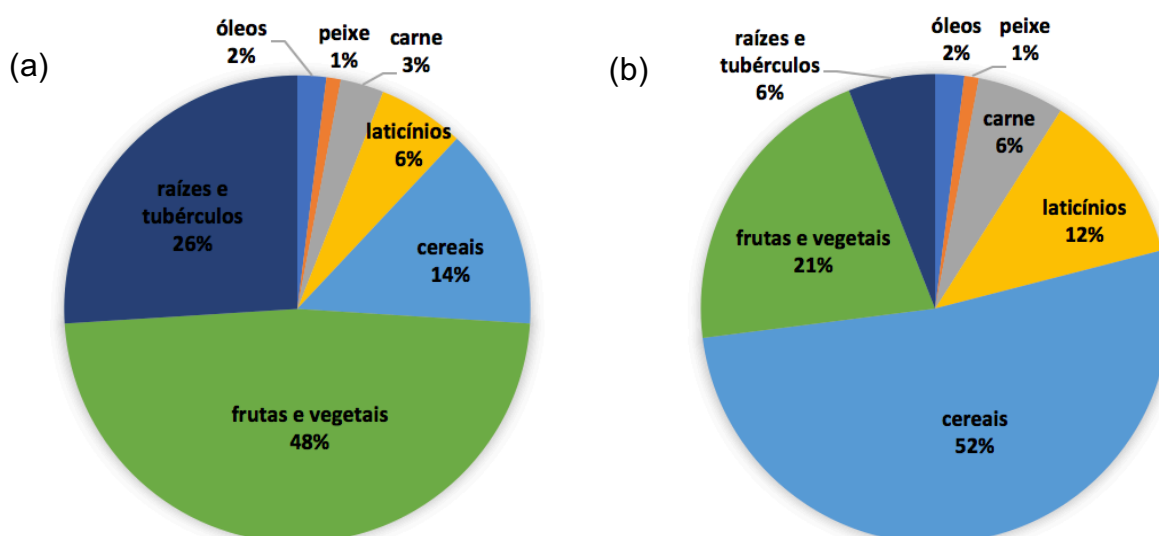


Figura 2 – A composição do resíduo alimentar gerado na etapa de produção (a) e na etapa de consumo (b). Adaptado de Xu (2018).

Segundo Dung *et al.* (2014) apud Xu *et al.* (2018), os países desenvolvidos geram em média de 100-170 kg de resíduo alimentar per capita por ano, mais do que o dobro do produzido em países em desenvolvimento. Estes, por sua vez, descartam de 80-90% de seus alimentos ainda nos estágios iniciais da cadeia de abastecimento alimentar (FAO (2011) apud Xu (2018)). A Tabela 2 mostra a correlação entre tipo de resíduo alimentar e a quantidade de metano gerado através da produção de biogás.

Tabela 2 - Produção de biogás a partir de certos tipos de substratos. Adaptado de Xu et al. (2018)

Tipo	TS [%]	VS/TS [%]	pH	Produção de metano [m <sup>3</sup> /kg VS]
Resíduo de frutas e vegetais	7,4 - 17,9	83,4 - 95,3	3,7 - 4,2	0,16 - 0,35
Resíduos de abatedouros	2,0 - 28,3	82,7 - 93,6	-	0,20 - 0,50
Resíduos de cervejaria	23,0 - 29,2	87,6 - 97	6,9	0,22 - 0,31
Resíduos de laticínios	0,1 - 7	-	6 - 11	0,1 - 0,85
Resíduos de rações pet	86 - 93	74,6 - 94,5	-	0,15 - 0,50
Óleos e gorduras	1,3 - 3,2	86,0 - 93,9	4,2 - 4,8	0,4 - 1,1
Resíduos domiciliares e de restaurantes	4,0 - 41,5	88,7 - 95,1	3,3 - 5,7	0,46 - 0,53

A Tabela 2 indica o potencial que resíduos gerados em restaurantes possuem para a produção de metano, apresentando, por sua vez, uma média de produção maior do que as outras categorias de resíduos indicadas.

A estabilidade e a eficiência do processo de produção do biogás estão diretamente ligadas à quantidade de nutrientes e contaminantes potenciais presentes na biomassa em questão ditará a quantidade e qualidade do biogás gerado ao longo da fermentação anaeróbia (Karlsson, 2016). Todos os substratos devem estar livres de agentes patológicos, caso contrário, devem ser submetidos a processos de pasteurização a 70 °C ou esterilização a 110°C antes do início da fermentação.

## **2.4 Digestão Anaeróbia**

O processo de digestão anaeróbia é um processo de degradação bioquímica amplamente usada nos dias atuais para o tratamento e recuperação energética de diversos tipo de biomassa, especialmente dejetos agrícolas e resíduos agroindustriais (Scano, 2014). Ela se dá através de um consórcio de microrganismos que atuam na ausência de oxigênio, e quebram a estrutura de materiais orgânicos complexos a fim de produzir compostos simples, sendo estes: metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e subprodutos como amônia ( $\text{NH}_3$ ), sulfatos ( $\text{H}_2\text{S}$ ) e fosfatos (Costa, 2006) e (Bajpai, 2017). Desde os tempos mais antigos, o ser humano utiliza os processos de digestão anaeróbia para o tratamento de esgoto, nos sistemas conhecidos por “fossas sépticas” (Costa, 2006).

De acordo com (Angelidaki e Ahring (1994) apud Babaei e Shayegan (2011)) esta alternativa se torna cada vez mais atraente para o tratamento de resíduos de alta carga orgânica, como resíduos sólidos urbanos (RSU), uma vez que possui como produtos energia renovável (metano) e importantes resíduos digeridos (“adubos” e condicionador de solo).

Desta forma, devido a presença de diferentes grupos de bactérias, Chanakya (2012) afirma que uma operação estável do digestor requer que tais grupos se mantenham em um equilíbrio harmonioso e dinâmico. Logo, é de extrema importância se manter atento a mudanças nas condições do ambiente durante a

fermentação, uma vez que elas possuem forte influência no equilíbrio do processo, resultando no acúmulo de intermediários, o que pode inibir o processo,

De acordo com FNR (2010), há quatro etapas principais na fermentação anaeróbia, sendo eles descritos abaixo e ilustrados na Figura 3:

1. **Hidrólise** – bactérias hidrolíticas atuam através de suas enzimas na decomposição de compostos orgânicos complexos como proteínas, lipídios e carboidratos em aminoácidos, açúcares e ácidos graxos – menos complexos por sua vez.
2. **Acidogênese** – os compostos intermediários formados na fase anterior são decompostos em ácidos graxos de cadeia curta, dióxido de carbono e hidrogênio por meio de bactérias fermentativas acidogênicas. A concentração de hidrogênio intermediário influencia diretamente no caráter dos compostos formados nesta etapa e ácido láctico e álcoois também são formados em pequenas quantidades.
3. **Acetogênese** – também conhecida como a etapa de formação de ácido acético. Os compostos sofrem a ação de bactérias acetogênicas na formação dos precursores do biogás, no caso ácido acético, hidrogênio e dióxido de carbono.
4. **Metanogênese** – nesta fase, o metano pode ser obtido a partir do hidrogênio e dióxido de carbono ou da redução de ácido acético. A experiência em usinas de biogás agrícolas aponta que o primeiro modo de formação de metano é associado a cargas orgânicas volumétricas mais elevadas, enquanto a redução do ácido acético se aplica apenas em condições de cargas orgânicas volumétricas relativamente baixas.

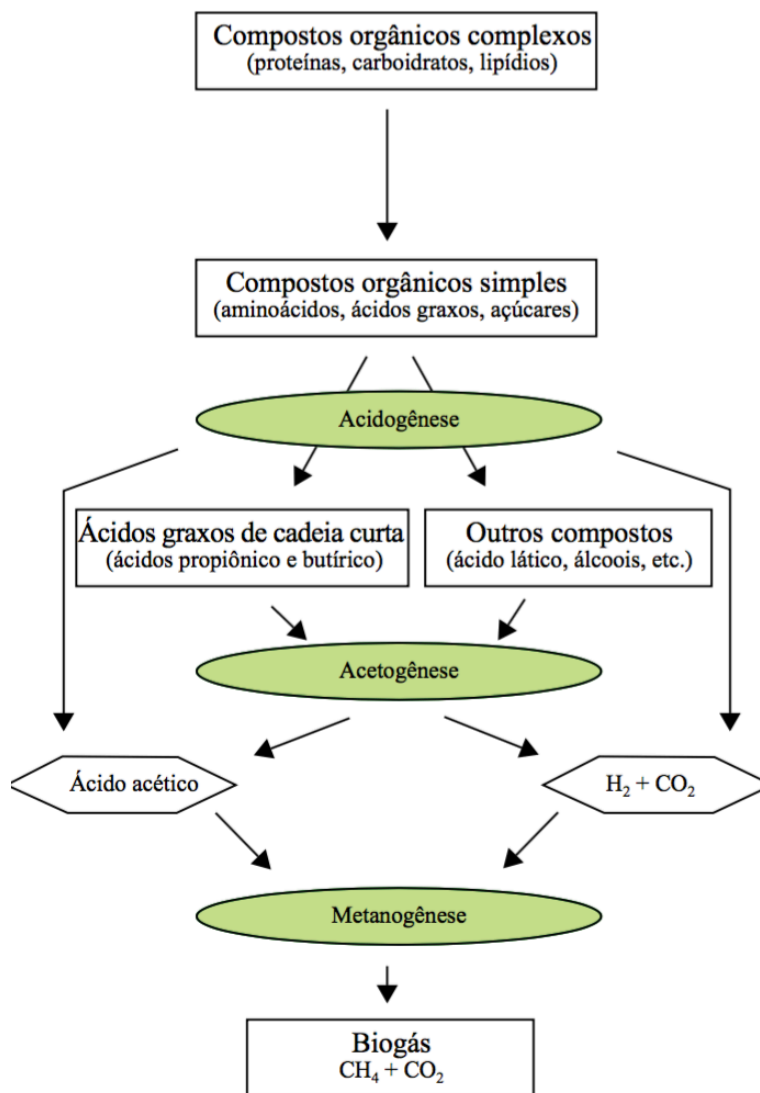


Figura 3 - Etapas do processo de digestão anaeróbia.  
Fonte: FNR, 2010

Para otimizar as quatro etapas citadas acima, há fatores de processo a serem considerados e controlados:

- **Temperatura** – De acordo com FNR (2010), em processos biológicos de transformação e degradação, cada microrganismo atuante nos processos metabólicos opera em uma faixa de temperatura ideal específica, sendo necessário respeitá-las a fim de evitar a inibição de tais organismos durante o processo. As temperaturas de trabalho a serem descritas são escolhidas de acordo com o volume de gás a ser produzido, o grau de fermentação e o tempo de retenção (Rocha, 2016). Logo, os microrganismos podem ser divididos em psicrófilos, mesófilos e termófilos.

- *Psicrofílicos* – a temperatura ideal para o seu desenvolvimento é abaixo dos 25°C e tal faixa implica em uma lenta decomposição e reduzida produção de biogás.
  - *Mesofílicos* – na faixa de temperatura entre 37 e 42°C, os microrganismos metanogênicos apresentam picos de crescimento. Isto resulta em rendimentos relativamente elevados e uma boa estabilidade no processo.
  - *Termofílicos* – a faixa de temperatura ideal para tais culturas é entre 50 e 60°C, sendo a aplicação de tais microrganismos conveniente em processos que requerem o extermínio de agentes nocivos ou que utilizam substratos com temperaturas intrinsecamente elevadas. Contudo, tal faixa exige maior gasto de energia em sua manutenção e o processo de digestão é mais suscetível a distúrbios e variações.
- **Valor do pH** – assim como na temperatura, os microrganismos atuantes nos diversos estágios de decomposição anaeróbia necessitam de diferentes valores de pH para que se desenvolvam de maneira ideal. Para as culturas de bactérias hidrolíticas e acidogênicas, o pH ideal se dá na faixa de 5,2 a 6,3 – podendo operar em faixas levemente maiores, porem com atividade diminuída. As bactérias acetogênicas e as arqueas metanogênicas, por sua vez, dependem de um pH neutro entre 6,5 e 8 (FNR, 2010).
  - **Carga orgânica volumétrica e tempo de retenção hidráulica** – Segundo FNR (2010), o que se deseja de um processo de biodigestão nem sempre é um rendimento máximo ou a decomposição completa da matéria orgânica presente no substrato. Portanto, é importante procurar um equilíbrio entre custo, tempo e produção desejada. Assim é introduzida a carga orgânica volumétrica (OLR), que indica a massa (em quilos) de sólidos voláteis (VS) necessária por m<sup>3</sup>, por unidade de tempo. O tempo de retenção hidráulica (HRT) representa o tempo médio calculado de permanência do substrato no biodigestor até sua saída. O HRT é expresso em dias e obtido pela divisão do volume do reator ( $V_R$ ) pela quantidade de substrato introduzida diariamente ( $\dot{V}$ ).

$$HRT = \frac{V_R}{\dot{V}} \text{ [dia]} \quad (1)$$

## 2.5 Tipos de biodigestores

Segundo FNR (2010), há diversas técnicas por meio das quais o biogás pode ser gerado. Desta forma, tanto as características operacionais quanto físicas podem classificar os diferentes tipos de biodigestores. A Tabela 3 apresenta as diferentes categorias.

Tabela 3 - Classificação das técnicas de geração de biogás conforme diferentes critérios. Adaptado de FNR (2010).

Critério	Tipo
Teor de matéria seca dos substratos	Digestão úmida
	Digestão seca
Tipo de alimentação	Contínua
	Semicontínua
	Descontínua (batelada)
Número de fases do processo	Uma fase
	Duas fases

### 2.5.1 Classificação quanto ao teor de matéria seca

De acordo com FNR (2010), esta classificação da tecnologia empregada na produção do biogás é vinculada a consistência – dependente do teor de matéria seca - dos substratos que serão utilizados na mesma.

#### 2.5.1.1 Digestão úmida

De acordo com Leite *et al.* (2009) apud Marçal (2016), a umidade é um fator muito relevante no tratamento de resíduos sólidos orgânicos, uma vez que a condução de enzimas e o metabolismo dos microrganismos no processo de biodecomposição é favorecido pela presença de água. Para caracterizar uma digestão úmida, o substrato líquido deve possuir um teor de matéria seca de até 12% em massa (FNR, 2010).

### **2.5.1.2 Digestão seca**

A digestão anaeróbia seca possui grande relevância no tratamento de grandes volumes de substratos de baixa umidade – como os resíduos sólidos municipais e industriais – e, além disso, possuem menor sensibilidade à presença de impurezas no processo (PROBIOGÁS (2015) apud Marçal, 2016)). Segundo FNR (2010) apud Lei Alemã de Energias Renováveis (EEG) (2004), a digestão seca é caracterizada por um teor de matéria seca (TS) de no mínimo 30% e carga orgânica volumétrica (OLR) de no mínimo 3,5 kg TS /( $m^3 \cdot d$ );

## **2.5.2 Classificação pelo tipo de alimentação**

### **2.5.2.1 Contínua e Semicontínua**

Nesta técnica, o bombeamento do substrato para o biodigestor é realizado diversas vezes ao dia, de forma constante e regular, a partir de um tanque de carga. Desta forma, esvazia-se o reator apenas para reparos, e, pelo fato do mesmo se encontrar sempre cheio, a produção do biogás é caracterizada como uniforme (FNR, 2010). A diferença entre a técnica contínua e semicontínua consiste na frequência de alimentação, podendo a última introduzir uma fração de substrato pelo menos por uma vez ao dia.

De acordo com Marçal (2016), os reatores de alimentação contínua são altamente aplicados na digestão anaeróbia de substratos mais densos (sólidos totais (TS) de aproximadamente 15%).

### **2.5.2.2 Descontínua (em batelada)**

Nesta técnica, os biodigestores são enchidos por completo e fechados em sequência. Assim, os resíduos são digeridos durante o tempo de retenção designado, sem que a quantidade de substrato seja alterada durante o processo inteiro. Ao final do tempo de digestão anaeróbia, o reator é esvaziado e reinicia-se o processo com a adição de outra leva de substrato fresco. Esta técnica resulta em uma produção variável de biogás ao longo do tempo. Logo, para que a produção constante e a qualidade desejada do gás sejam atingidas, será preciso mais de um biodigestor no processo (2010, FNR).

### **2.5.3 Classificação pelo número de estágios**

Segundo Reis (2012), resíduos sólidos orgânicos podem ser tratados através de diferentes configurações de sistemas anaeróbios, podendo variar o número de estágios do processo: um, dois ou multiestágios. Esta denominação está associada ao número de digestores presentes na configuração e, conseqüentemente, na maneira como as reações de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese ocorrem.

Em sistemas de um único estágio, as reações citadas acima se dão simultaneamente em um mesmo digestor, enquanto nos de mais de um estágio elas ocorrem sequencialmente e separadamente.

Aproximadamente 90% das plantas de metanização em grande escala operando na Europa para fins de digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos urbanos baseiam-se em configurações de um estágio. Isto se dá devido ao caráter mais simples do design do sistema e, conseqüentemente, um número menor de falhas técnicas e investimentos de custo (De Baere (1999) apud Vandevivere (2002)).

### **2.5.4 Modelos de biodigestores**

#### **2.5.4.1 Modelo chinês**

Seu funcionamento ocorre com base no princípio da prensa hidráulica – o acúmulo de biogás resulta em um aumento de pressão o qual desloca o efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída. O biodigestor de modelo chinês é constituído em sua maioria em alvenaria, o que implica em menores custos pois não há o uso de gasômetro em chapa de aço. A Figura 4 ilustra sua configuração.



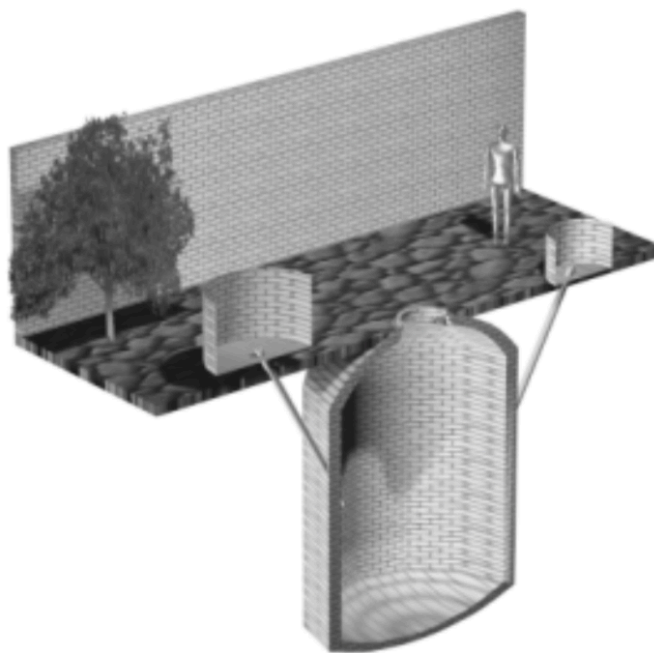


Figura 4 – Biodigestor modelo chinês. Fonte: Deganutti et al., (2002).

Contudo, deve-se manter atento à vedação pois podem ocorrer vazamentos do biogás. Neste modelo, parte do gás é liberado para a atmosfera, de forma que a sua pressão interna seja reduzida, e devido a esta característica, o tipo chinês não é utilizado em instalações de grande porte. O substrato é fornecido de forma contínua e é exigida uma concentração de sólidos totais (TS) de aproximadamente 8%, para que não haja obstruções no sistema de entrada e na circulação do material (Deganutti et al., 2002).

#### 2.5.4.2 Modelo indiano

Sua configuração consiste em um gasômetro - em formato de campânula – o qual fica imerso na biomassa em fermentação e um tanque de fermentação, dividido em duas câmaras por uma parede central. A divisão tem como objetivo promover a circulação do material por todo o interior da câmara de fermentação. Diferente do modelo chinês, a pressão deste se mantém constante uma vez que o volume do tanque varia a medida que o gasômetro se desloca verticalmente conforme o biogás é produzido. O abastecimento do substrato no modelo indiano também se dá de forma contínua e deve possuir uma concentração de TS em torno de 8% pelos mesmos motivos do modelo chinês (Deganutti *et al.*, 2002). Sua configuração é ilustrada através da Figura 5.

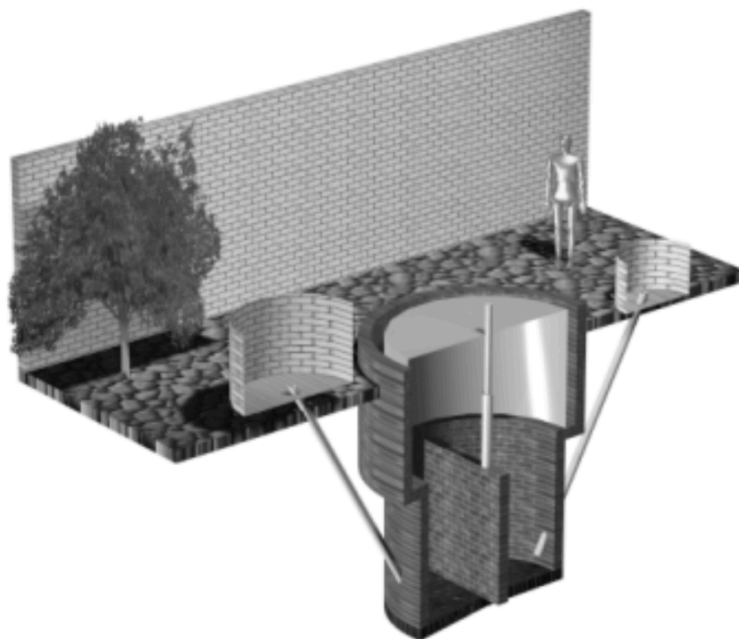


Figura 5 – Biodigestor modelo indiano. Fonte: Deganutti et al., (2002).

## 2.6 Composição

O tipo de resíduo orgânico e as condições físico-químicas aplicadas ao processo de biodigestão influenciam diretamente na porcentagem de cada composto gasoso no biogás. Independentemente da matéria orgânica empregada em sua obtenção, ele contém o metano e gás carbônico como seus principais constituintes (Marques, 2012), assim como pode ser observado na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição básica do biogás. Fonte: Marques (2012) apud CETESB (2011)

Composição	Porcentagem do Volume de Gás Produzido
Metano ( $\text{CH}_4$ )	50 – 70%
Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )	25 – 50%
Nitrogênio ( $\text{N}_2$ )	0 – 7%
Gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0 – 3%
Oxigênio ( $\text{O}_2$ )	0 – 2%
Hidrogênio ( $\text{H}_2$ )	0 – 1%
Amoníaco ( $\text{NH}_3$ )	0 – 1%
Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ )	0 – 0,2%
Gases em Menor Concentração	0,01 – 0,6%

A presença significativa de metano no biogás o faz ser um gás combustível, cujo poder calorífico inferior é diretamente vinculado a proporção de metano presente no composto. Contudo, a utilização do biogás em seu estado puro exige atenção uma vez que certos compostos são corrosivos e outros diminuem o seu poder calorífico. A tabela 5 indica diferentes composições do biogás e sua consequente variação de poder calorífico inferior:

Tabela 5 - Variação do poder calorífico inferior em relação à composição do biogás.  
Fonte: Avellar (2001) apud Iannicelli (2008).

Composição química do biogás (%)		PCI (MJ/kg)	Peso específico (kg/m <sup>3</sup> )	PCI volumétrico (MJ/m <sup>3</sup> )
CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>			
90	10	1.947	1.839	3.581
60	40	9.778	1.464	14.318
40	60	17.680	1.214	21.469
35	65	20.191	1.152	23.256
25	75	26.126	1.027	26.826
15	85	33.7022	0.919	30.975
5	95	43.709	0.777	33.953
1	99	48.672	0.727	35.375

A partir da tabela acima, é possível notar que a remoção de CO<sub>2</sub> é indispensável para que o potencial energético do biogás seja maximizado. No entanto, de acordo com Kárászová *et al.* (2012), o maior problema presente no tratamento do biogás não consiste neste processo de remoção em si, uma vez que o mesmo tem sido um forte objeto de pesquisa e desenvolvimento de tecnologia nos últimos anos. A tarefa crucial consiste na remoção de compostos como sulfeto de hidrogênio, água, siloxanos e outros compostos contendo enxofre.

Segundo Andreoli *et al.* (2003), o biogás não é tóxico em condições normais de produção, devido a seu baixo teor de monóxido de carbono. Contudo, ele possui impurezas não desprezíveis, como por exemplo o sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), que além de possuir mau odor, se mostra altamente inconveniente em processos de recuperação de energia devido a sua capacidade de se converter a dióxido de enxofre e ácido sulfúrico – compostos altamente corrosivos e ambientalmente perigosos. Dependendo da composição da matéria orgânica fermentada durante o processo, a quantidade de H<sub>2</sub>S pode variar de 10 até 10.000 ppmv (0.0001-1%

vol), sendo letal na proporção de 500 ppm. Outro contaminante comum é a amônia ( $\text{NH}_3$ ), que por sua vez, se mostra menos nociva pois, apesar de ser corrosiva, seu produto da combustão aumenta em pequenos níveis as emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ). Os siloxanos são considerados o terceiro pior contaminante em biogás oriundo de aterros sanitários. Sua presença na combustão é nociva pois implica na formação de micro cristais de sílica (Abatzoglou, 2008).

Já os outros gases que compõem o biogás não contribuem para a toxicidade ou nocividade do mesmo (Andreoli, 2003). Por outro lado, dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que por sua vez ocupa uma proporção volumétrica considerável (25-50%), exige o aumento das capacidades de armazenamento, e quanto maior o seu teor no biogás, menor será o poder calorífico do mesmo.

## **2.7 Purificação do biogás**

Segundo Gehring (2014), a finalidade do processo de purificação do biogás consiste na retirada de impurezas do metano para que seu potencial energético seja aumentado e os danos provocados em equipamentos e emissões de gases nocivos seja reduzido. Conforme visto no tópico anterior, o teor de metano e impurezas varia de acordo com o processo de formação do biogás. Logo, o seu grau de tratamento variará de acordo com a tecnologia na qual ele será empregado – que por sua vez podem ser diversas.

De acordo com Abatzoglou (2008), há duas categorias em que se pode dividir os métodos de purificação do biogás:

1. Físico-químicos – absorção ou adsorção reativas ou não reativas;
2. Biológicos – consumo dos contaminantes por organismos vivos e sua conversão para compostos menos nocivos

Khan (2017) apresenta as técnicas fisioquímicas empregadas na remoção de compostos indesejáveis de acordo com os tipos de impurezas, como mostrado na Tabela 6 abaixo.

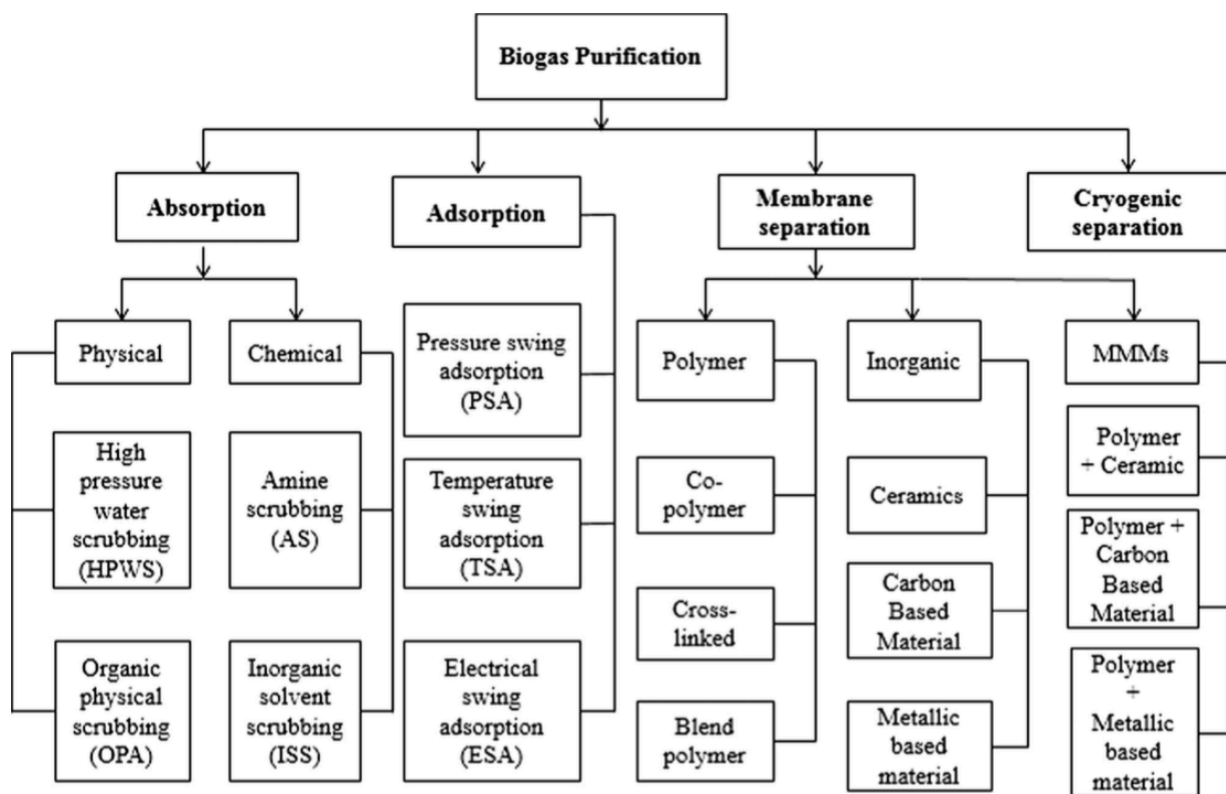


Figura 6 - Técnicas de purificação de impurezas do biogás. Fonte: Khan (2017)

A partir da Figura 6, pode-se perceber que a maioria dos processos se repetem para a maioria das impurezas. Visto isto, estas técnicas serão explicadas a seguir, tomando como exemplo de impureza, a água:

### 2.7.1 Remoção da umidade (secagem)

A temperatura que o biogás se encontra influenciará diretamente na quantidade de água e vapor d'água que ele pode absorver. Ainda no biodigestor, sua umidade relativa é de 100%, e há três métodos principais de se efetuar a secagem do biogás, sendo eles a condensação, secagem por adsorção e por absorção.

#### 2.7.1.1 Condensação

Consiste no resfriamento do biogás abaixo do ponto de orvalho, de forma que a umidade seja condensada e então o líquido retirado antes de reaquecer o gás novamente. Este método permite a redução do teor de vapor d'água para até

0,15% em volume, e, se o gás for comprimido previamente, o condensado é extraído de maneira ainda mais eficiente (FNR, 2010).

#### **2.7.1.2 Adsorção**

Segundo Ruthven (1984) e Rouquerol (1999) apud Alves *et al.*, (2015), a adsorção em sólidos porosos trata-se um fenômeno de concentração espontânea de moléculas ou íons presentes em uma fase fluida (o adsorvivo), que ocorre na superfície de um material sólido (o adsorvente). São utilizados gel de sílica, óxido de alumínio e zeólitos. Os adsorventes são instalados em um leito fixo e são alcançadas temperaturas consideravelmente menores em comparação ao método de condensação e, devido aos melhores resultados proporcionados, a adsorção pode ser destinada a qualquer tipo de uso do biogás.

#### **2.7.1.3 Absorção**

Neste método, o biogás flui em uma torre absorvedora em contracorrente a uma solução de glicol ou trietilenoglicol, de forma que são retirados do biogás bruto tanto o vapor d'água quanto hidrocarbonetos superiores. Em termos econômicos, indica-se esta técnica para fluxos mais elevados.

### **2.7.2 Separação por membranas**

A tecnologia de separação por membranas é um método à escala molecular, e inclui vantagens como eficiência energética, fácil execução e baixo custo. Neste processo,  $H_2S$  e  $CO_2$  atravessam a membrana para o lado do permeado, enquanto o  $CH_4$  não atravessa a mesma. Vale ressaltar que o alcance de alta pureza do metano inclui, por sua vez, altas perdas de teor de metano, uma vez que moléculas de  $CH_4$  podem passar pela membrana (Sun *et al.*, 2015).

### **2.7.3 Tratamento biológico**

Segundo Sun *et al.* (2015), outro tratamento utilizado para o aumento de teor de  $CH_4$  proveniente de aterros e digestão anaeróbia se dá através da ação de

organismos quimioautotróficos (*Methanobacterium thermoautotrophicum*). Através deste método biológico, CO<sub>2</sub> é transformado em CH<sub>4</sub> enquanto H<sub>2</sub>S é retirado destes gases efluentes.

## **2.8 Aproveitamento do biogás**

A conversão energética do biogás se dá em diversos níveis e envolve tecnologias específicas. Uma primeira opção consiste na conversão da energia química do combustível em energia térmica – através da queima do metano. A partir de então, pode-se aproveitar tal energia térmica diretamente na cogeração ou então converte-la em energia mecânica ou elétrica (Gehring, 2014).

Se o produto final desejado é calor, o emprego do biogás se dá geralmente através de caldeiras ou combustão direta. Já se o almejado for a eletricidade, alimenta-se diretamente motores de combustão interna ou turbinas à gás/vapor com o combustível (Abatzoglou, 2008).

A geração de energia elétrica a partir do biogás pode se dar através de geradores acionados por motores de combustão interna, aplicados em microturbinas a gás, e células a combustível (FNR, 2010). Tais tecnologias são descritas abaixo, e vale ressaltar que há umas mais utilizadas do que outras no cenário atual.

### **2.8.1 Motores de combustão interna**

Há dois tipos de motores de combustão interna: o de ciclo Otto e o de ciclo Diesel. A principal característica que difere ambos é a forma em que a combustão ocorre: o ciclo Diesel compreende a combustão através da compressão de ar na câmara de combustão e injeção do combustível em condições de altas pressões e temperaturas para atingir as condições de autoignição. No ciclo Otto, a ignição do combustível é dada através de uma centelha na câmara de combustão (Pecora, 2006). A maioria das usinas de cogeração – geração simultânea de eletricidade e calor – utiliza motores de combustão interna acoplados a um gerador. A rotação de operação dos motores é constante de maneira que o gerador acoplado forneça energia elétrica compatível com a frequência da rede e otimize os rendimentos.

### **2.8.1.1 Ciclo Otto**

Tais motores são operados com uma mistura próxima da estequiométrica (FNR, 2010). Porém, a razão de compressão é menor que em motores de ciclo Diesel, implicando em uma menor eficiência. Vale ressaltar que os motores do ciclo Otto exigem um biogás com teor de metano mínimo de 45%. Se não houver biogás disponível, eles podem ser operados com outros tipos de gás combustível, como por exemplo o gás natural.

### **2.8.1.2 Ciclo Diesel**

A principal forma de se aplicar o biogás a motores que operam no ciclo Diesel é mudar sua configuração para a de *dual fuel*. De acordo com Ray *et al.* (2013), na fumigação, o motor é modificado de forma que um combustível gasoso – denominado de combustível primário – seja admitido junto com o ar para o cilindro. No modo dual, os combustíveis são injetados separadamente já na fase de compressão. Devida a alta octanagem dessa mistura, não há autoignição, permitindo com que a combustão ocorra através da injeção de uma pequena quantidade de diesel (pilot fuel) e seu contato com a mistura comprimida. A parcela de diesel (injeção principal) necessária para a ignição se mostra entre 10% e 20% da necessária para a operação do motor com apenas o diesel como combustível.

Devido ao considerável poder calorífico do biogás, os motores a diesel no modo *dual fuel*, mostraram baixa redução em seu desempenho em relação aos motores de ciclo Otto modificados e os de ciclo Diesel operando com um só combustível.

## **2.8.2 Turbinas e microturbinas a gás**

Turbinas a gás são compostas por um compressor, uma câmara de combustão e uma turbina. O biogás é injetado na câmara de combustão, e o processo de queima acontece com o seu encontro com o ar previamente comprimido pelo compressor. A expansão dos gases, em consequência da reação de combustão exotérmica, atinge as turbinas e o excedente de energia não utilizado pelo compressor é aplicado para a geração de energia elétrica. Uma corrente elétrica



alternada de alta frequência é gerada a partir de uma rotação de aproximadamente 96000 RPM (FNR, 2010).

As microturbinas, por sua vez, são pequenas turbinas a gás de alta rotação e baixa temperatura e pressão de combustão, podendo atingir uma potencia elétrica de até 200 kW. Algumas adaptações na câmara de combustão e bicos de injeção de combustível devem ser feitas, e os ruídos de alta frequência emitidos pelas microturbinas são facilmente isolados. Em relação ao teor de enxofre, as turbinas e microturbinas possuem maior tolerância em relação aos motores de combustão interna e são capazes de processar biogás com teores de CH<sub>4</sub> de 35 – 100%. As emissões de CO<sub>2</sub> são bem inferiores em relação aos motores devido a combustão continua com excesso de ar a baixa pressão na câmara de combustão, já a sua eficiência elétrica é relativamente baixa, atingindo até 30% (FNR, 2010).

### 2.8.3 Células a combustível

De acordo com Alves *et al.* (2013), a obtenção de hidrogênio H<sub>2</sub> a partir do biogás e sua aplicação em células a combustível é uma alternativa promissora, uma vez que o H<sub>2</sub> possui uma alta capacidade energética, possuindo mais quantidade de energia por massa do que qualquer outra substância – 121.000 kJ/kg – e a conversão em energia elétrica possui uma eficiência em torno de 60%. São diversas as reações químicas envolvidas na reforma aos quais o CH<sub>4</sub> presente no biogás é submetido para a obtenção de H<sub>2</sub>, os quais podem ser vistos através da Tabela 6. A temperatura das reações endotérmicas e reversíveis pode ser compreendida em uma faixa de 600-1000°C, o que permite uma possível cogeração.

Tabela 6 - Reações químicas envolvidas em processos de reforma do CH<sub>4</sub>. Fonte: Alves et al (2013)

Type of reaction	Thermal reaction, $\Delta H_{298}$ (kJ/mol)
$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO} + 3\text{H}_2$	206
$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$	-41.2
$\text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2 + 4\text{H}_2$	165
$\text{CH}_4 \leftrightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$	74.9
$2\text{CO} \leftrightarrow \text{C} + \text{CO}_2$	-172.4
$\text{CO} + \text{H}_2 \leftrightarrow \text{C} + \text{H}_2\text{O}$	-131.3
$\text{CH}_4 + 1/2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$	-35.6
$\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$	-801.7
$\text{CH}_4 + 1/2x\text{O}_2 + y\text{CO}_2 + (1-x-y)\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow (y+1)\text{CO} + (3-x-y)\text{H}_2$	$\approx 0$
$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	247.4
$\text{CH}_4 + \beta\text{CO}_2 + (1-\beta)/2\text{O}_2 \leftrightarrow (1+\beta)\text{CO} + 2\text{H}_2$	$(285\beta - 38) \quad 0 \leq \beta \leq 1$

A conversão de energia química em energia elétrica presente nas células a combustível ocorre com alta eficiência, sem combustão e, consequentemente, com baixos níveis de emissões poluentes, quando comparada a técnicas convencionais. São diversos os modelos, visto que foram desenvolvidos para o interesse de mercados diferentes. Células PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell*), MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell*) e SOFC (*Solid Oxide Fuel Cell*) possuem forte aplicação em unidades estacionárias, sendo a última (SOFC) altamente eficiente (50-60%) e versátil quanto ao seu peso e tamanho – podendo ser aplicada em diferentes sistemas. Já os setores residencial e automobilístico possuem restrições quanto a estes parâmetros previamente citados, sendo o modelo mais estudado e utilizado o PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*) (Alves *et al.*, 2013). Para as aplicações estacionárias, as células SOFC apresentam o maior potencial.

### 3. Metodologia

Este estudo consistiu no levantamento da literatura e na seleção de 19 artigos científicos publicados entre 2006 e 2018, todos sobre processos de digestão anaeróbia com resíduos alimentares e seus respectivos desempenhos quanto à produção de biogás e, especificamente, de metano.

Uma vez que a digestão anaeróbia depende de diversos parâmetros experimentais e fatores biológico-físico-químicos, o primeiro passo para que se atendesse a proposta do trabalho foi definir quais propriedades seriam relevantes para o levantamento de dados. Estas propriedades são indicadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Tópicos selecionados para o levantamento de dados das distintas bibliografias

Autor	País	Tipo de substrato	Configuração da AD		TS (sólidos totais)	VS (sólidos voláteis)
			Regime alimentação	Número de estágios		

VS/TS	pH	OLR (carga orgânica)	HRT (tempo de retenção hidráulica)	Temperatura	Volume do biodigestor	Produção de biogás	Produção de metano	% CH <sub>4</sub>
-------	----	-------------------------	---------------------------------------	-------------	-----------------------	--------------------	--------------------	-------------------

Para os 19 artigos acima citados serem selecionados, antes foi realizado o levantamento do estado da arte mais amplo e algumas referências foram desconsideradas para o presente trabalho, pelo fato de não apresentarem muitas das propriedades apontadas como relevantes para a metodologia, ou de não serem suficientemente rigorosas na descrição dos biodigestores.

Depois de selecionados, houve artigos em que mais de um cenário pôde ser analisado, uma vez que em certos casos, a codigestão de substratos era realizada em diversas escalas de concentração, e em outros, variava-se a taxa orgânica para um mesmo tipo de resíduo. Com isto, o número de casos considerados aumentou para 59.

É relevante citar que, para que todos os casos pudessem ser integralmente comparados em relação a todas suas propriedades, os casos de modo de alimentação batelada, uma carga orgânica (OLR) foi introduzida artificialmente. Esta foi deduzida a partir do tempo de retenção (HRT) do processo. Já algumas situações em que havia a codigestão de diferentes matérias orgânicas, foi necessário realizar o cálculo para se obter o teor de TS e VS do substrato a ser introduzido no sistema, de acordo com a proporção indicada pelo próprio artigo. Além destes cálculos iniciais, o trabalho de conversão de unidades também foi recorrentemente realizado para as propriedades fornecidas pelos artigos.

Como o objetivo principal deste estudo é obter modelos matemáticos para relacionar diferentes variáveis do processo, os gráficos foram traçados com auxílio do programa MatLab, a partir de dois tipos de categorização do processo, ilustrados pela tabela 8.

Tabela 8 – Categorização para a geração de gráficos relacionados ao processo

Categorização	
I	II
<i>Modo de digestão anaeróbia</i>	<i>Tipo de substrato</i>
Batelada	Resíduos alimentares (FW)
Semicontínua - 1 Fase	Resíduos vegetais e frutas (FVW)
Semicontínua - 2 Fases	
Contínua - 1 Fase	Codigestão (possível combinação entre FW, FVW, resíduos verdes (GW), resíduos de cozinha (KW))
Contínua - 2 Fases	

A categorização representada na tabela acima foi realizada a partir de propriedades qualitativas de configuração e alimentação do sistema, de modo que posteriormente fosse possível obter-se conclusões a respeito do seu perfil de resposta para modos diferentes tanto em suas características de operação quanto de origem de substrato. As categorizações serviriam como um ponto de partida para a seleção de certas configurações do possível projeto, para avaliar uma possível futura implementação experimental no campus da PUC-Rio,

## 4. Resultados e discussões

A concatenação das informações características dos 59 casos estudados neste trabalho possibilitou a construção de diversos gráficos, a partir dos quais foi possível notar tendências e bruscas distinções entre diferentes categorizações do processo. Ao todo, foram traçados 21 gráficos para cada categorização, e a análise dos mesmos será feito abaixo, através da comparação entre o modo de digestão anaeróbia e o tipo de substrato.

### 4.1 Sólidos voláteis e sólidos totais

#### 4.1.1 Produção de CH<sub>4</sub> em função de VS e TS

A primeira análise de rendimento do processo pode ser feita através da produção de metano adquirida em função do teor de VS e TS da mistura, respectivamente, a ser introduzida no biodigestor. As figuras 7 e 8 ilustram estas relações:

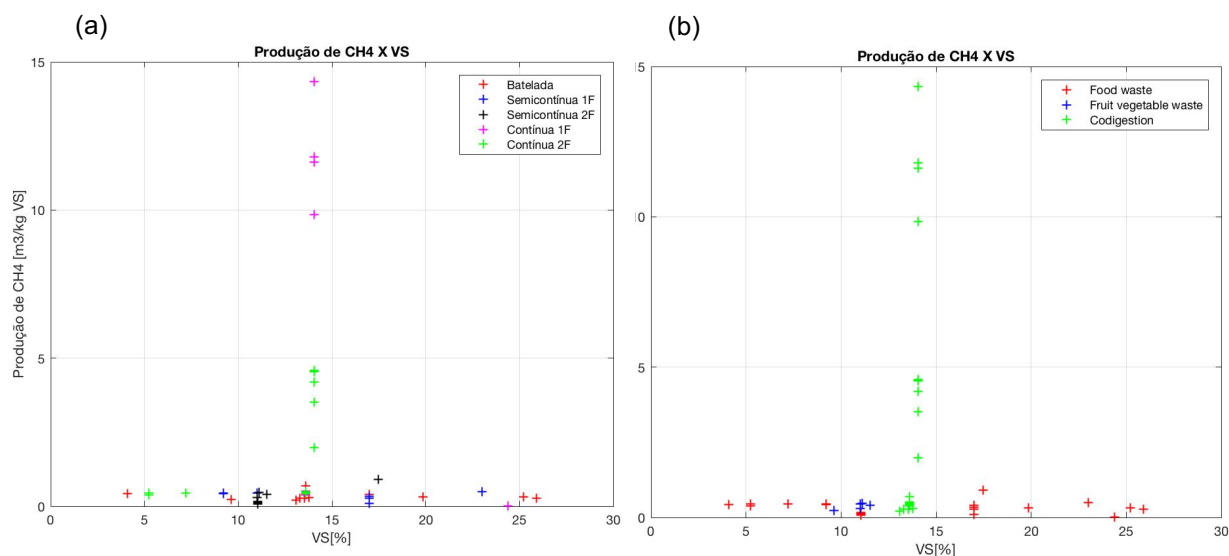


Figura 7 – Relação entre produção de CH<sub>4</sub> e VS visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II, conforme Tabela 8 (pág. 36)

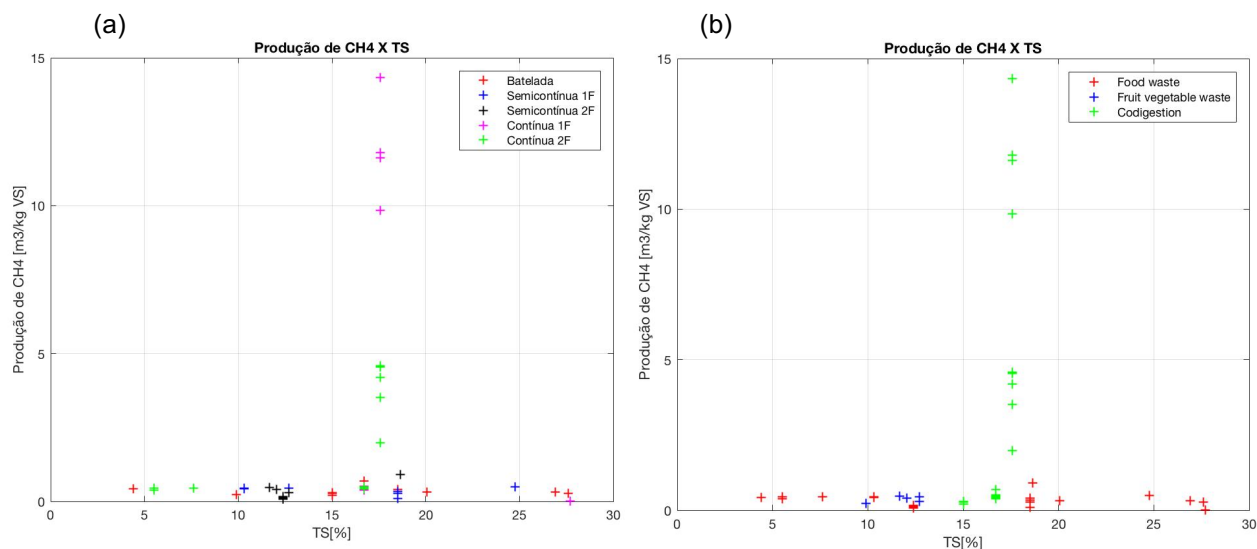


Figura 8 – Relação entre produção de CH<sub>4</sub> e TS visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II

É possível perceber, através da Figura 7, que os maiores valores foram obtidos para concentrações de VS de aproximadamente 14%, unanimemente em substratos oriundos da codigestão e em processos de alimentação contínua. Já a Figura 8 indica que os valores máximos para a produção de metano ocorrem em materiais orgânicos com TS de 18%. Além disso, é evidente que, salvo os maiores valores para a produção de CH<sub>4</sub>, que compreendem-se na faixa de 1,98 – 14,34 m<sup>3</sup>/kg VS, a produção de CH<sub>4</sub> flutua numa faixa bem próxima, e apresenta um valor médio de 0,343 m<sup>3</sup>/kg VS.

#### 4.1.2 VS em função de TS

Tanto o teor de sólidos totais quanto o de voláteis são importantes parâmetros a se considerar quando se trata de resíduos sólidos orgânicos. A partir dos dados levantados nas bibliografias, a Figura 9, foi traçada para que a relação entre estes 2 parâmetros pudesse ser confirmada, e as particularidades quanto a cada categorização fossem identificadas.

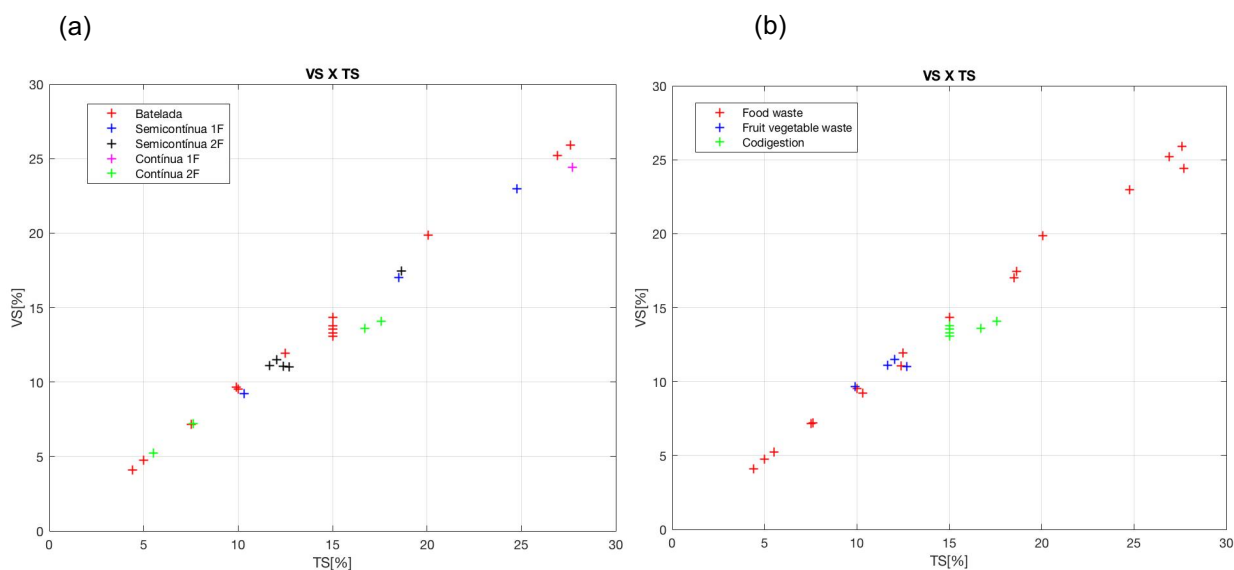


Figura 9 – Relação entre o teor de sólidos voláteis e o teor de sólidos totais do substrato introduzido ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

A relação entre o teor de VS e TS se apresenta de forma direta e linear. Através dos gráficos acima, é possível visualizar que dentro da categorização II, todos os substratos oriundos de codigestão situam-se numa faixa de 15-18% de sólidos totais e aproximadamente 14% de sólidos voláteis. Já os substratos caracterizados como “food waste” são os que apresentam maior dispersão de valores, podendo assumir desde menores até maiores teores tanto de sólidos totais quanto voláteis. Isto se dá possivelmente devido à ampla definição a qual esta categoria pode se enquadrar, dependendo da bibliografia. Esta característica se repete na categorização I para o modo de alimentação de batelada, o qual também apresenta uma grande variação nos valores de TS e VS.

Uma vez que tais parâmetros são característicos da matéria orgânica em questão, e a configuração de alimentação do biodigestor não muda tal composição química, é interessante analisar a parametrização para cada tipo de substrato dentro da caracterização II, e também para todos os tipos. Tais relações são demonstradas na Tabela 10.

Tabela 9 – Relações lineares entre VS e TS para os substratos da categorização II.

Identificação da curva	Equação linear	R <sup>2</sup>
FW	$y = 0.9255x - 0.0601$	0.995
FVW	$y = 0.5077x + 4.8611$	0.68287
CD	$y = 0.2521x + 9.5454$	0.6661
Todos	$y = 0.8673x + 0.213$	0.9609

A Tabela 9 indica uma equação para resíduos alimentares (FW) de excelente qualidade, assim como a equação geral (para todos os tipos de substratos), devido aos seus R<sup>2</sup> elevados.

## 4.2 Produção de CH<sub>4</sub>

### 4.2.1 Produção de CH<sub>4</sub> em função do Volume do biodigestor

O volume do reator no qual ocorre a biodigestão também foi considerado um parâmetro importante para averiguar qualquer correlação entre o mesmo e a produção de metano no processo. A partir deste dado obtido em cada artigo, foi possível traçar um gráfico para cada categorização novamente, representado pela Figura 10.

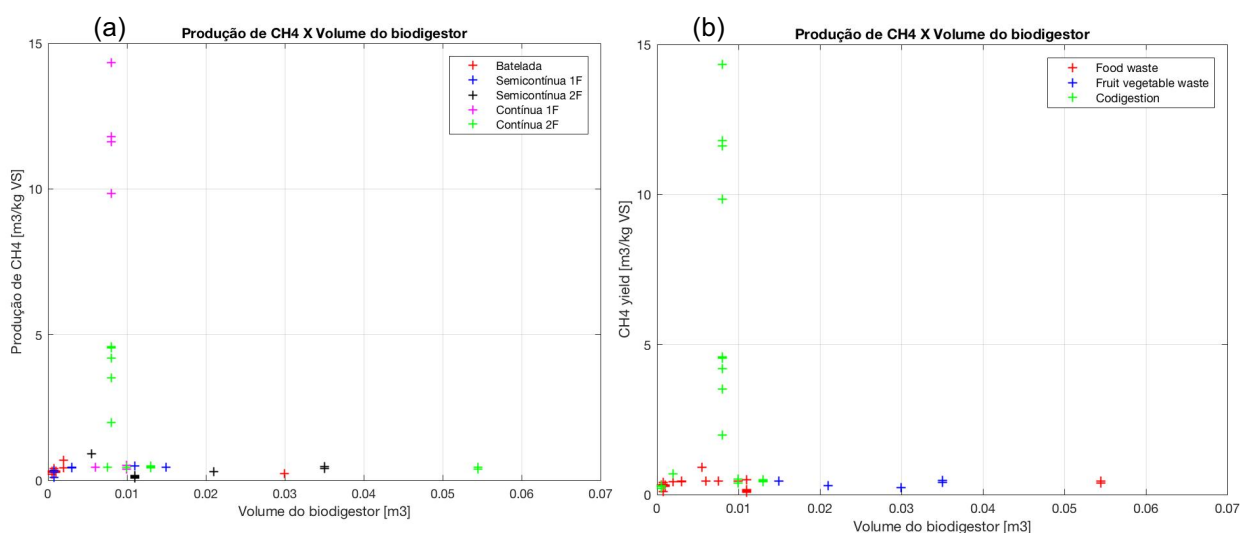


Figura 10 – Relação entre produção de CH<sub>4</sub> e volume do biodigestor visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.



Assim como nos gráficos anteriores, não há uma relação clara entre o volume de metano obtido na digestão anaeróbia e o volume do reator. Contudo, é de se notar que os maiores valores de produção, entre 3,51 e 14,34 m<sup>3</sup>/ kg VS de metano e oriundos de processos contínuos com substratos codigeridos, são referentes a um volume de 0,008 m<sup>3</sup>, ou seja, um reator de 8 L, que indica uma escala laboratorial. Já os menores níveis de produção não mostram um padrão específico, porém flutuam em uma faixa próxima, de 0,1 – 0,5 m<sup>3</sup>/ kg VS. Além disso, nota-se que salvo um ponto específico, todos os processos de batelada se dão em reatores de capacidade em uma faixa de 0,0005 – 0,002 m<sup>3</sup>, ou seja, de 0,5 – 2 L. O valor médio para o volume, considerando todas as literaturas, foi de 0,0095 m<sup>3</sup>, ou seja, 9,5L com um desvio padrão de 0,01147, o que mostra uma predominância dos estudos em escala laboratorial e piloto.

#### 4.2.2 Produção de CH<sub>4</sub> em função da Carga orgânica (OLR)

A carga orgânica introduzida ao sistema é um parâmetro essencial para a análise de rendimento do sistema – indicado na Figura 11 – uma vez que altas taxas podem levar a inibição da ação de bactérias acetogênicas e, conseqüentemente, na produção do biometano (Browne and Murphy, 2013).

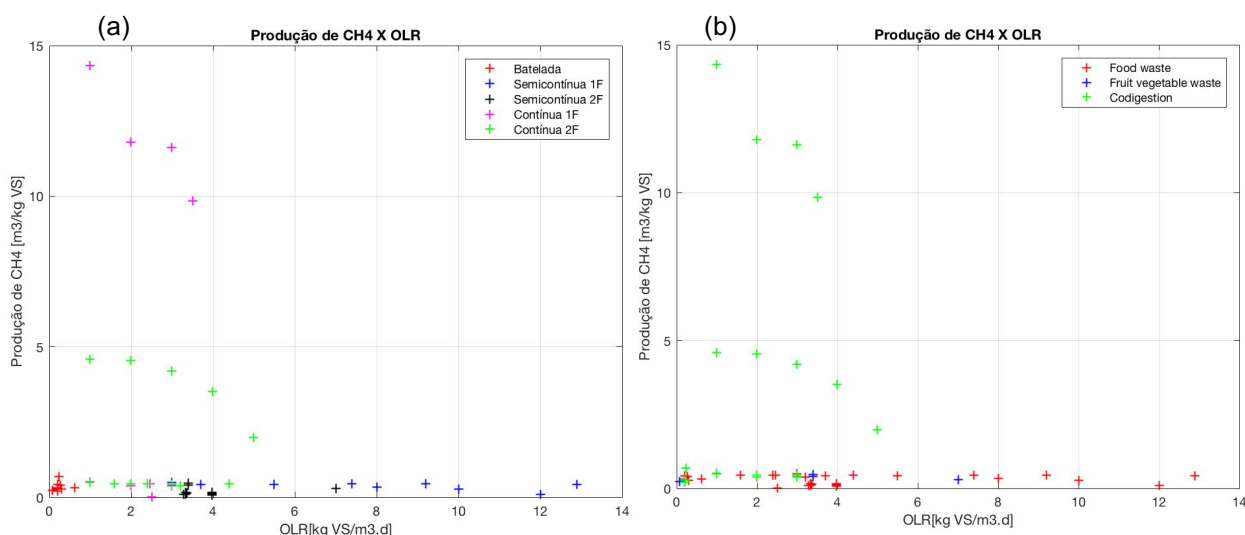


Figura 11 – Relação entre produção de CH<sub>4</sub> e a carga orgânica introduzida ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

É importante enfatizar o fato de se ter assumido o conceito de OLR para os sistemas com modo de alimentação a batelada, pois ele não é condizente com a realidade da alimentação, mas foi considerado como um parâmetro de equivalência para a análise de comportamento do sistema não ser prejudicada. Sua obtenção foi feita a partir da divisão do valor total de massa (kg VS) de carga orgânica do experimento em questão pelo tempo de retenção hidráulica (dias) e volume do reator ( $m^3$ ) referentes ao processo.

A partir da Figura 11.a, é possível perceber que a maioria dos processos de alimentação a batelada concentram-se na faixa dos menores valores para OLR, de 0,07 – 0,625 kg VS/ $m^3$ .d, assim como baixa produção de  $CH_4$ , visto que tal configuração não permite otimizar separadamente cada etapa. Os de alimentação contínua, por sua vez, se situam majoritariamente em uma faixa de carga orgânica de 0.1 - 5 kg VS/ $m^3$ .d, contudo apontam diferentes valores para a produção de  $CH_4$ . Já os de alimentação semicontínua apresentam maiores valores para a OLR quando o processo contém apenas uma fase, podendo variar em torno de 3-13 kg VS/ $m^3$ .d. Porém, a produção de metano decorrente do processo não varia muito, e flutua em uma faixa de valor consideravelmente baixo. Outra conclusão que pode ser feita a partir da Figura 10.b é que os substratos oriundos de codigestão são introduzidos ao sistema através de uma taxa que varia de 0.1 - 5 kg VS/ $m^3$ .d, apresentando os maiores valores para a produção de  $CH_4$ , destacando o interesse em tratar estes resíduos através da codigestão.

#### **4.2.3 Produção de $CH_4$ em função do pH**

O pH do processo é um forte indicador da atividade das bactérias que atuam na digestão anaeróbia. A partir dos valores levantados na literatura, foi possível obter gráficos, representados na Figura 12, que fizessem a relação com o metano resultante desta atividade.

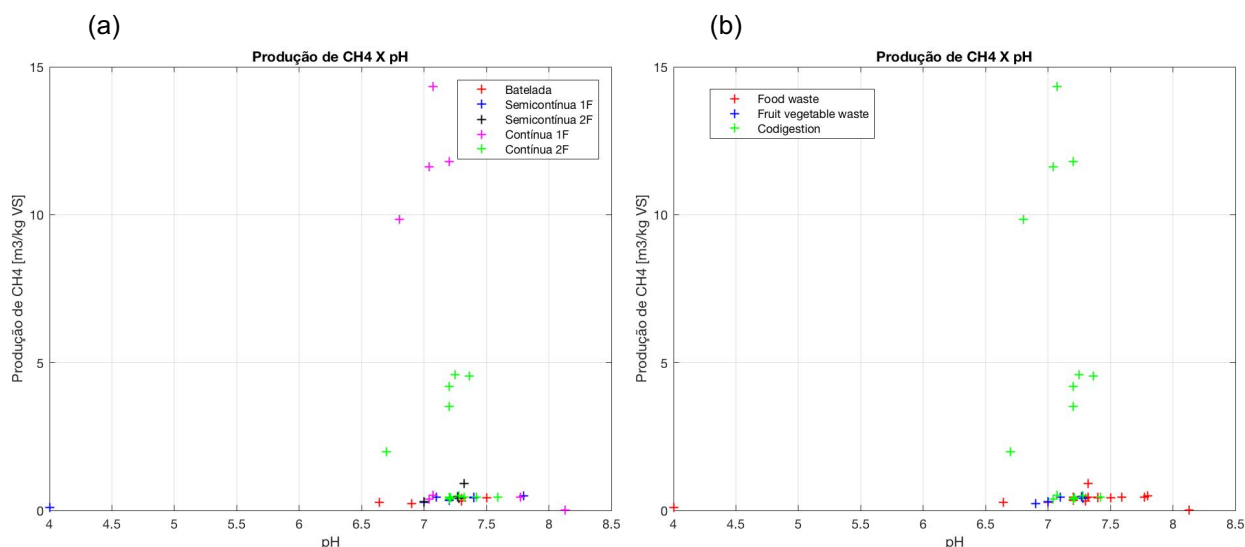


Figura 12 – Relação entre produção de CH<sub>4</sub> e o pH do processo, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

A partir dos gráficos acima, é possível concluir que os dados se dispersam aleatoriamente, não possibilitando um modelo matemático específico. Contudo, conclui-se que o valor médio do pH é 6,9, com um desvio padrão de 0,585. Também nota-se que os maiores valores para a produção de metano, interpretados pela categorização II, ou seja, ligados ao substrato codigerido, encontram-se na faixa de 6,5 – 7,5. É possível notar também que, salvo dois pontos específicos – que provavelmente fornecem os dados da biomassa pura ao invés do pH de solução de alimentação –, todos os casos de codigestão situam-se nesta faixa de pH, o acontece para a categorização I somente no caso de alimentação semicontínua de duas fases.

#### 4.2.4 Produção de CH<sub>4</sub> em função do Tempo de retenção hidráulica

Com o intuito de analisar se o tempo de permanência do substrato no reator influenciava diretamente a produção de metano do processo, os dados foram levantados em cada artigo e foi possível traçar os gráficos, representados na Figura 13.

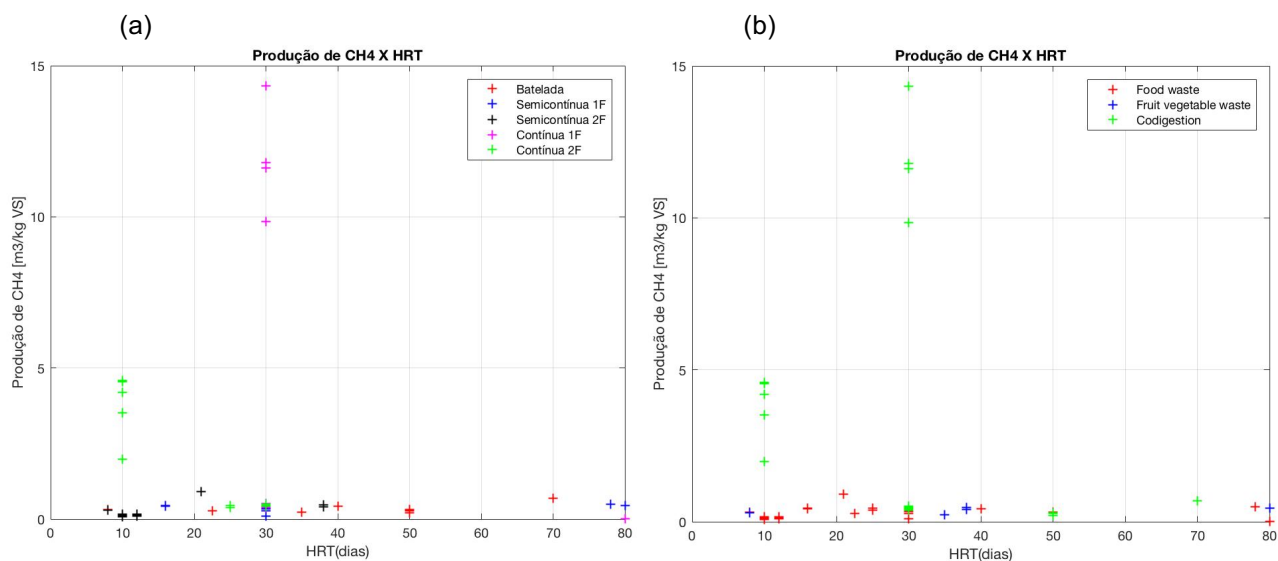


Figura 13 – Relação entre produção de CH<sub>4</sub> e o tempo de retenção hidráulica do sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

Também não é possível perceber um padrão que caracterize a relação entre o tempo de retenção hidráulica do processo e o volume de metano produzido no mesmo. Contudo, é importante ressaltar que os maiores índices de produção se encontram em um HRT de 10 e 30 dias, para os processos contínuos. Já os de batelada mostram maior variação em relação ao seu HRT, que varia de 8 a 70 dias.

#### 4.2.5 Produção de CH<sub>4</sub> em função da Temperatura

A figura 14 fornece a relação entre a temperatura do processo e a produção de biocombustível.

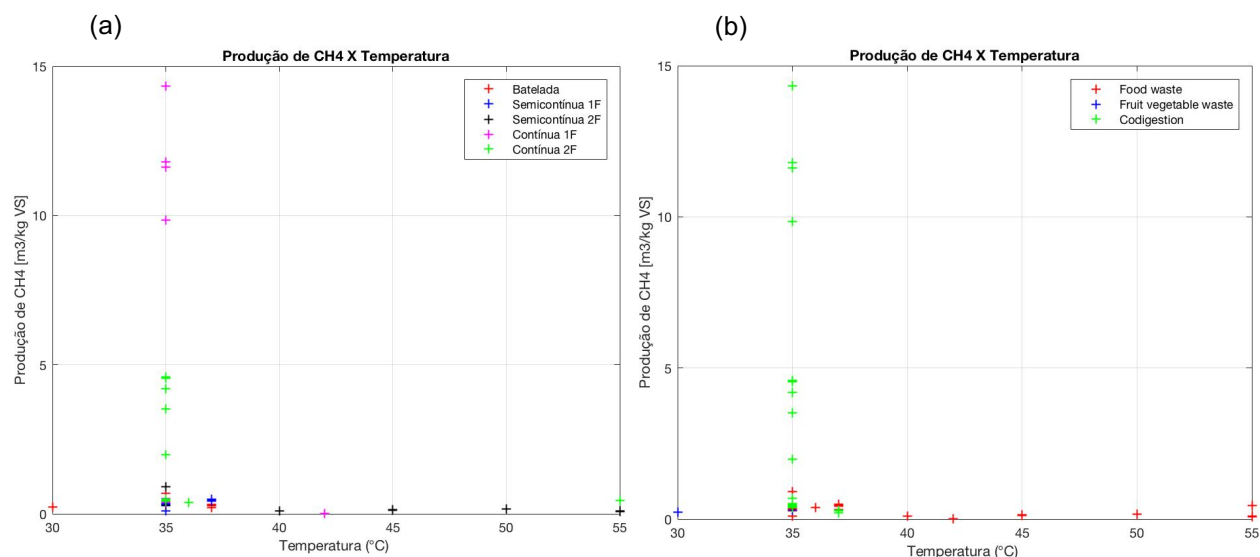


Figura 14 – Relação entre produção de CH<sub>4</sub> e a temperatura do sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

A partir dos gráficos acima, foi possível perceber que os substratos oriundos da codigestão encontram-se em processos atuando na faixa de 35-37°C. A média da temperatura levantada das bibliografias foi de 36.97°C, com um desvio padrão de 6,05%, característicos da temperatura das bactérias mesofílicas.

#### 4.3 Tempo de retenção hidráulica em função da Temperatura, Volume do biodigestor, Carga orgânica e VS

Diversos gráficos foram construídos para que o tempo de retenção hidráulica do processo pudesse ser relacionado com outros parâmetros operacionais do sistema ou características intrínsecas da matéria orgânica digerida. A partir dos dados obtidos para cada categorização, foi possível plotar os gráficos HRT em função da temperatura, do volume do biodigestor, da OLR e do VS dos substratos, representados respectivamente pelas figuras 15, 16, 17 e 18.

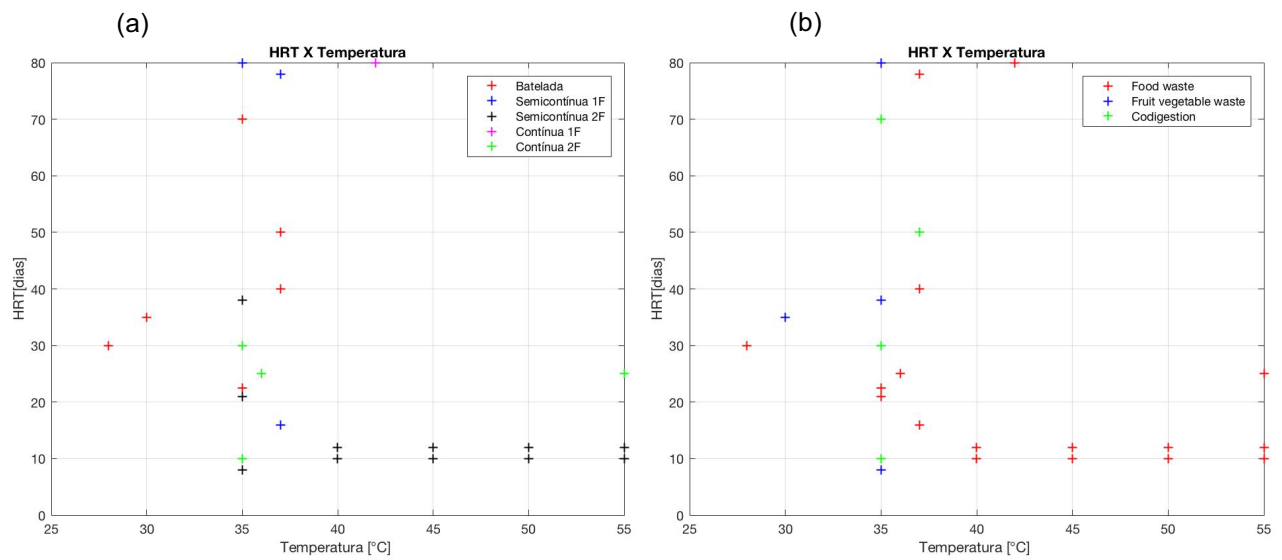


Figura 15 – Relação entre o tempo de retenção hidráulica do processo e a temperatura do sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

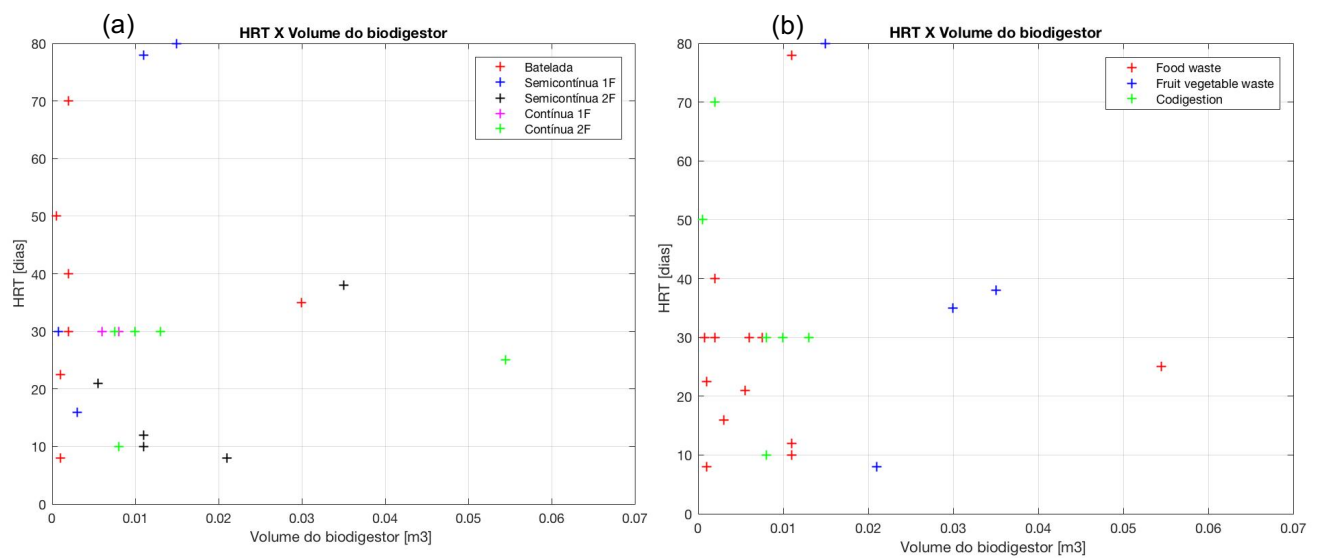


Figura 16 – Relação entre o tempo de retenção hidráulica do processo e o volume do reator, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

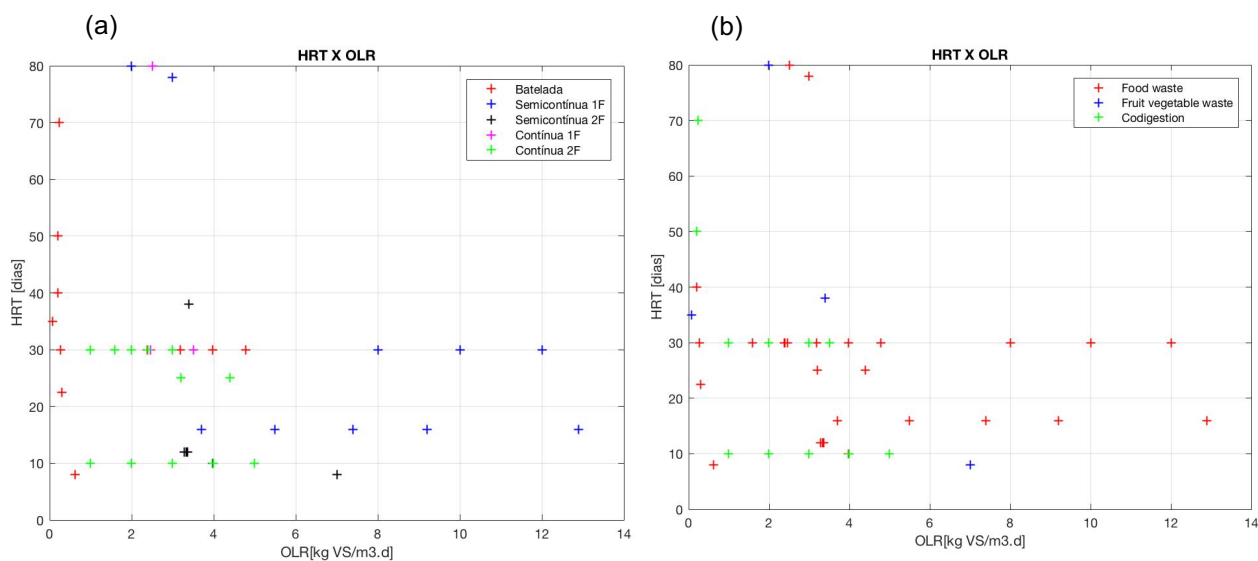


Figura 17 – Relação entre o tempo de retenção hidráulica do processo e a carga orgânica introduzida ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

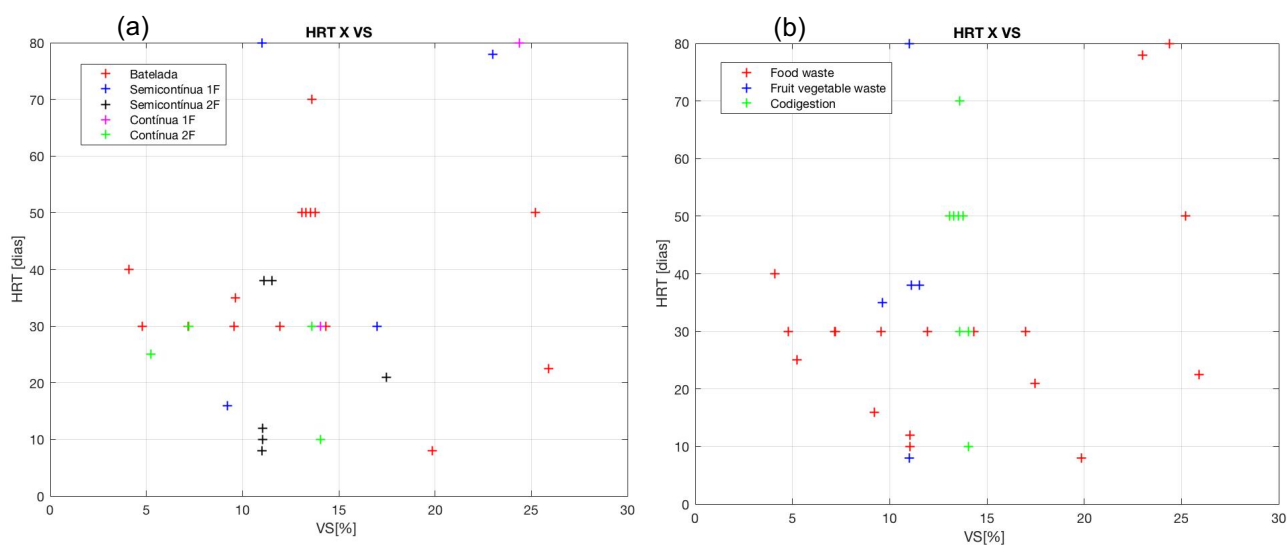


Figura 18 – Relação entre o tempo de retenção hidráulica do processo e o teor de sólidos voláteis do substrato introduzido ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

As quatro figuras acima são caracterizadas pela alta dispersão dos dados levantados e, mais uma vez, não indicam uma correlação direta entre tais parâmetros tanto para nenhum modo de alimentação do sistema, quanto de característica do substrato a ser introduzido no mesmo. Contudo, a Figura 15 mostra a relação entre altas temperaturas e baixos valores de HRT e o perfil decrescente de HRT para o modo semicontínuo de duas fases na Figura 15.a.

Pode-se concluir também que a média e o desvio padrão para os valores de HRT são 28,75 e 17,8 respectivamente.

## 4.4 Teor de metano no biogás

O teor de metano presente no biogás oriundo da decomposição anaeróbia pode diferir de acordo com as inúmeras variáveis do processo. Como o potencial calorífico do biogás é relacionado à quantidade de metano no mesmo, tentou-se correlacionar as mesmas.

### 4.4.1 Teor de metano em função do VS e TS

As figuras 19 e 20 ilustram respectivamente a relação entre o teor de metano e a porcentagem de sólidos voláteis e totais característica do substrato.

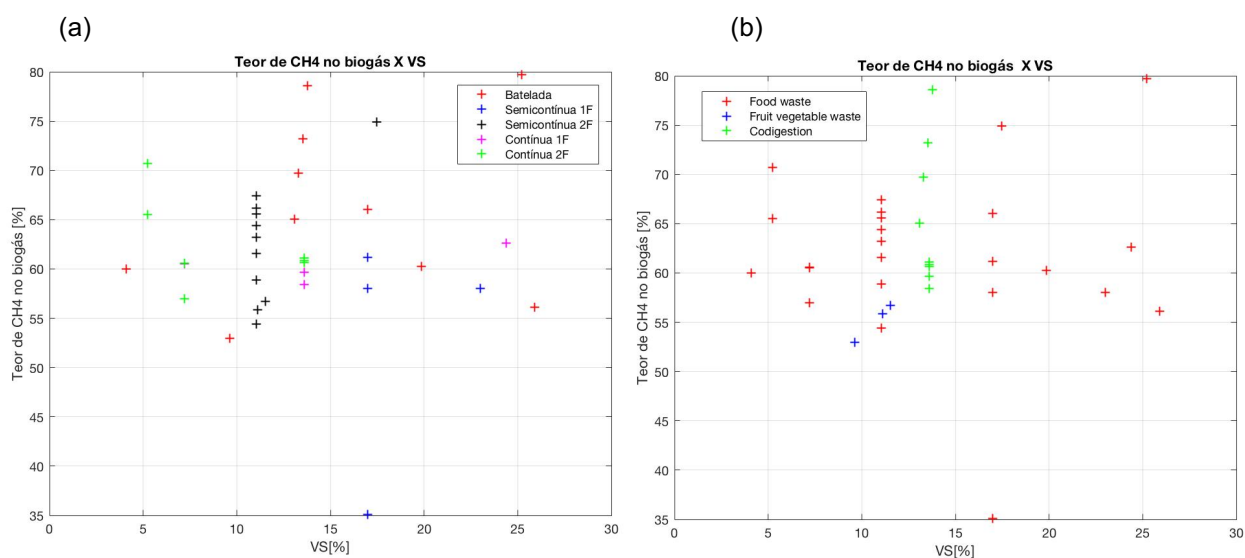


Figura 19 – Relação entre o teor de metano no biogás e o teor de sólidos voláteis do substrato introduzido ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.



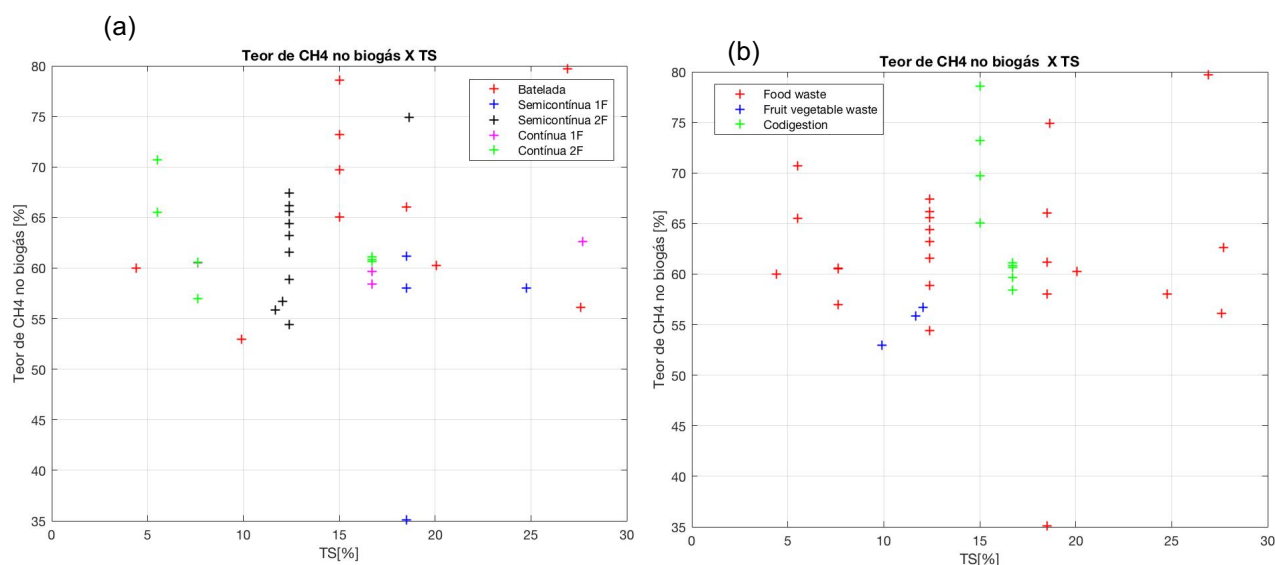


Figura 20 – Relação entre o teor de metano no biogás e o teor de sólidos totais do substrato introduzido ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

As figuras 19.a e 20.a acima permitem a identificação da aproximação de um perfil característico para o teor de metano no biogás oriundo de processos a batelada. Assumindo o valor inicial de 58.39%, conforme o teor de sólidos voláteis aumenta, o teor de metano tende a diminuir, voltando a crescer conforme o VS se aproxima de 15%, até atingir o pico e voltar a diminuir a partir de 15% de sólidos voláteis.

Já para processos semicontínuos de duas fases, é possível analisar que para valores muito próximos tanto de VS quanto de TS, há diferentes teores de metano, variando em uma faixa de aproximadamente 55-67%. Para a categorização dos substratos, nenhuma tendência específica se confirma, podendo os teores de metano variar aleatoriamente conforme a composição química da matéria orgânica. O valor médio e o desvio padrão do teor de metano são 62,17% e 7,8% respectivamente.

#### 4.4.2 Teor de metano em função do Volume do biodigestor

A Figura 21 ilustra a relação entre os dados obtidos na literatura para o teor de metano e o volume do reator de digestão anaeróbia em questão.

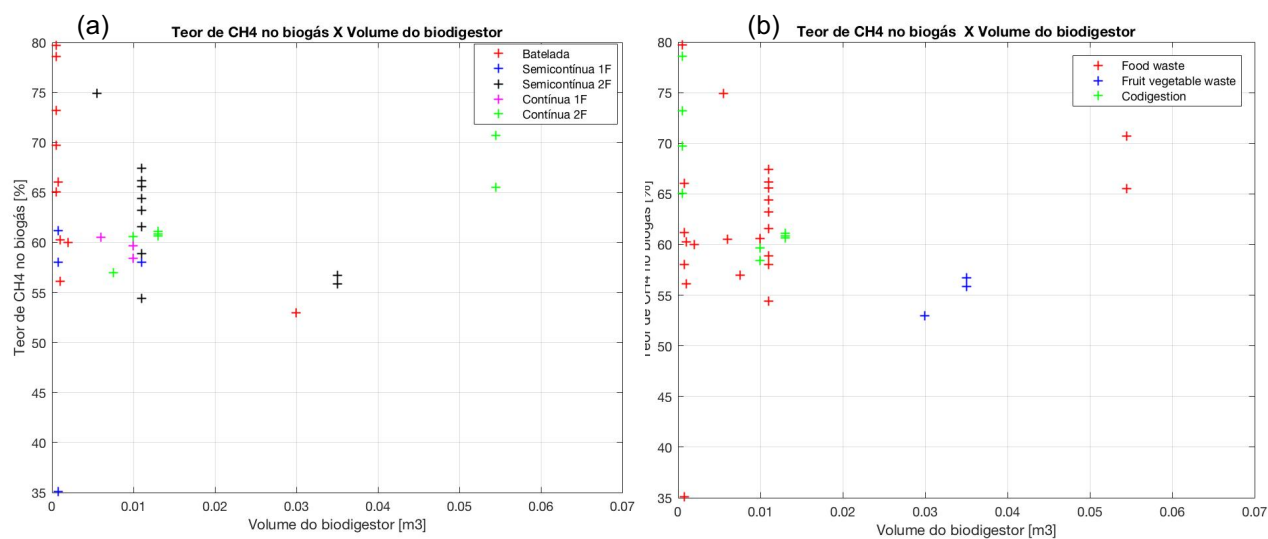


Figura 21 – Relação entre o teor de metanos no biogás e o volume do biodigestor, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

A partir da figura acima, é possível concluir que não há uma relação clara entre o volume do reator e o teor de metano no gás produzido, visto que para valores muito próximos da capacidade volumétrica do biodigestor, valores muito distintos para o teor de metano são adquiridos. Contudo, é de se considerar que os valores máximos para o teor de metano tendem a diminuir conforme o volume do reator aumenta, salvo dois pontos específicos do modo contínuo de duas fases, para o volume de 0,0545 m<sup>3</sup>.

#### 4.4.3 Teor de metano em função da Carga orgânica (OLR)

Como já comentado no tópico 4.1, a carga orgânica introduzida ao sistema é um parâmetro interessante para o estudo do produto do processo. Portanto, foram construídos os gráficos do teor de CH<sub>4</sub> presente no biogás em função da taxa de matéria orgânica adicionada ao processo de digestão anaeróbia. A Figura 22 os ilustra.

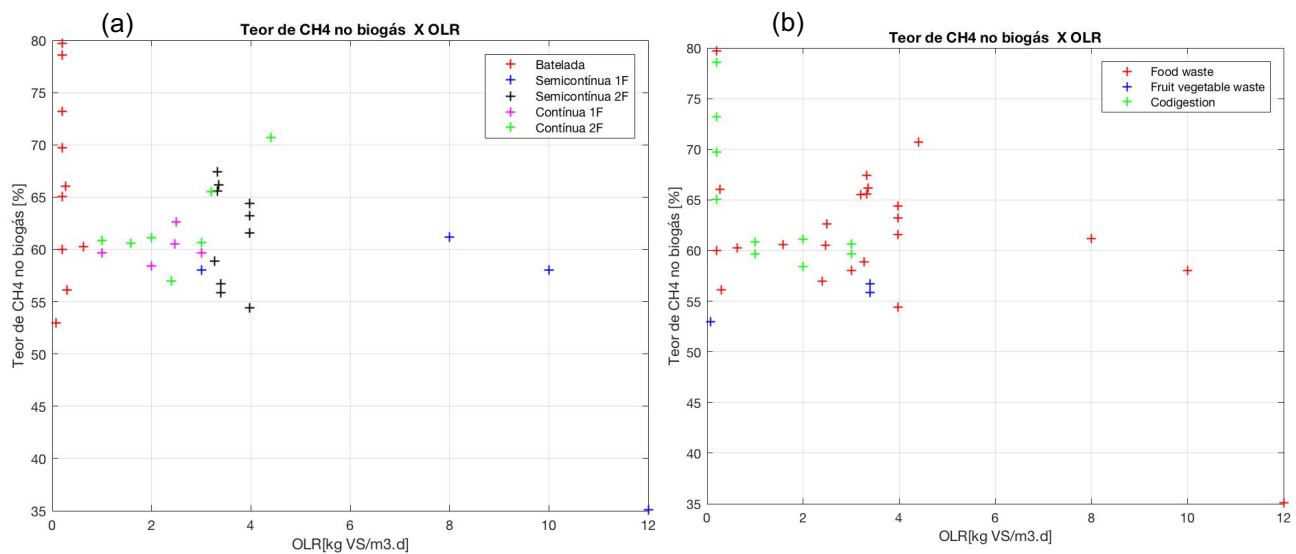


Figura 22 – Relação entre o teor de CH<sub>4</sub> no biogás e a carga orgânica introduzida ao sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

Como comentado anteriormente, o modo de alimentação a batelada indica uma grande variação nos valores de teor de metano, para supostos OLR baixos, o que explica este perfil vertical no início do gráfico. Salvo estes valores, foi possível calcular um valor médio para o teor de CH<sub>4</sub> oriundo de cargas orgânicas entre 0,625 – 12 kg VS/m<sup>3</sup>.d introduzidas ao sistema por diferentes modos de alimentação. Tal valor é de 60,87% com desvio padrão de 6,68.

#### 4.4.4 Teor de metano em função do pH

A Figura 23 ilustra a relação entre o teor de CH<sub>4</sub> do produto do processo e o pH do mesmo.

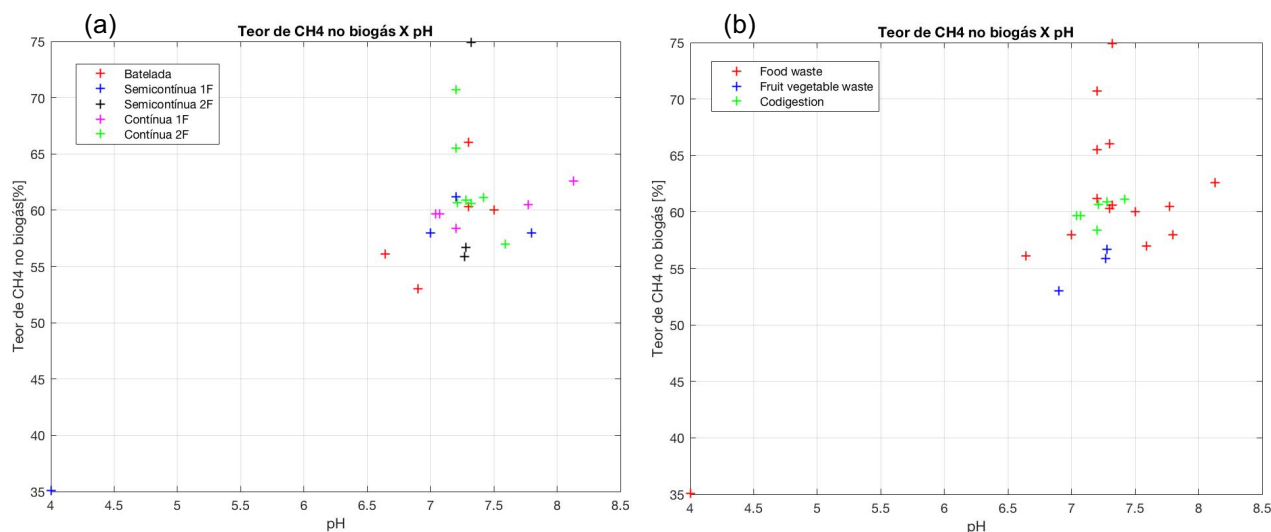


Figura 23 – Relação entre o teor de CH<sub>4</sub> no biogás e o pH do processo de digestão anaeróbia, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

A figura 23.b indica um padrão para o teor de metano no biogás oriundo de substratos codigeridos. O pH de tais substratos situa-se em uma faixa de 7-7.5 e a porcentagem de metano obtida no biogás produzido é em torno de 60%. Contudo, pode-se perceber que muitos pontos para o processo semicontínuo de duas fases não foram considerados, o que é justificado pela falta de informação para o pH do processo nas bibliografias consultadas.

#### 4.4.5 Teor de metano *versus* Tempo de retenção hidráulica

Com o objetivo de concluir se o tempo de permanência da matéria orgânica no processo influencia diretamente o teor de metano contido no biogás produzido, foram traçados os seguintes gráficos, representados pela Figura 24.

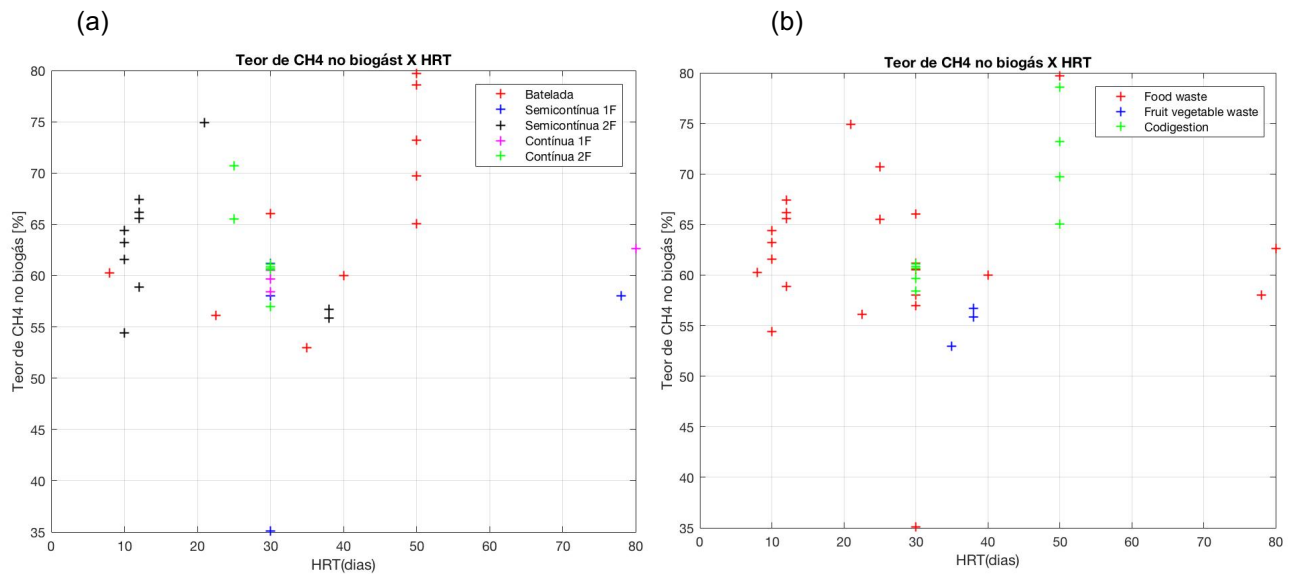


Figura 24 – Relação entre o teor de CH<sub>4</sub> e o tempo de retenção hidráulica do sistema, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

No caso da relação entre o teor de CH<sub>4</sub> e o HRT do processo, o perfil aleatório se repete, sendo difícil de obter uma correlação específica entre tais parâmetros. Contudo, a partir da figura acima, é possível perceber que as maiores concentrações de metano no biogás encontram-se no processo de batelada com um tempo de retenção hidráulica de 50 dias, enquanto para o semicontínuo de duas fases, o HRT é entre 10 e 12,5 dias. Este último parece ser a opção mais viável para produzir biogás, visto que a conversão da biomassa em gás acontece entre 4 e 5 vezes mais rapidamente.

#### 4.4.6 Teor de metano *versus* Temperatura

A Figura 25 ilustra os gráficos de relação entre a porcentagem de CH<sub>4</sub> do biogás e a temperatura na qual o processo de digestão anaeróbia ocorre.

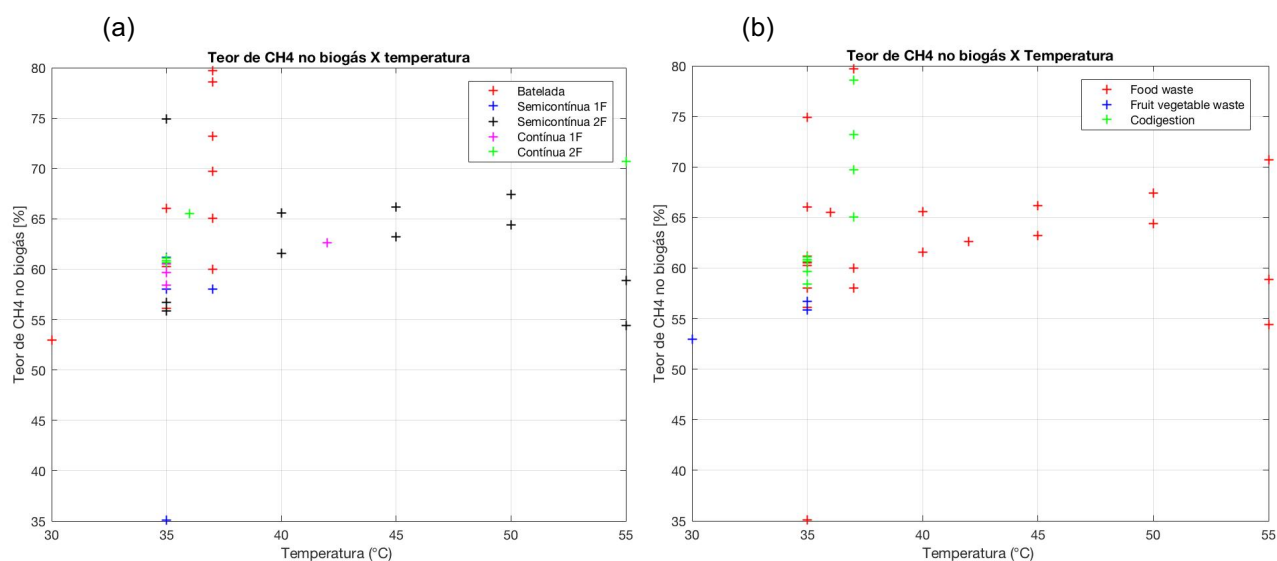


Figura 25 – Relação entre o teor de CH<sub>4</sub> e a temperatura do processo, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

A partir dos gráficos acima, não é possível definir nenhuma expressão matemática que descreva tal comportamento. Porém, é possível perceber um perfil de afunilamento para tais pontos, que tendem a se aproximar de um valor de teor de metano de aproximadamente 64,7%.

#### 4.5 Produção de biogás *versus* Teor de metano

Com o intuito de observar o perfil de produção de biogás das diferentes categorizações estabelecidas para este estudo, foram coletados tais dados e relacionados com o teor de metano presente no mesmo. A Figura 26 ilustra os gráficos que explicitam tal relação.

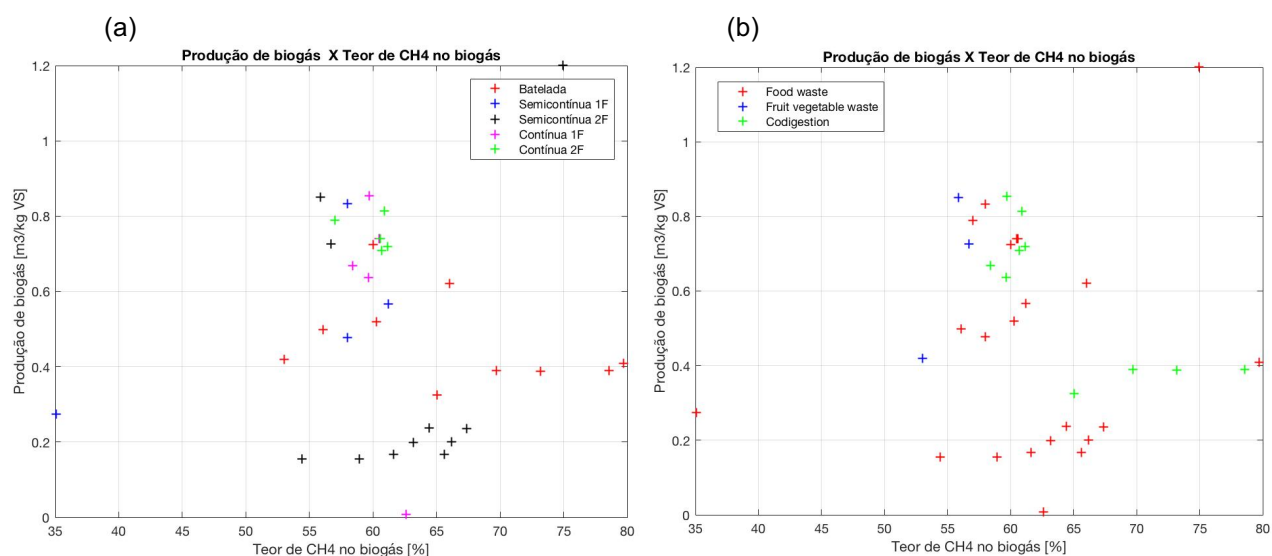


Figura 26 – Relação entre a produção de biogás e o teor de CH<sub>4</sub> presente no mesmo, visualizada através da (a) categorização I e (b) categorização II.

É possível perceber que o gráfico conta com a ausência de alguns pontos dos 59 casos analisados neste estudo, devido à falta de informação de dados de produção de biogás nos mesmos – muitos indicavam somente a quantidade de metano adquirida no processo. Contudo, a Figura 26.a indica que, salvo alguns pontos aleatórios, a maioria da produção de biogás para o processo semicontínuo com duas fases situa-se numa faixa de 0,167 – 0,238 m<sup>3</sup>/kg VS, com uma variação considerável de teor de CH<sub>4</sub>, entre 54,4 – 67,4%. Já os processos contínuos de duas fases, representados por poucos pontos, apontam uma produção de biogás média de 0,754 m<sup>3</sup>/kg VS e um teor médio de CH<sub>4</sub> de 60,05%. A Figura 25.b, por sua vez, não indica nenhuma relação direta ou tendência entre produção de biogás e quantidade de metano presente no mesmo. Porém, é possível concluir que a média para a produção de biogás geral é de 0,509 m<sup>3</sup>/kg VS com um desvio padrão de 0,274 e um teor médio de CH<sub>4</sub> de 62,17%.

## 4.6 Estudo de caso

Tendo em vista a considerável fração de resíduos orgânicos (aproximadamente 60%) presente nos resíduos gerados pela PUC-Rio, e da expressiva contribuição do Bandeirão para este cenário (Soto, 2016), surge a proposta, através do Núcleo Interdisciplinar de Meio Ambiente da PUC-RIO, de desenvolver uma planta de metanização com o objetivo de suprir a demanda energética da Estação de Educação Ambiental da universidade. Como primeiro passo da simulação da implantação de tal biodigestor, foi feito um levantamento da demanda total de energia e potência elétrica do estabelecimento. Os dados referentes aos equipamentos e seus respectivos consumos energéticos encontram-se detalhados na Tabela 10.

Tabela 10 – Dados de consumo de potência e energia elétrica referentes à Estação de Educação Ambiental da PUC-Rio.

Equipamento	Modelo	Potência elétrica do equipamento (W)	nº de horas de uso	nº de dias no mês	Quantidade de aparelhos	Potência elétrica consumida (kW)	Estimativa total do consumo do aparelho por mês (Wh/mês)	Total (kWh/mês)
Ar condicionado	Springer Carrier 36.000 Btu/h	3720	8	22	1	3.72	654720	654.72
	Portátil Pinguino 10.500 Btu/h	1200	8	22	1	1.2	211200	211.2
Bebedouro	Masterfrio	110	24	30	1	0.11	79200	79.2
Projektor	-	250	4	22	1	0.25	22000	22
Computador	-	250	8	22	6	1.5	264000	264
Lâmpadas	Fluorescente	15	4	22	15	0.225	19800	19.8
Refletor	Phillips	400	12	30	2	0.8	288000	288
Impressora	-	45	8	22	2	0.09	15840	15.84

Os valores descritos na tabela acima resultam em uma potência total consumida de 7,9 kW, o que é um valor relativamente baixo para os padrões de geradores elétricos (que atuam na faixa de 100 – 200 kW), e um consumo total de energia de 1554,7 kWh/mês. Considerando este último valor como a quantidade de energia elétrica ( $\dot{E}_{elec}$ ) que um alternador elétrico deveria suprir, e considerando a eficiência ( $\eta$ ) do mesmo como 70% (Örn, 2014), foi possível,



através das equações 2 e 3, obter a potência ( $\dot{W}_{mec}$ ) e energia mecânica ( $\dot{E}_{mec}$ ) a serem geradas pelo mecanismo motor-gerador.

$$\dot{W}_{mec} = \frac{\dot{W}_{elec}}{\eta} \quad (2)$$

$$\dot{E}_{mec} = \frac{\dot{E}_{elec}}{\eta} \quad (3)$$

Como ponto de partida para a solução do suprimento da demanda de energia elétrica total indicada na tabela acima, três bibliografias que discutiam a aplicação de biogás em motores a Diesel de potência coerente à potência total consumida na Estação, foram consultadas. As características mais relevantes acerca do processo de aplicação do combustível no motor-gerador estão explicitas nos seguintes tópicos:

- **Chandra (2011)** – estuda um motor Diesel estacionário de 5.9 kW, convertido em motor de ignição a centelha (“ottolização”) e funciona com gás natural e biogás.
- **Yusaf (2010)** – usou um motor Diesel operante em modo *dual fuel* com a combinação de gás natural e diesel. A taxa de substituição ( $\% \dot{V}_v$ ) referente a cada combustível foi de 75% e 25%, respectivamente.
- **Makareviciene (2013)** – também aborda um motor Diesel que opera com a alimentação de dois combustíveis, o diesel e o biogás. O biogás é admitido junto com o ar (fumigação), enquanto o diesel é injetado diretamente na câmara de combustão. Os combustíveis possuem taxa de substituição de 55% e 45%, respectivamente.

Para cada caso indicado acima, foram coletadas as respectivas eficiências máximas de cada motor, e foram considerados os diferentes teores de metano contidos em cada combustível gasoso utilizado, que foram de 65%, 85% e 95%, respectivamente. A partir de tais parâmetros, foi traçado um caminho inverso do ciclo de energia envolvido no processo da digestão anaeróbia. Vale ressaltar que para os casos em que se utiliza dois combustíveis, a parcela de energia química oriunda do biogás, expressa pela Equação 4, foi obtida através de frações parciais associadas aos poderes caloríficos ( $PCI^i$ ) tanto do diesel quanto do metano. A Figura 27 ilustra este ciclo energético.

$$\text{Energia química} = \sum \%_v^i * PCI^i \quad (4)$$

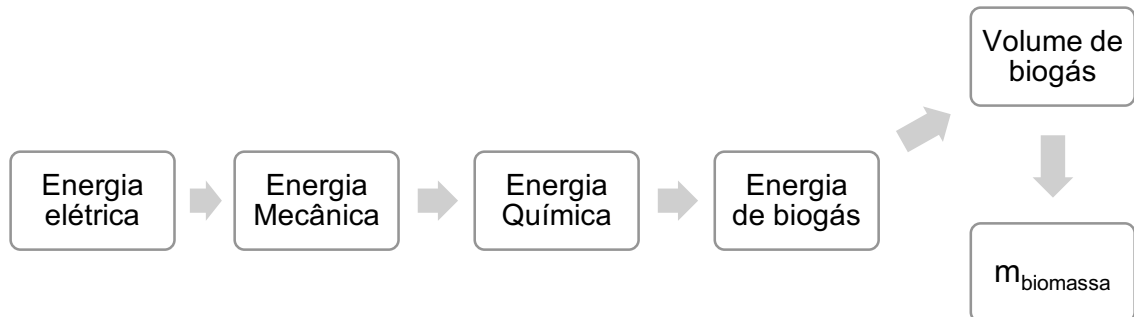


Figura 27 – Fluxo energético inverso do processo de digestão anaeróbia para o fornecimento de energia elétrica a partir do biogás

A partir das eficiências envolvidas nas conversões de energia elétrica, mecânica e química, e dos respectivos valores de PCI para o biogás e diesel, foi possível estimar o valor desejado para a produção de CH<sub>4</sub> no mês. Logo, com o valor médio e máximo de produção de CH<sub>4</sub> levantado nos 19 artigos iniciais, se obteve a quantidade de VS por mês para cada cenário, e através da relação linear entre VS e TS, também obtida no presente trabalho e explícita na Tabela 9, concluiu-se a quantidade de matéria seca necessária para cada caso. Todos os parâmetros comentados acima estão indicados nas tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Valores de energia, massa e volume envolvidos no processo para três bibliografias consultadas como referência para uma suposta aplicação experimental

	unidade	Chandra, 2011	Yusaf, 2010	Makareviciene, 2013
Eficiência Motor Diesel		0.233	0.37	0.33
Energia química total no mês	kWh/mês	9532,56	6002,93	6730,56
Energia de biogás total no mês	kWh/mês	9532,56	3561,83	3798,18
<b>Energia de biogás</b> total no mês	MJ/mês	34317,20	12822,59	13673,44
<b>Volume de biogás</b> total no mês	m <sup>3</sup> /mês	1475,63	413,97	402,71
<b>Volume de CH<sub>4</sub></b> total no mês	m <sup>3</sup> /mês	959,16	351,87	382,58

É possível relacionar as três bibliografias indicadas acima, aonde o motor modificado para ignição a centelha exige uma quantidade maior em massa de matéria orgânica do que nos casos em que o motor opera no modo *dual fuel*, com a associação de biogás com Diesel. É importante notar que mesmo atuando com substituições parciais de combustível, o modo dual fuel, por sua vez, opera com eficiências maiores, assim como níveis mais elevados de metano no biogás.

Tabela 12 – Carga orgânica em termos de VS necessária para suprir a demanda de energia elétrica na Estação de Educação Ambiental da PUC-Rio

	unidade	Chandra, 2011	Yusaf, 2010	Makareviciene, 2013
<b>[1] Cenário com produção média de 0,343 m<sup>3</sup>/ kg VS</b>				
Quantidade de VS por mês	kg VS / mês	2794,73	1025,26	1114,73
Quantidade de VS por dia	kg VS / dia	<b>93,16</b>	<b>34,18</b>	<b>37,16</b>
Quantidade de TS por mês	kg TS / mês	3222,09	1181,88	1285,05
Quantidade TS por dia	kg TS / dia	107,40	39,40	42,83
<b>[2] Cenário com produção máxima de 14,34 m<sup>3</sup>/ kg VS – utilizando um reator de 8 L</b>				
Quantidade de VS por mês	kg VS / mês	66,89	24,54	26,68
Quantidade de VS por dia	kg VS / dia	<b>2,23</b>	<b>0,82</b>	<b>0,89</b>
Quantidade de TS por mês	kg TS / mês	76,88	28,05	30,52
Quantidade TS por dia	kg TS / dia	2,56	0,93	1,02

De acordo com Meirelles (2018), a média de resíduos orgânicos gerados diariamente no Bandeirão da PUC-Rio é de 97,3 kg/dia, com teor de TS estimado em 15,67%, o que indicaria uma massa de 15,2 kg TS /dia no substrato inicial. Logo, conclui-se que para atender a produção média de biogás, os três casos exigiriam estimativas de substratos mais elevados em termos de sólidos totais, enquanto para a produção máxima, exigiriam quantidades menores.

Diante desta questão, a Tabela 13 indica a contribuição da quantidade de matéria orgânica em TS geradas diariamente na PUC-Rio no suprimento da demanda de energia elétrica do estudo de caso.

Tabela 13 – Parcela de contribuição dos resíduos orgânicos (em termos de sólidos totais) gerados diariamente na PUC-Rio para suprir a demanda de energia elétrica da Estação de Educação Ambiental

Parcela de contribuição na demanda (%)	Chandra, 2011	Yusaf, 2010	Makareviciene, 2013
Cenário [1]	14.152	38.583	35.485
Cenário [2]	100	100	100

Tendo em vista que a produção de biogás não depende só da quantidade de sólidos totais e voláteis adicionados ao reator anaeróbio, e que outros parâmetros como por exemplo HRT, temperatura, volume do reator, pH, modo de alimentação, entre outros, seria possível viabilizar a implantação do sistema para as demandas da PUC-Rio. Contudo, seria necessário controlar o processo através de um estudo mais detalhado acerca de tais condições e parâmetros.

## 5. Conclusão

A obtenção do biogás através de processos de digestão anaeróbia que utilizam resíduos alimentares como substrato, e sua aplicação em geradores, se mostram como uma alternativa relevante, tanto para a questão do tratamento de resíduos sólidos orgânicos e os impactos de sua incorreta disposição, quanto para a substituição de combustíveis fósseis por renováveis. Contudo, tal processo conta com um grande número de variáveis, que devem ser escolhidas atentamente, para otimizar o processo de digestão anaeróbia.

A partir do levantamento de dados das 19 referências, e dos 59 casos analisados, parâmetros como TS, VS, pH, OLR, HRT, temperatura, volume do reator, volume de biogás e CH<sub>4</sub> produzidos e teor de CH<sub>4</sub> no biogás, foram selecionados e relacionados através de um programa no Matlab. Apenas uma correlação entre 2 dos 10 parâmetros considerados pode ser destacada. Tal relação se mostra entre o teor de sólidos voláteis (VS) e o teor de sólidos totais (TS). Contudo, houve coerência em certos comportamentos e valores médios puderam ser obtidos para parâmetros importantes.

Os casos analisados indicaram uma temperatura média de 37°C, o que indica um processo mesofílico, com um valor médio para o pH de 6,9. A média do volume dos reatores indicados nos artigos foi de 0,0095 m<sup>3</sup>, ou então 9,5 L – característica de um reator em escala laboratorial – e não houve um valor específico para a carga orgânica introduzida ao sistema, visto que a dispersão dos mesmos foi grande e aleatória. A análise destes casos indicou que a maior produção de metano foi de 14 m<sup>3</sup>/kg VS e se deu em processos contínuos de 1 fase, e com substratos oriundos da codigestão, e que o valor médio para o teor de CH<sub>4</sub> obtido nos processos foi de 62,17%. Além disso, foi possível estabelecer uma média para as produções de biogás e de metano, salvo os maiores valores que ocorreram em processos contínuos e que destoaram da grande maioria dos pontos que flutuavam. Tais médias foram de 0,509 e 0,343 m<sup>3</sup>/ kg.VS respectivamente. Além disso, foi constatado que os processos que utilizavam substratos oriundos da codigestão indicaram os maiores valores para a produção de CH<sub>4</sub> no geral.

A partir do estudo de caso para o suprimento da demanda de energia elétrica mensal da Estação de Educação Ambiental da PUC-Rio, três cenários foram

construídos para determinar os volumes de biogás e de CH<sub>4</sub> necessários cada mês. Para o caso da aplicação de um motor Diesel modificado para o modo de ignição por centelha, a estimativa foi de que seria necessário gerar um volume mensal de biogás e de CH<sub>4</sub> de 1475 e 959 m<sup>3</sup>/mês respectivamente. Para o motor operando em modo *dual fuel* com gás natural (teor de CH<sub>4</sub> ~ 85%) e diesel, estimou-se a produção de biogás e CH<sub>4</sub> em 414 e 352 m<sup>3</sup>/mês, respectivamente. No último caso, no qual o motor opera com fumigação de biogás (teor de CH<sub>4</sub> ~ 95%) e injeção de diesel, seria necessária uma produção de biogás de 403 m<sup>3</sup>/mês, o que implica em 383 m<sup>3</sup>/mês de CH<sub>4</sub>. Dentre os três cenários descritos acima, o segundo se mostra o mais indicado, pois além de trabalhar com um motor de eficiência mais elevada, o modo *dual fuel* não torna o processo dependente de um único combustível, como no primeiro, e em comparação ao terceiro, pelo teor de CH<sub>4</sub> no biogás ser menor, ele exigiria uma purificação e enriquecimento menos severa, por mais que ainda precise de uma.

As conclusões tiradas dos 59 casos foram parâmetros cruciais no estudo de caso realizado dentro do presente trabalho. A partir de seus valores médio e máximo para a produção de metano, foi possível estimar a quantidade mensal e diária de matéria orgânica em termos de sólidos voláteis e sólidos totais necessária para suprir a demanda de produção de biogás do sistema que abasteceria a energia elétrica da Estação de Educação Ambiental da PUC-Rio. Para o caso de produção média de CH<sub>4</sub> e utilização de um motor a Diesel “ottolizado” (Chandra, 2011) para o processo, foi estimada uma alimentação diária de 93 kg de VS e 107 kg de TS para o biodigestor. No caso de um motor a diesel operando em modo *dual fuel*, tal alimentação diária de matéria orgânica em massa de VS e TS foi estimada em 34 e 39 kg para um biogás com 85% de CH<sub>4</sub> (Yusaf, 2010) e de 37 e 42 kg para que se produzisse biogás com um teor de 95% de CH<sub>4</sub> (Makareviciene, 2013). Já para a condição de produção máxima de CH<sub>4</sub>, estimou-se uma alimentação diária de 2,2 kg VS e 2,5 TS para o biodigestor em um processo que posteriormente usaria um motor a Diesel “ottolizado”. Já para os processos que incluíam motores a diesel alimentados por dois tipos de combustível, foi estimada a alimentação diária de 0,8 kg VS e 0,93 kg TS para se produzir um biogás com 85% de CH<sub>4</sub> e 0,9 e 1,01 kg de VS e TS respectivamente para a produção de biogás com 95% de CH<sub>4</sub>. É importante ressaltar que o biogás

deve ser submetido a processos de purificação e enriquecimento para alcançar teores tão elevados de  $\text{CH}_4$  e poder operar nos motores sem danificá-los.

Uma vez que a demanda diária de matéria orgânica necessária ao biodigestor fora estimada, a perspectiva de uma possível implementação do processo de biodigestão anaeróbia atrelada a um conjunto motor-gerador com vistas a geração de energia elétrica, se torna mais clara. Tomando o caso baseado no estudo de Yusaf (2010) como base para o projeto experimental, visto que ele utiliza um motor de maior eficiência, concluiu-se que a quantidade de matéria orgânica gerada diariamente na PUC-Rio poderia suprir em 38,5% da energia demandada na Estação de Educação Ambiental.

Contudo, como dito anteriormente, há outros parâmetros muito importantes para o processo que devem ser considerados em relação à quantidade de matéria orgânica, como o volume do reator e o tempo de retenção do processo, por exemplo. Com o objetivo de avançar na definição de outras características do processo, sugere-se um estudo acerca do espaço físico disponível para a implementação de um reator de digestão anaeróbia vinculado a um grupo motor gerador. A partir de tal informação, seria definido um volume viável de reator e, portanto, com tal informação e a quantidade de matéria orgânica já estabelecida, seria possível estimar a carga orgânica e o tempo de retenção hidráulica vinculados a tal condição.

## Referências Bibliográficas

- ABATZOGLOU N., BOIVIN S. **A review of biogas purification processes**. Biofuels, Bioproducts, Biorefinery. 3:42-71, 2009.
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. Brasil. 2016.
- ALVES, H.J., JUNIOR, C.B., NIKLEVICZ, R.R., FRIGO, E.P., FRIGO, M.S., COIMBRA-ARAÚJO, C.H. **Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells**. International journal of hydrogen energy 38, p. 5215-5225, 2013.
- ANDREOLI, C.V.; FERREIRA, A.C.; CHERNICHARO, C. A. L. **Secagem e higienização de lodos com aproveitamento de biogás**. In CASSINI, S. T. (coordenador) Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento de biogás. Rio de Janeiro: PROSAB, 2003. 196p.
- BABAEI, A., SHAYEGAN, J. **Anaerobic digestion of vegetal waste**. In: 10th International Conference on Chemical and Process Engineering, Tehran, Iran, 2011.
- BAJPAI, P. **Basics of Anaerobic Digestion Process**. In: Anaerobic Technology in Pulp and Paper Industry, SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, 2017. p. 7-12.
- BANKS C.J., CHESSHIRE, M., HEAVEN, S., ARNOLD, R. **Anaerobic digestion of source- segregated domestic food waste: performance assessment by mass and energy balance**. Bioresource Technology 102, p. 612-620, 2010.
- BOND, T.; TEMPLETON, M.R. **History and future of domestic biogas plants in the developing world**. Energy for Sustainable Development 15, p. 347-354, 2011.
- BONG, C.P.C., LIM, L.Y., LEE, C.T., KLEMES, J.J., HO, C.S., HO, W.S. **The characterisation and treatment of food waste for improvement of biogas production during anaerobic digestion – A review**. Journal of Cleaner Production 172, p.1545-1558, 2018.



BRASIL. Agenda 21 global. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/responsabilidade-socioambiental/agenda-21/agenda-21-global>> Acessado em março de 2018.

BROWNE, J.D.; MURPHY, J.D. **Assessment of the resource associated with biomethane from food waste**. Applied Energy 103, p. 170-177, 2013.

CHANDRA, R., VIJAY, V.K., SUBBARAO, P.M.V., KHURA, T.K. **Performance evaluation of a constant speed IC engine on CNG, methane enriched biogas and biogas**. Applied Energy 88, p. 3969-3977, 2011.

CHEN, X., YAN, W., SHENG, K., SANATI, M. **Comparison of high-solids to liquid anaerobic co-digestion of food waste and green waste**. Bioresource Technology 154, p. 215-221, 2014.

COSTA, D.F. Geração de energia elétrica a partir do biogas de tratamento do esgoto. 2006. 176p. Dissertação de mestrado – Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia (PIPGE). Universidade de São Paulo. São Paulo – SP.

DEEPANRAJ, B.; SIVASUBRAMANIAN, V.; JAYARAJ, S. **Solid concentrations influence on biogas from food waste in anaerobic batch digester**. In: International Conference and Utility Exhibition 2014 on Green Energy for Sustainable Development, Pattaya, Thailand, 2014.

DEGANUTTI, R., PALHACI, M. J. P., ROSSI, M., TAVARES, R., DOS SANTOS, C. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas.

DHAR, B. R., ELBESHBISHY, E., NAKHLA, G., RAY, M.B. **State of the art of biogas production from solid waste and waste water**. In: Biogas. Nova Science Publishers, 2011, Hauppauge, N.Y. p.49-90.

FERREIRA, B. O., COLTURATO, L.F.D.B, PUJATTI, F.J.P.P., MARTINS, J.B., CHERNICHARO, C.A.L. **Estimativa de aproveitamento energético do biogás gerado em um reator de metanização aplicado ao tratamento de resíduos**

**alimentares de um campus universitário.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 28, 2015. Rio de Janeiro, p. 1-12.

FNR - Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização.** Ministério da Nutrição Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha. Gülzow, Alemanha. 2010.

GANESH, R., TORRIJOS, M., SOUSBIE, P., LUGARDON, A., STEYER, J.P., DELGENES, J.P. **Single-phase and two-phase anaerobic digestion of fruit and vegetable waste: Comparison of start-up, reactor stability and process performance.** Waste Management 34, p. 875-885, 2014.

GARCIA-PEÑA, E.I., PARAMESWARAN, P., KANG, D.W., CANUL-CHAN, M., KRAJMALNIK-BROWN, R. **Anaerobic digestion and co-digestion processes of vegetable and fruit residues: process and microbial ecology.** Bioresource Technology 102, p. 9447-9455, 2011.

GEHRING, C. G. **Análise da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na fermentação anaeróbica de vinhaça.** 2014. 124 p. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia Elétrica de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos – SP.

IANNICELLI, L. A. **Reaproveitamento energético do biogas de uma indústria cervejeira.** 84p. 2008. Dissertação de Mestrado. DEM/UNITAU, Taubaté – SP.

KARLSSON, T. **Manual básico de biogas.** 1 ed. Lajeado: Editora Univates, 2014. 69 p.

KAWAI, M., Nagao, N., TAJIMA, N., NIWA, C., MATSUYAMA, T., TODA, T. **The effect of the labile organic fraction in food waste and the substrate/inoculum ratio on anaerobic digestion for a reliable methane yield.** Bioresource Technology 157, p. 174-180, 2014.

KHAN, I.U., OTHMAN, M.H., HASHIM, H., MATSUURA, T., ISMAIL, A.F., RAZEI-DASHTARZHANDI, M., AZELEE, I.W. **Biogas as a renewable energy fuel – a review of biogas upgrading, utilization and storage.** Energy Conversion and Management 150, p. 277-294, 2017.

KIM, J.K., OH, B.R., CHUN, Y.N., KIM, S.W. **Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste.** Journal of bioscience and bioengineering vol. 102, n 4, p. 328-332, 2006.

LI, Y., JIN, Y. **Effects of thermal pretreatment on acidification phase during two-phase batch anaerobic digestion of kitchen waste.** Renewable Energy 77, p. 550-557, 2015.

MAKAREVICIENE, V., SENDZIKIENE, E., PUKALSKAS, S., RIMKUS, A., VEGNERIS, R. **Performance and emission characteristics of biogas used in engine operation.** Energy Conversion and Management 75, p. 224-233, 2013.

MALONEY, J. O. **Perry's Chemical Engineers' Handbook.** Eighth edition. New York: McGraw-Hill, 2008. 2655p.

MARQUES, C. A. **Microgeração de energia elétrica em uma propriedade rural utilizando biogas como fonte primária de energia elétrica.** 2012. p. 3-10. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR.

MEIRELLES, J.B. **Desenvolvimento do projeto de um biodigestor anaeróbio de resíduos alimentares da PUC-Rio.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. 2018.

MEYER, A.K.P.; EHIMEN, E.A.; HOLM-NIELSEN, J.B. **Future European biogas: Animal manure, straw and grass potentials for a sustainable European biogas production.** Biomass and Bioenergy 111, p. 155-164, 2018.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA – MME, **Resenha Energética Brasileira – Exercício de 2016.** Junho de 2017.

NAGAO, N., TAJIMA, N., KAWAI, M., NIWA, C., KUROSAWA, N., MATSUYAMA, T., YUSOFF, F.M., TODA, T. **Maximum organic loading rate for the single-stage wet anaerobic digestion of food waste.** Bioresource Technology 118, p. 210-218, 2012.

ÖRN, M. **Towards better alternator efficiency.** 2014. 87p. Dissertação de mestrado

– Departamento de Física, Química e Biologia. Linköping University, Linköping, Suécia.

PECORA, V. **Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP – Estudo de Caso.** 2006. 152p. Dissertação de Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.

RAY, N.H.S., MOHANTY, M.K., MOHANTY, R.C. **Biogas as alternate fuel in diesel engines: A literature review.** Journal of Mechanical and Civil Engineering vol.9, 23-28p, 2013.

REIS, A. S. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio.** 2012. 79 p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru – PE, 2012.

ROCHA, C. M. **Proposta de implantação de um biodigestor anaeróbio de resíduos alimentares.** 2016. 62p. Trabalho Final de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora – RJ.

SCANO, E.A., ASQUER, C., PISTIS, A., ORTU, L., DEMONTIS, V., COCCO, D. **Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: Experimental results on pilot-scale and preliminar performance evaluation of a full-scale power plant.** Energy Conversion and Management 77, p. 22-30, 2014.

SHEN, F., YUAN, H., PANG, Y., CHEN, S., ZHU, B., ZOU, D., LIU, Y., MA, J., YU, L., LI, X. **Performances of anerobic co-digestion of fruit & vegetable waste (FVW) and food waste (FW): Single-phase vs. two-phase.** Bioresource Technology 144, p. 80-85, 2013.

SHENG, K., CHEN, X., PAN, J., KLOSS, R., WEI, Y., YING, Y. **Effect of ammonia and nitrate on biogas production from food waste via anaerobic digestion.** Biosystems Engineering 116, p. 205-212, 2013.

SOTO, A. C. J. **Diagnóstico de geração e gerenciamento de resíduos sólidos na PUC-Rio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2016.

SOUZA, S. N. M.; PEREIRA, W. C.; PAVAN, A. A. **Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador usando biogás da suinocultura**. Faculdade AssizGurgacz UNIOESTE-CCET. Cascavel, Paraná. 2004.

SUN, Y., WANG, D., YAN, J., QIAO, W., WANG, W., ZHU, T. **Effects of lipid concentration on anaerobic co-digestion of municipal biomass wastes**. Waste Management 34, p. 1025-1034, 2014.

SUN, Q., LI, H., YAN, J., LIU, L., YU, Z. YU, X. **Selection of appropriate biogas upgrading technology – a review of biogas cleaning, upgrading and utilisation**. Renewable and Sustainable Energy Reviews 51, p. 521-532, 2015.

TAMPIO, E., ERVASTI, S., PAAVOLA, T., HEAVEN, S., BANKS, C., RINTALA, J. **Anaerobic digestion of autoclaved and untreated food waste**. Waste Management 34, p. 370-377, 2014.

VANDEVIVERE P., DE BAERE, L., VERSTRAETE W. **Types of anaerobic digesters for solid wastes in biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes**. V. 4, p. 5-8, London, IWA Publishing. 2002.

VASCO-CORREA, J., KHANAL, S., MANANDHAR, A., SHAH, A. **Anaerobic digestion for bioenergy production: global status, environmental and Techno-economic implications, and government policies**. Bioresource Technology 247, p. 1015-1026, 2018.

VENTURA, J.R.S., LEE, J., JAHNG, D. **A comparative study on the alternating mesophilic and thermophilic two-stage anaerobic digestion of food waste**. Journal of Environmental Sciences 26, p. 1274-1283, 2014.

WANG, L., SHEN, F., YUAN, H., ZOU, D., LIU, Y., ZHU, B., LI, X. **Anaerobic co-digestion of kitchen waste and fruit/vegetable waste: lab-scale and pilot-scale studies**. Waste Management 34, p. 2627-2633, 2014.

WU, L.J., KOBAYASHI, T., KURAMOCHI, H., LI, Y.Y., XU, K.Q. **Improved biogas production from food waste by co-digestion with de-oiled grease trap waste.** Bioresource Technology 201, p. 237-244, 2016

XU, F., LI, Y., GE, X., YANG, L., LI, Y. **Anaerobic digestion of food waste – challenges and opportunities.** Bioresource Technology 247, p. 1047-1058, 2018.

YUSAF, T.F., BUTTSWORTH, D.R., SALEH, K.H., YOUSIF, B.F. **CNG-diesel engine performance and exhaust emission analysis with the aid of artificial neural network.** Applied Energy 87, p. 1661-1699, 2010.

ZHANG, C., XIAO, G., PENG, L., SU, H., TAN, T. **The anaerobic co-digestion of food waste and cattle manure.** Bioresource Technology 129, p. 170-176, 2013.

## **Apêndice**

### **Código implementado no programa Matlab<sup>®</sup>**

Este apêndice contém os dois códigos implementados ao Matlab<sup>®</sup> para a correlacao e análise dos dados levantados da literatura.

```

clear all
close all
clc

% OBTENÇÃO DE DADOS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA - classificação: modo de digestão e
número de fases %

filename = 'dados_matlab_final.xlsx';

[num,txt,row] = xlsread ('dados_matlab_final.xlsx');

% organização dos dados em gráficos %

k=1;
j=1;
a=1;
b=1;
r=1;
s=1;

for i=4:1:62
    n=i-3;
    if(strcmp(raw(i,4), 'B')==1)
        ch4_B1(k)=num(n,13);
        VS_B1(k)=num(n,3);
        TS_B1(k)=num(n,2);
        vol_B1(k)=num(n,10);
        pH_B1(k)=num(n,5);
        olr_B1(k)=num(n,6);
        hrt_B1(k)=num(n,8);
        temp_B1(k)=num(n,9);
        metcont_B1(k)=num(n,15);
        bgas_B1(k)=num(n,11);

        k=k+1;

    elseif (strcmp(raw(i,4), 'SC')==1)
        if(num(n,1)==1)
            ch4_SC1(a)=num(n,13);
            VS_SC1(a)= num(n,3);
            TS_SC1(a)=num(n,2);
            vol_SC1(a)=num(n,10);
            pH_SC1(a)=num(n,5);
            olr_SC1(a)=num(n,6);
            hrt_SC1(a)=num(n,8);
            temp_SC1(a)=num(n,9);
            metcont_SC1(a)=num(n,15);
            bgas_SC1(a)=num(n,11);

            a=a+1;
        else
            ch4_SC2(b)=num(n,13);
            VS_SC2(b)=num(n,3);
            TS_SC2(b)=num(n,2);
            vol_SC2(b)=num(n,10);
            pH_SC2(b)=num(n,5);
            olr_SC2(b)=num(n,6);
            hrt_SC2(b)=num(n,8);
            temp_SC2(b)=num(n,9);
            metcont_SC2(b)=num(n,15);
            bgas_SC2(b)=num(n,11);

            b=b+1;
        end
    else
        if(num(n,1)==1)
            ch4_C1(r)=num(n,13);
            VS_C1(r)= num(n,3);

```



```

        TS_C1(r)=num(n,2);
        vol_C1(r)=num(n,10);
        pH_C1(r)=num(n,5);
        olr_C1(r)=num(n,6);
        hrt_C1(r)=num(n,8);
        temp_C1(r)=num(n,9);
        metcont_C1(r)=num(n,15);
        bgas_C1(r)=num(n,11);

        r=r+1;
    else
        ch4_C2(s)=num(n,13);
        VS_C2(s)=num(n,3);
        TS_C2(s)=num(n,2);
        vol_C2(s)=num(n,10);
        pH_C2(s)=num(n,5);
        olr_C2(s)=num(n,6);
        hrt_C2(s)=num(n,8);
        temp_C2(s)=num(n,9);
        metcont_C2(s)=num(n,15);
        bgas_C2(s)=num(n,11);

        s=s+1;
    end
end
end

% Graficos separados por modo de alimentacao e numero de fases %

figure(1)
plot(VS_B1,ch4_B1,'r+',VS_SC1,ch4_SC1,'b+',VS_SC2,ch4_SC2,'k+',VS_C1,ch4_C1,'m+',VS_C2,ch4_C2,'g+');
xlabel('VS[%]')
ylabel('Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title('Produção de CH4 X VS')
legend('Batelada','Semicontinua 1F','Semicontinua 2F','Continua 1F','Continua 2F')
grid on

figure(2)
plot(vol_B1,ch4_B1,'r+',vol_SC1,ch4_SC1,'b+',vol_SC2,ch4_SC2,'k+',vol_C1,ch4_C1,'m+',vol_C2,ch4_C2,'g+');
xlim([0 0.07])
xlabel('Volume do biodigestor [m3]')
ylabel('Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title('Produção de CH4 X Volume do biodigestor')
legend('Batelada','Semicontinua 1F','Semicontinua 2F','Continua 1F','Continua 2F')
grid on

figure(3)
plot(TS_B1,ch4_B1,'r+',TS_SC1,ch4_SC1,'b+',TS_SC2,ch4_SC2,'k+',TS_C1,ch4_C1,'m+',TS_C2,ch4_C2,'g+');
xlabel('TS[%]')
ylabel('Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title('Produção de CH4 X TS')
legend('Batelada','Semicontinua 1F','Semicontinua 2F','Continua 1F','Continua 2F')
grid on

figure(4)
plot(olr_B1,ch4_B1,'r+',olr_SC1,ch4_SC1,'b+',olr_SC2,ch4_SC2,'k+',olr_C1,ch4_C1,'m+',olr_C2,ch4_C2,'g+');
xlabel('OLR[kg VS/m3.d]')
ylabel('Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title('Produção de CH4 X OLR')
legend('Batelada','Semicontinua 1F','Semicontinua 2F','Continua 1F','Continua 2F')
grid on

figure(5)
plot(pH_B1,ch4_B1,'r+',pH_SC1,ch4_SC1,'b+',pH_SC2,ch4_SC2,'k+',pH_C1,ch4_C1,'m+',pH_C2,ch4_C2,'g+');
xlabel('pH')
ylabel('Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title('Produção de CH4 X pH')

```

```

legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontiua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(6)
plot(TS_B1, VS_B1, 'r+', TS_SC1, VS_SC1, 'b+', TS_SC2, VS_SC2, 'k+', TS_C1, VS_C1, 'm+', TS_C2, VS_C2, 'g+')
;
xlabel ('TS[%]')
ylabel ('VS[%]')
title('VS X TS')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontiua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(7)
plot(hrt_B1, ch4_B1, 'r+', hrt_SC1, ch4_SC1, 'b+', hrt_SC2, ch4_SC2, 'k+', hrt_C1, ch4_C1, 'm+', hrt_C2, ch4_C2, 'g+')
;
xlabel ('HRT(dias)')
ylabel ('Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title('Produção de CH4 X HRT')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontiua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(8)
plot(temp_B1, ch4_B1, 'r+', temp_SC1, ch4_SC1, 'b+', temp_SC2, ch4_SC2, 'k+', temp_C1, ch4_C1, 'm+', temp_C2, ch4_C2, 'g+')
;
xlabel ('Temperatura (°C)')
ylabel ('Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title('Produção de CH4 X Temperatura')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontiua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(9)
plot(temp_B1, hrt_B1, 'r+', temp_SC1, hrt_SC1, 'b+', temp_SC2, hrt_SC2, 'k+', temp_C1, hrt_C1, 'm+', temp_C2, hrt_C2, 'g+')
;
xlabel ('Temperatura [°C]')
ylabel ('HRT[dias]')
title('HRT X Temperatura')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontiua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(10)
plot(vol_B1, hrt_B1, 'r+', vol_SC1, hrt_SC1, 'b+', vol_SC2, hrt_SC2, 'k+', vol_C1, hrt_C1, 'm+', vol_C2, hrt_C2, 'g+')
;
xlim([0 0.07])
xlabel ('Volume do biodigestor [m3]')
ylabel ('HRT [dias]')
title('HRT X Volume do biodigestor')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontiua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')

figure(11)
plot(vol_B1, olr_B1, 'r+', vol_SC1, olr_SC1, 'b+', vol_SC2, olr_SC2, 'k+', vol_C1, olr_C1, 'm+', vol_C2, olr_C2, 'g+')
;
xlim([0 0.07])
xlabel ('Volume do biodigestor [m3]')
ylabel ('OLR[kg VS/m3.d]')
title('OLR X Volume do biodigestor')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontiua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(12)
plot(VS_B1, hrt_B1, 'r+', VS_SC1, hrt_SC1, 'b+', VS_SC2, hrt_SC2, 'k+', VS_C1, hrt_C1, 'm+', VS_C2, hrt_C2, 'g+')
;
xlabel ('VS[%]')
ylabel ('HRT [dias]')
title('HRT X VS')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontiua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(13)
plot(olr_B1, hrt_B1, 'r+', olr_SC1, hrt_SC1, 'b+', olr_SC2, hrt_SC2, 'k+', olr_C1, hrt_C1, 'm+', olr_C2, hrt_C2, 'g+')
;
xlabel ('OLR[kg VS/m3.d]')
ylabel ('HRT [dias]')

```

```

title('HRT X OLR')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontinua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')

% porcentagem de metano versus todos os parâmetros %

figure(14)
plot(VS_B1,metcont_B1,'r+',VS_SC1,metcont_SC1,'b+',VS_SC2,metcont_SC2,'k+',VS_C1,metcont_C1,'m+',VS_C2,metcont_C2,'g+');
xlabel ('VS[%]')
ylabel ('Teor de CH4 no biogv°s [%]')
title('Teor de CH4 no biogv°s X VS')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontinua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(15)
plot(vol_B1,metcont_B1,'r+',vol_SC1,metcont_SC1,'b+',vol_SC2,metcont_SC2,'k+',vol_C1,metcont_C1,'m+',vol_C2,metcont_C2,'g+');
xlim([0 0.07])
xlabel ('Volume do biodigestor [m3]')
ylabel ('Teor de CH4 no biogv°s [%]')
title('Teor de CH4 no biogv°s X Volume do biodigestor')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontinua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(16)
plot(TS_B1,metcont_B1,'r+',TS_SC1,metcont_SC1,'b+',TS_SC2,metcont_SC2,'k+',TS_C1,metcont_C1,'m+',TS_C2,metcont_C2,'g+');
xlabel ('TS[%]')
ylabel ('Teor de CH4 no biogv°s [%]')
title('Teor de CH4 no biogv°s X TS')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontinua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(17)
plot(olr_B1,metcont_B1,'r+',olr_SC1,metcont_SC1,'b+',olr_SC2,metcont_SC2,'k+',olr_C1,metcont_C1,'m+',olr_C2,metcont_C2,'g+');
xlabel ('OLR[kg VS/m3.d]')
ylabel ('Teor de CH4 no biogv°s [%]')
title('Teor de CH4 no biogv°s X OLR')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontinua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(18)
plot(pH_B1,metcont_B1,'r+',pH_SC1,metcont_SC1,'b+',pH_SC2,metcont_SC2,'k+',pH_C1,metcont_C1,'m+',pH_C2,metcont_C2,'g+');
xlabel ('pH')
ylabel ('Teor de CH4 no biogv°s [%]')
title('Teor de CH4 no biogv°s X pH')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontinua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(19)
plot(hrt_B1,metcont_B1,'r+',hrt_SC1,metcont_SC1,'b+',hrt_SC2,metcont_SC2,'k+',hrt_C1,metcont_C1,'m+',hrt_C2,metcont_C2,'g+');
xlabel ('HRT(dias)')
ylabel ('Teor de CH4 no biogv°s [%]')
title('Teor de CH4 no biogv°s X HRT')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontinua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(20)
plot(temp_B1,metcont_B1,'r+',temp_SC1,metcont_SC1,'b+',temp_SC2,metcont_SC2,'k+',temp_C1,metcont_C1,'m+',temp_C2,metcont_C2,'g+');
xlabel ('Temperatura (°C)')
ylabel ('Teor de CH4 no biogv°s [%]')
title('Teor de CH4 no biogv°s X temperatura')
legend('Batelada', 'Semicontinua 1F', 'Semicontinua 2F', 'Continua 1F', 'Continua 2F')
grid on

figure(21)
plot(metcont_B1,bgas_B1,'r+',metcont_SC1,bgas_SC1,'b+',metcont_SC2,bgas_SC2,'k+',metcont_C1,bgas_C1,'m+',metcont_C2,bgas_C2,'g+');

```

```

xlabel ('Teor de CH4 no biogv°s [%]')
ylabel ('Produção de biogv°s [m3/kg VS]')
title('Produção de biogv°s X Teor de CH4 no biogv°s')
legend('Batelada','Semicontinua 1F','Semicontinua 2F','Continua 1F','Continua 2F')
grid on

clear all
close all
clc

% OBTENÇÃO DE DADOS DO PROCESSO DE DIGESTÃO ANAERÓBIA - classificação: tipo de substrato %

[num,txt,row] = xlsread ('dados_matlab_final.xlsx');

% organização dos dados em gráficos %

k=1;
a=1;
r=1;

for i=4:1:62
    n=i-3;
    if(strcmp(raw(i,3),'FVW')==1)
        ch4_FVW(k)=num(n,13);
        VS_FVW(k)=num(n,3);
        TS_FVW(k)=num(n,2);
        vol_FVW(k)=num(n,10);
        pH_FVW(k)=num(n,5);
        olr_FVW(k)=num(n,6);
        hrt_FVW(k)=num(n,8);
        temp_FVW(k)=num(n,9);
        metcont_FVW(k)=num(n,15);
        bgas_FVW(k)=num(n,11);

        k=k+1;

    end

    if(strcmp(raw(i,3),'FW')==1)
        ch4_FW(a)=num(n,13);
        VS_FW(a)= num(n,3);
        TS_FW(a)=num(n,2);
        vol_FW(a)=num(n,10);
        pH_FW(a)=num(n,5);
        olr_FW(a)=num(n,6);
        hrt_FW(a)=num(n,8);
        temp_FW(a)=num(n,9);
        metcont_FW(a)=num(n,15);
        bgas_FW(a)=num(n,11);

        a=a+1;

    end

    if(strcmp(raw(i,3),'CD')==1)

        ch4_CD(r)=num(n,13);
        VS_CD(r)= num(n,3);
        TS_CD(r)=num(n,2);
        vol_CD(r)=num(n,10);
        pH_CD(r)=num(n,5);
        olr_CD(r)=num(n,6);
        hrt_CD(r)=num(n,8);
        temp_CD(r)=num(n,9);
        metcont_CD(r)=num(n,15);

```

```

        bgas_CD(r)=num(n,11);

        r=r+1;
    end

end

% Gráficos por tipo de substrato %

figure(1)
plot(VS_FW,ch4_FW,'r+',VS_FVW,ch4_FVW,'b+',VS_CD,ch4_CD,'g+');
xlabel ('VS[%]')
ylabel ('Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title(' Produção de CH4 X VS')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(2)
plot(vol_FW,ch4_FW,'r+',vol_FVW,ch4_FVW,'b+',vol_CD,ch4_CD,'g+');
xlim([0 0.07])
xlabel ('Volume do biodigestor [m3]')
ylabel ('CH4 yield [m3/kg VS]')
title('Produção de CH4 X Volume do biodigestor')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(3)
plot(TS_FW,ch4_FW,'r+',TS_FVW,ch4_FVW,'b+',TS_CD,ch4_CD,'g+');
xlabel ('TS[%]')
ylabel ('Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title('Produção de CH4 X TS')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(4)
plot(olr_FW,ch4_FW,'r+',olr_FVW,ch4_FVW,'b+',olr_CD,ch4_CD,'g+');
xlabel ('OLR[kg VS/m3.d]')
ylabel (' Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title(' Produção de CH4 X OLR')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(5)
plot(pH_FW,ch4_FW,'r+',pH_FVW,ch4_FVW,'b+',pH_CD,ch4_CD,'g+');
xlabel ('pH')
ylabel ('Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title(' Produção de CH4 X pH')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(6)
plot(TS_FW,VS_FW,'r+',TS_FVW,VS_FVW,'b+',TS_CD,VS_CD,'g+');
xlabel ('TS[%]')
ylabel ('VS[%]')
title('VS X TS')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(7)
plot(hrt_FW,ch4_FW,'r+',hrt_FVW,ch4_FVW,'b+',hrt_CD,ch4_CD,'g+');
xlabel ('HRT(dias)')
ylabel ('Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title(' Produção de CH4 X HRT')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(8)
plot(temp_FW,ch4_FW,'r+',temp_FVW,ch4_FVW,'b+',temp_CD,ch4_CD,'g+');

```

```

xlabel ('Temperatura (°C) ')
ylabel (' Produção de CH4 [m3/kg VS]')
title(' Produção de CH4 X Temperatura')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(9)
plot(temp_FW,hrt_FW,'r+',temp_FVW,hrt_FVW,'b+',temp_CD,hrt_CD,'g+');
xlabel ('Temperatura [°C] ')
ylabel ('HRT[dias]')
title('HRT X Temperatura')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(10)
plot(vol_FW,hrt_FW,'r+',vol_FVW,hrt_FVW,'b+',vol_CD,hrt_CD,'g+');
xlim([0 0.07])
xlabel ('Volume do biodigestor [m3] ')
ylabel ('HRT [dias]')
title('HRT X Volume do biodigestor')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(11)
plot(vol_FW,olr_FW,'r+',vol_FVW,olr_FVW,'b+',vol_CD,olr_CD,'g+');
xlim([0 0.07])
xlabel ('Volume do biodigestor [m3] ')
ylabel ('OLR [kg VS/m3.d]')
title('OLR X Volume do biodigestor')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(12)
plot(VS_FW,hrt_FW,'r+',VS_FVW,hrt_FVW,'b+',VS_CD,hrt_CD,'g+');
xlabel ('VS[%] ')
ylabel ('HRT [dias]')
title('HRT X VS')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(13)
plot(olr_FW,hrt_FW,'r+',olr_FVW,hrt_FVW,'b+',olr_CD,hrt_CD,'g+');
xlabel ('OLR[kg VS/m3.d]')
ylabel ('HRT [dias]')
title('HRT X OLR')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

% porcentagem de metano versus todos os parâmetros %

figure(14)
plot(VS_FW,metcont_FW,'r+',VS_FVW,metcont_FVW,'b+',VS_CD,metcont_CD,'g+');
xlabel ('VS[%]')
ylabel ('Teor de CH4 no biogas [%]')
title('Teor de CH4 no biogas X VS')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(15)
plot(vol_FW,metcont_FW,'r+',vol_FVW,metcont_FVW,'b+',vol_CD,metcont_CD,'g+');
xlim([0 0.07])
xlabel ('Volume do biodigestor [m3]')
ylabel ('Teor de CH4 no biogas [%]')
title('Teor de CH4 no biogas X Volume do biodigestor')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(16)
plot(TS_FW,metcont_FW,'r+',TS_FVW,metcont_FVW,'b+',TS_CD,metcont_CD,'g+');
xlabel ('TS[%]')
ylabel ('Teor de CH4 no biogas [%]')
title('Teor de CH4 no biogas X TS')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')

```

```

grid on

figure(17)
plot(olr_FW,metcont_FW,'r+',olr_FVW,metcont_FVW,'b+',olr_CD,metcont_CD,'g+');
xlabel ('OLR[kg VS/m3.d]')
ylabel ('Teor de CH4 no biogas [%]')
title('Teor de CH4 no biogas X OLR')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(18)
plot(pH_FW,metcont_FW,'r+',pH_FVW,metcont_FVW,'b+',pH_CD,metcont_CD,'g+');
xlabel ('pH')
ylabel ('Teor de CH4 no biogas [%]')
title('Teor de CH4 no biogas X pH')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(19)
plot(hrt_FW,metcont_FW,'r+',hrt_FVW,metcont_FVW,'b+',hrt_CD,metcont_CD,'g+');
xlabel ('HRT(dias)')
ylabel ('Teor de CH4 no biogas [%]')
title('Teor de CH4 no biogas X HRT')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(20)
plot(temp_FW,metcont_FW,'r+',temp_FVW,metcont_FVW,'b+',temp_CD,metcont_CD,'g+');
xlabel ('Temperatura (°C)')
ylabel ('Teor de CH4 no biogas [%]')
title('Teor de CH4 no biogas X Temperatura')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

figure(21)
plot(metcont_FW,bgas_FW,'r+',metcont_FVW,bgas_FVW,'b+',metcont_CD,bgas_CD,'g+');
xlabel ('Teor de CH4 no biogas [%]')
ylabel ('Produção de biogas [m3/kg VS]')
title('Produção de biogas X Teor de CH4 no biogas')
legend('Food waste','Fruit vegetable waste','Codigestion')
grid on

```