

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

AVALIAÇÃO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS
SÓLIDOS ORGÂNICOS PROVENIENTES DO RESTAURANTE
UNIVERSITÁRIO DO CAMPUS DARCY RIBEIRO - UnB

VICTOR HUGO DUTRA DE OLIVEIRA

ORIENTADOR: FRANCISCO JAVIER CONTRERAS PINEDA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA
AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO / 2018

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DA DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS
ORGÂNICOS PROVENIENTES DO RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO
DO CAMPUS DARCY RIBEIRO - UnB**

VICTOR HUGO DUTRA DE OLIVEIRA

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDO AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.**

APROVADA POR:

**Francisco Contreras, Ph. D. (UnB/DF)
(ORIENTADOR)**

**Dra Ariuska Karla Barbosa Amorim (UnB/DF)
(EXAMINADOR INTERNO)**

**Me Gabriel Campos Vieira
(EXAMINADOR EXTERNO)**

DATA: BRASÍLIA/DF, 06 DE DEZEMBRO DE 2018

FICHA CATALOGRÁFICA

VICTOR HUGO DUTRA DE OLIVEIRA

Avaliação da Digestão Anaeróbia dos Resíduos Sólidos Orgânicos provenientes do Restaurante Universitário do *campus* Darcy Ribeiro - UnB.

65 p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2018)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. Biogás

3. RSO

I. ENC/FT/UnB

2. Digestão anaeróbia

4. Restaurante Universitário

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

DUTRA, V. (2018). **Avaliação da Digestão Anaeróbia dos Resíduos Sólidos Orgânicos provenientes do Restaurante Universitário do *campus* Darcy Ribeiro - UnB.** Monografia de Projeto Final, Publicação, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 65 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: VICTOR HUGO DUTRA DE OLIVEIRA

TÍTULO DO TRABALHO DE PROJETO FINAL: **Avaliação da Digestão Anaeróbia dos Resíduos Sólidos Orgânicos provenientes do Restaurante Universitário do *campus* Darcy Ribeiro - UnB.**

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Victor Hugo Dutra de Oliveira

Rua 22 Sul, Lote 12, Águas Claras.

71925-720 – Brasília/DF – Brasil

Dedico esta monografia à minha família.
Em especial aos meus pais, Araken Oliveira e
Eliane Dutra, minha irmã Marina Dutra.

“O mundo que você anseia pode ser conquistado. Existe, é real, é possível, é seu”.

Ayn Rand

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Francisco, pela confiança em aceitar-me como seu primeiro orientando de graduação na UnB, pelos conselhos, ajuda e sobretudo por respeitar minhas escolhas e compreender meus momentos de incertezas.

As professoras Cristina e Ariuska, exemplos de dedicação, respeito, profissionalismo e cuidado com os alunos.

Ao professor Luís Fernando, pela amizade, conversas, prontidão e momentos de descontração.

Aos demais professores, técnicas do Laboratório de Análise de Águas, Gabriel e servidores que contribuíram de inúmeras maneiras para minha formação.

Aos amigos que fiz ao longo da graduação, em especial aos das três primeiras turmas de Engenharia Ambiental da UnB.

À comissão organizadora do ENEEAmb 2016, maior e melhor encontro de estudantes de Engenharia Ambiental realizado até então.

Aos amigos de toda uma vida, pela compreensão e apoio nas horas difíceis. Amo vocês.

A minha família Dutra e Oliveira, com o carinho e torcida de vocês, cheguei até aqui. Estarão sempre em meu coração.

Ao meu grande amigo e sócio Guilherme Silva, por compartilhar do meu sonho empreendedor e por me apoiar de maneira sem igual.

A minha namorada, Juliana Neves, cujo apoio, ajuda, carinho e conforto foram fundamentais para que eu chegasse até aqui. Te amo.

E principalmente agradeço ao guerreiro e sofrido povo brasileiro, que financiou meus estudos compulsoriamente. Trabalharei incansavelmente para que todos possam desfrutar de um país mais livre e justo.

RESUMO

A disposição inadequada dos resíduos sólidos configura-se em um dos piores impactos que podem ser causados ao meio ambiente, cujos efeitos danosos no solo, na água, no ar e conseqüentemente nas pessoas, não são controláveis e que, com o passar dos anos, apresenta custos cada vez mais elevados para adoção de medidas de controle e remediação.

A parcela dos resíduos sólidos orgânicos (RSO) apresenta elevado poder calorífico e, portanto, grande potencial para utilização como fonte de energia e combustível. Uma das formas de aproveitar a energia disponível nos resíduos é através dos digestores anaeróbios, onde o tratamento estabiliza e reduz o volume de resíduos a ser encaminhado para a disposição final e ainda converte a biomassa em energia, resultando em impactos altamente positivos na qualidade dos processos de tratamento e na melhoria do meio ambiente, concebendo renda a partir dos resíduos orgânicos e seus subprodutos – biogás, biossólido e créditos de carbono.

O Restaurante Universitário do *campus* Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília gera em média duas toneladas de resíduo orgânico por dia. As características analisadas indicam que o Resíduo Sólido Orgânico do Restaurante Universitário é um substrato de excelente qualidade, livre de impurezas e com alta concentração de sólidos voláteis, sendo assim, ótimo para Digestão Anaeróbia e produção de biogás. A queima do biogás obtido através da DA dos RSO do RU pode ser utilizada em substituição ou complemento ao óleo diesel, combustível empregado atualmente nas caldeiras de vapor responsáveis pelo cozimento dos alimentos do restaurante.

Palavras-chave: Digestão Anaeróbia, Resíduos Sólidos Orgânicos, Biogás.

ABSTRACT

The inadequate disposition of solid residues represents one of the worst impacts on the environment, causing damages to soil, water, air and, subsequently, to the human being. These damaging effects are hard to control and, with time, they present increasingly elevated costs for the employment of control and remediation measures.

The fraction of solid organic residues presents high calorific power and, therefore, it has great potential as a source of energy and fuel. One of the ways to avail the available energy in residues is through anaerobic digesters, where the treatment stabilizes and reduces the volume of residues to be delivered to final disposition. It also converts biomass into energy, resulting in highly positive impacts on the quality of treatment processes and in the improvement of the quality of the environment. Moreover, it can generate gains through organic residues and its sub-products – biogas, carbon credits and biosolid.

The University's Restaurant of Darcy Ribeiro *campus* (RU) at Brasília University generates about two tons of organic residue per day. The characteristics analysis shows that the organic solid residue (OSR) is a substrate of excellent quality, free of impurities and with a high level of volatile solids. For this reason, it is great for anaerobic digestion and biogas production. The combustion of the biogas produced by the anaerobic digestion from the OSR at the RU can be used such as substitution or compliment to diesel, which is the fuel that is now used at the steam boiler for cooking the meals at the restaurant.

Key words: Anaerobic Digestion, Organic Solid Waste, Biogas.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVO GERAL	3
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Tratamento de Resíduo Sólido Orgânico – RSO	4
3.2	Digestão Anaeróbia.....	5
3.3	Fatores intervenientes da digestão anaeróbia.....	7
3.3.1	pH	7
3.3.2	Umidade	7
3.3.3	Nutrientes	7
3.3.4	Temperatura.....	8
3.3.5	Substâncias Inibidoras	8
3.3.6	Inóculo	8
	Tempo de detenção.....	8
3.4	Biogás	9
3.4.1	Aproveitamento Energético do Biogás.....	10
3.4.2	Biomassa.....	11
3.4.3	Sistemas Anaeróbios	11
3.5	Estudo de Caso.....	15
	Lei do Grandes Geradores de Resíduos Sólidos – Brasília e o <i>campus</i> Darcy Ribeiro (UnB)	15
3.5.1	Potencial de geração de biogás.....	17
4	PROPOSTA METODOLÓGICA.....	21
4.1	Etapa 1	22
4.1.1	Amostragem	22

4.1.2	Método para amostragem de resíduos	23
4.1.3	Caracterização dos resíduos.....	25
4.1.4	Reator em escala de bancada	26
4.2	Etapa 2	28
4.2.1	Análise quantitativa da geração de RSO do RU.....	28
4.2.2	Avaliação Quantitativa – Aferição <i>in locu</i>	29
4.2.3	Avaliação Qualitativa	29
4.2.4	Potencial de produção de Biogás.....	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5.1	Etapa 1	31
5.1.1	Caracterização inicial	31
5.1.2	Ensaio de Degradação Anaeróbia	32
5.2	Etapa 2	35
5.2.1	Diagnóstico da Geração de Resíduos Sólidos Orgânicos no Restaurante Universitário.....	35
5.2.2	Análise quantitativa da geração de RSO do RU.....	39
5.2.3	Análise qualitativa dos RSO do RU	41
5.2.4	Potencial de Produção de Biogás	42
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	44
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

LISTA DE SÍMBOLOS

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS

DQO – DEMANDA QUÍMICA DE OXIGÊNIO

ETE – ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO

GIZ - DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT

UNB – UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PLANSAB – PLANO NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO

PNRS – POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS

RU – RESTAURANTE UNIVERSITÁRIO

RSU – RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

RSO – RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS

SLU – SERVIÇO DE LIMPEZA URBANA

SF – SÓLIDOS FIXOS

SV – SÓLIDOS VOLÁTEIS

STF – SÓLIDOS TOTAIS FIXOS

DA – DIGESTÃO ANAERÓBIA

TDH – TEMPO DE DETENÇÃO HIDRÁULICA

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Etapas da digestão anaeróbia (Adaptado de Chernicharo 1997).....	6
Figura 3.2 - Composição do biogás (Probiogás, 2015.....	9
Figura 3.3 - Aproveitamentos energéticos para biogás e biometano (Coletânea Probiogás,2015 adaptado de FNR, 2010).....	10
Figura 3.4 - Características básicas de processo das diferentes tecnologias de metanização. Adaptada de Fricke & Pereira, 2013	12
Figura 3.6 - Fluxograma do sistema integrado de metanização de resíduos orgânicos implantado no Campus Pampulha da UFMG.....	14
Figura 3.7 - Reator anaeróbio. Fonte: Methanum (2015).....	14
Figura 3.8 – Caldeiras do RU – campus Darcy Ribeiro UnB.....	16
Figura 3.9 Reator anaeróbio de bancada e sistema de medição de biogás	17
Figura 3.10 Reatores de bancada e sistema de medição. (FONTE: Vieira, 2017)	18
Figura 3.11 – Procedimentos de montagem do experimento (Fonte: GOMES, 2014)	19
Figura 3.12 – Monitoramento da produção de biogás.	19
Figura 3.13 - A) Localização das válvulas de alimentação e descarte dos reatores; B).....	20
Figura 4.1 - Etapa Metodológica 1	21
Figura 4.2 - Etapa Metodológica 2	22
Figura 4.3 - Etapas do quarteamento.	24
Figura 4.4 - Fluxograma da metodologia de caracterização dos resíduos.....	25
Figura 4.5 – Reatores de bancada para digestão anaeróbia	26
Figura 4.6 - Esquema do sistema de deslocamento de volume (Vieira, 2017).....	27
Figura 4.7 – Aparelho que indica a temperatura da sala	28
Figura 5.1 - Produção Acumulada de Biogás - Procedimento Experimental 1	32
Figura 5.2 - Produção Acumulada de Biogás - Procedimento Experimental 2.....	33
Figura 5.3 - Produção específica de biogás - Procedimento Experimental 1	33

Figura 5.4 - Produção específica de biogás - Procedimento Experimental 2	34
Figura 5.5. Estrutura básica do processo produtivo de refeições dentro de um restaurante, Fonte: Adaptado de SEBRAE RJ (2010).....	36
Figura 5.6 – Restaurante Universitário da UnB	37
Figura 5.7 – Pesagem de RSO no RU (Fonte: Próprio autor, 2016)	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Potencial de produção de metano com resíduos de alimentos.....	13
Tabela 3.2 – Pesquisas científicas sobre tratamento dos RSO	16
Tabela 3.1 – Número de Amostras coletadas segundo Grupo e Origem.....	23
Tabela 5.1 – Caracterização físico-química inicial do substrato	31
Tabela 5.2 - Histórico do número de refeições servidas no RU	35
Tabela 2.3 – Geração de RSO no RU do campus Darcy Ribeiro	38
Tabela 4.2 - Geração de Resíduos Orgânicos do Restaurante Universitário.....	39
Tabela 4.3 - Levantamentos da geração de RSO no RU do campus Darcy Ribeiro - UnB	41
Tabela 4.4 - Potencial de produção de Biogás.....	42
Tabela 4.5 - Economia mensal gerada pelo uso do biogás	43

1 INTRODUÇÃO

A produção de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) sempre acompanhou o crescimento populacional e o aumento do consumo da sociedade. A crescente prosperidade e urbanização vivenciada na atualidade tende a aumentar a geração de RSU ano após ano, desafiando a gestão da saúde pública e ambiental em cidades do mundo, que já vem enfrentando problemas principalmente por conta da falta de tratamento e disposição inadequada desses resíduos.

No Brasil, a Lei Federal Nº 11.445/2007 que estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico, relata que a prestação dos serviços terá a sustentabilidade econômico-financeira assegurada e, sob os aspectos técnicos, atenderá a requisitos que garantam a qualidade adequada. Por sua vez, a Lei que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305 de 02 de agosto de 2010) estabelece a obrigatoriedade da coleta seletiva e determina que apenas os rejeitos devem ser encaminhados a aterros sanitários. Os elementos citados acima reforçam o grande desafio, enfrentado pelo Brasil, de ampliar e melhorar os serviços de coleta, disposição e tratamento dos resíduos sólidos urbanos. Segundo o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2014) o encaminhamento de resíduos sólidos para locais inadequados configura-se em um dos piores impactos que podem ser causados no meio ambiente, cujos efeitos danosos no solo, na água, no ar e conseqüentemente nas pessoas, não são percebidos e que, com o passar dos anos, apresenta custos cada vez mais elevados para adoção de medidas de controle e remediação.

Em 2016, no âmbito do Distrito Federal, foi regulamentada a Lei dos Grandes Geradores de Resíduos Sólidos (Lei 5.610), determinando que aqueles estabelecimentos de caráter público ou privado que geram em média mais que 120 litros por dia de resíduos indiferenciados, passam a ser integralmente responsáveis pelo correto gerenciamento dos resíduos que produzem, devendo possuir um Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (PGRS) que estabeleça cuidados com os resíduos desde a segregação até o tratamento e destinação final.

Conhecer as características dos resíduos sólidos dispostos por uma comunidade torna-se uma ferramenta imprescindível, auxiliando na tomada de decisão perante a coleta, tratamento e disposição final mais adequada para cada resíduo. Segundo a ABRELPE, a maior parcela dos RSU gerado no Brasil corresponde à fração dos resíduos sólidos orgânicos (RSO), sendo constituindo tipicamente por sobras de comida.

Além dos aspectos legais e ambientais, a sustentabilidade econômica financeira também deve ser levada em consideração, pois a disposição inadequada dos resíduos sólidos, conforme explicitado anteriormente, além de resultar em problemas ambientais sérios, acarreta perdas de matéria-prima e energia. A fração orgânica de resíduos sólidos está suscetível ao reaproveitamento por meio dos processos de compostagem e digestão anaeróbia por exemplo.

A Universidade de Brasília é considerada grande geradora de resíduos, o último estudo de caracterização dos resíduos gerados pela UnB - *campus* Darcy Ribeiro, foi realizado em 1999, em decorrência do Programa ‘Sou UnB, Jogo Limpo’ que fez parte da Agenda 21 da Universidade de Brasília. À época do estudo, a comunidade universitária era composta por cerca de 28.594 pessoas que, em função das atividades acadêmicas, técnicas e/ou administrativas geravam diversos tipos de resíduos. Para o estudo foram analisados os resíduos gerados por 11 unidades acadêmicas e administrativas. Foi estimado que a UnB produzia, à época, cerca 2604 kg de resíduos diariamente, ou seja, aproximadamente 62 toneladas ao mês. Dezesete anos depois, considerando a geração de resíduos proporcional ao crescimento do número de pessoas presentes na rotina do *campus*, pode-se afirmar que a produção de resíduos é maior. Atualmente a comunidade universitária é composta por aproximadamente 50.000 pessoas e todo resíduo orgânico gerado vai para o Aterro Sanitário de Brasília, inclusive as quase duas toneladas de resíduos orgânicos provenientes do Restaurante Universitário. Levando essa reflexão em consideração, as políticas organizacionais da instituição carregam grande responsabilidade e é fundamental que se criem metas de diminuição da geração e desenvolva meios para o reaproveitamento dos resíduos.

Considerando a importância da digestão anaeróbia para a minimização dos impactos ambientais, reaproveitamento dos resíduos orgânicos e a possibilidade de geração de energia elétrica e térmica por meio do biogás produzido no processo, espera-se que os resultados deste trabalho possam servir como base para futuras pesquisas que objetivem avançar nessa área dentro e fora do ambiente acadêmico e também para o início da discussão acerca da viabilidade de implementação de um reator anaeróbio para tratar os resíduos orgânicos advindos do Restaurante Universitário do *campus* Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília.

2 OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial da digestão anaeróbia para o tratamento dos RSO produzidos pelo Restaurante Universitário do campus Darcy Ribeiro. Visando a geração de biogás e seu aproveitamento energético.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Diagnóstico da situação dos Resíduos Sólidos Orgânicos Gerados no Restaurante Universitário.
- Analisar o potencial de geração de biogás através da Digestão Anaeróbia do Resíduo Sólido Orgânico do Restaurante Universitário;
- Avaliar a substituição do óleo diesel pelo biogás nas caldeiras do Restaurante Universitário.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Tratamento de Resíduo Sólido Orgânico – RSO

Segundo o Panorama Nacional dos Resíduos Sólidos, realizado pela ABRELPE em 2014, no Brasil são produzidos cerca de 215.000 t/dia de resíduos sólidos urbanos. No Brasil, de forma antagônica ao que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos, os lixões e aterros são os métodos mais utilizados para a disposição final dos RSO de modo que a matéria orgânica putrescível, passível de fermentação representa por volta de 55% (percentagem em peso) dos resíduos sólidos produzidos no país (IPT, 2000). Sendo assim, cerca de 100.000 t/dia de matéria orgânica são dispostas irregularmente ou não tem seu potencial energético aproveitado, gerando impactos ambientais negativos que justificam o desenvolvimento de alternativas tecnológicas de tratamento e aproveitamento racional da matéria orgânica, propiciando a redução dos impactos e a melhoria da qualidade de vida da população.

A parcela de RSO gerada no Restaurante Universitário poderia ser tratada por meio da digestão anaeróbia, uma vez que além de proporcionar a redução do volume de material a ser disposto adequadamente, tem como subproduto o biogás, que pode ser utilizado como uma alternativa energética. O potencial energético do biogás está associado à energia química nele acumulada. Isso acontece, porque o biogás é majoritariamente composto por metano, uma substância inflamável, inodora, incolor, com densidade menor que a do ar e com alto poder calorífico. Cabe destacar, no entanto, que o metano é um gás indutor do efeito estufa e que seu potencial de aquecimento global é 25 vezes maior que o atribuído ao dióxido de carbono (IPCC, 2013). Por isso, a recuperação do biogás tem sido promovida com o intuito de minimizar impactos ambientais e de oferecer soluções energéticas renováveis.

A compostagem, que é um processo de degradação natural da matéria orgânica, promovido por microrganismos aeróbicos (Reis, 2012) também é uma alternativa bastante atrativa para o tratamento de RSO, pois pode ser utilizada para produção de composto. Uma das vantagens no processo de decomposição da matéria orgânica pela compostagem, por se tratar de um processo que ocorre na presença de oxigênio, é a não ocorrência da formação de gás metano (CH_4), somente ocorre formação de dióxido de carbono ou gás carbônico (CO_2), água (H_2O) e biomassa (húmus) (Tuomela et al., 2000). O material estável, resultado da compostagem, que pode ser denominado composto ou húmus, é rico em nutrientes, podendo ser utilizado

como adubo orgânico, insumo para a melhoria da qualidade do solo e até para o controle de erosão. (Liang et al., 2003).

Além da poluição visual causada pela má disposição dos resíduos, a presença de animais, vetores e insetos podem contribuir para proliferação de doenças. O chorume formado pela decomposição do lixo orgânico, principal parcela dos resíduos enviados para lixões e aterros, é tóxico e mal cheiroso. Em contato com os lençóis freáticos prejudica a biodiversidade aquática e impossibilita o uso da água para consumo humano, além de provocar a contaminação dos solos e impede seu uso para agricultura. Segundo Ferreira (2001) durante a decomposição dos resíduos formam-se gases que podem provocar explosões e ainda doenças respiratórias para as pessoas que ficam em contato direto com os resíduos.

3.2 Digestão Anaeróbia

A digestão anaeróbia pode ser definida como um processo que ocorre naturalmente em ambientes com ausência de oxigênio, onde diversos microrganismos são responsáveis pela degradação da matéria orgânica. O principal subproduto da DA é o biogás, constituído principalmente por metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2) (Chernicharo, 2007). Para a conversão da matéria orgânica, quatro etapas são fundamentais: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.

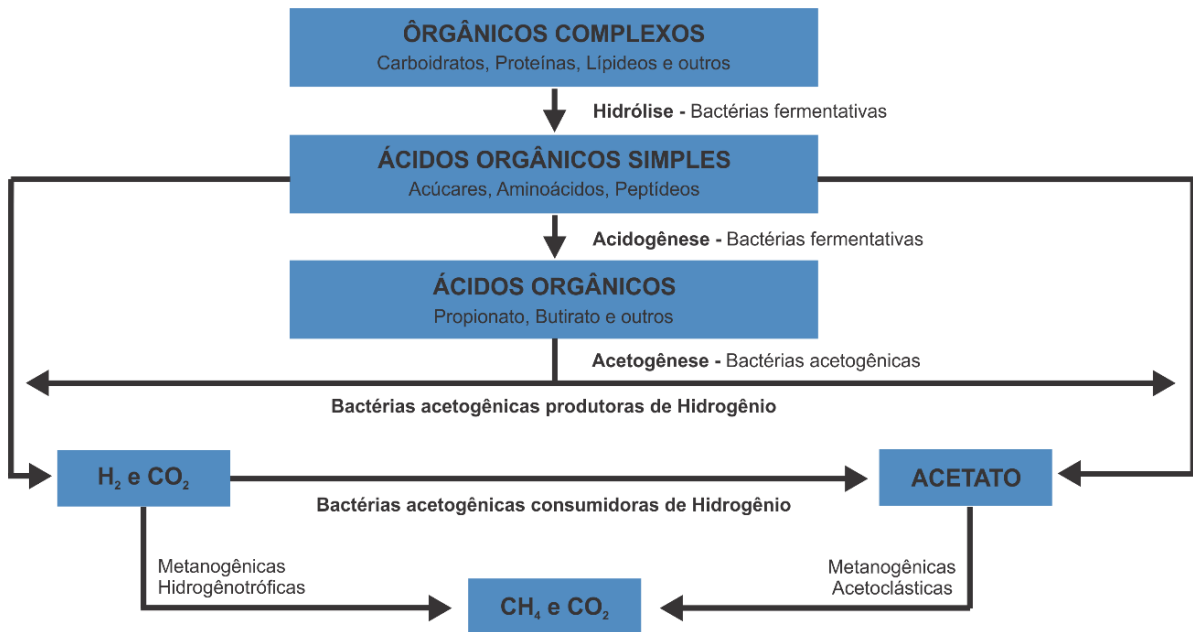


Figura 3.1 Etapas da digestão anaeróbia (Adaptado de Chernicharo 1997)

A hidrólise é uma importante etapa onde os polímeros complexos são convertidos em compostos de menor complexidade, por meio da ação enzimática, fazendo com que a disponibilidade de resíduo ao metabolismo dos demais microrganismos aumente.

Na etapa da acidogênese, as bactérias fermentativas degradam os compostos gerados na fase de hidrólise, produzindo compostos mais simples, como ácidos graxos, álcoois, ácido láctico e compostos inorgânicos.

A terceira etapa da digestão anaeróbia é a acetogênese, fase em que ocorre a oxidação dos compostos gerados na acidogênese, sendo excretado acetato, hidrogênio e dióxido de carbono, substratos esses fundamentais para o desenvolvimento das bactérias metanogênicas.

A última etapa é onde o CH_4 é formado, a fase conhecida como metanogênese. É aquela em que os compostos orgânicos são finalmente convertidos em biogás, por meio de microrganismos denominados arqueas metanogênicas, que são divididos em duas vias metabólicas, as acetoclásticas que produzem CH_4 e CO_2 a partir do acetato, e as hidrogenotróficas, que geram gás metano através da metabolização de dióxido de carbono e hidrogênio.

3.3 Fatores intervenientes da digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo complexo que para ser bem sucedido depende de vários fatores, o controle do processo e dos diversos parâmetros associados determina a taxa de geração de biogás, a seguir estão descritos os principais fatores intervenientes da digestão anaeróbia.

3.3.1 pH

Cada organismo possui uma faixa de pH específica onde seu crescimento é considerado ótimo, sendo que a faixa de pH ideal para a DA compreende-se entre 6,8 e 7 (Mao *et al.*, 2015). A digestão anaeróbia possui diferentes fases e cada uma delas é formada por um grupo de microrganismos com características particulares, a metanogênese requer uma faixa de pH superior a 6,5, já as fases acetogênica e de hidrólise requerem faixas de pH inferiores a 6,5, de modo que valores muito baixos ou muito altos de pH inibem as atividades microbianas, sendo necessário o equilíbrio e monitoramento constante de todo o processo (Chernicharo, 2007).

3.3.2 Umidade

De acordo com Castillo Jr (2006) a fração orgânica dos resíduos sólidos normalmente apresenta grande concentração de umidade, de forma geral os microrganismos necessitam de um meio líquido para seu crescimento, sendo a umidade fundamental para diluição de possíveis agentes inibidores e homogeneização da distribuição de microrganismos

3.3.3 Nutrientes

Diversos estudos citam o nitrogênio como um dos nutrientes mais importantes para o processo da digestão anaeróbia (Chernicharo, 2007; Khalid *et al.*, 2011; Kondusamy *et al.*, 2014), de modo que a necessidade nutricional de nitrogênio possa ser determinada pela relação C/N, segundo estudos realizados por Wang *et al.* (2012) e Zhang *et al.* (2013) o processo de DA atinge a máxima eficiência na geração de metano quando o valor da relação C/N está compreendida entre valores de 26/1 e 27/1. De acordo com Chernicharo (2007) apud Speece (1981) e Gadelha (2005) outros nutrientes importantes para o processo da DA são: nitrogênio, enxofre, fósforo, ferro, cobalto, níquel, molibdênio, selênio, riboflavina, e vitamina B12.

3.3.4 Temperatura

A temperatura é indiscutivelmente um dos parâmetros mais importantes na DA. Estudos avaliaram a influência da temperatura das faixas mesofílica (temperaturas próximas a 25 °C) e termofílica (temperaturas próximas a 55 °C) (Vieira, 2017; Fricke & Pereira, 2013; Nayono, 2010). Apesar de sistemas termofílicos possuírem maior eficiência na produção de biogás, a alta carga energética extra necessária para manter o reator aquecido e a importância da estabilidade da temperatura no sistema fazem com que as opções de reatores mais utilizados sejam aqueles que operam sob condições mesofílicas (Austermann et al., 2007; Chen et al., 2008; BMU, 2013)

3.3.5 Substâncias Inibidoras

Segundo Lima (2015) a fragilidade das arqueas metanogênicas faz com que a presença de substâncias tóxicas, como o sulfeto de amônia e o oxigênio, mesmo em pequenas concentrações, sejam capazes de inibir ou diminuir a eficiência do processo de anaerobiose e produção de biogás. Já o elevado índice de enxofre provoca o crescimento de bactérias sulforredutoras, que se alimentam de diversos substratos e acabam por competir com as arqueas metanogênicas, diminuindo a produção de metano e aumentando a de gás sulfídrico (Silva, 2016).

3.3.6 Inóculo

O processo anaeróbio não se inicia imediatamente após o substrato entrar no reator, é necessário um tempo para que os microrganismos se estabeleçam no sistema, muitas vezes esse tempo é longo, e para reduzi-lo é utilizado um inóculo de biomassa anaeróbia já adaptada ao substrato e com elevada atividade metanogênica, para otimizar o processo de partida dos reatores anaeróbios (Barcelos, 2009), contribuindo diretamente para a aceleração da estabilização da matéria orgânica, além de incorporar diversos outros tipos de agentes tamponantes que regulam o pH, proporcionando redução significativa do tempo de retenção de sólidos (Santos, 2012; Mafaciolli, 2012).

Tempo de detenção

O tempo de detenção do substrato não é um fator interveniente mas determina o padrão operacional do processo, ele varia de acordo com o tipo de reator (sistemas que operam em modos contínuos ou descontínuos) e com as próprias características do substrato utilizado.

O tempo de detenção é o tempo médio que o substrato fica no reator, uma das formas mais utilizadas para analisar o tempo de detenção em experimentos é através da observação da produção de biogás (Gomes, 2014), ou seja, quando não se identificar mais geração de biogás no sistema, significa que o tempo de detenção chegou ao fim.

3.4 Biogás

Durante a última etapa da digestão anaeróbia, a metanogênese, é formado o biogás, um gás incolor, geralmente inodoro e constituído principalmente de metano, além de gás carbônico e outros gases em pequenas concentrações, a composição exata do biogás vai depender das condições do meio e das características dos substratos empregados no processo (Chernicharo, 2007).

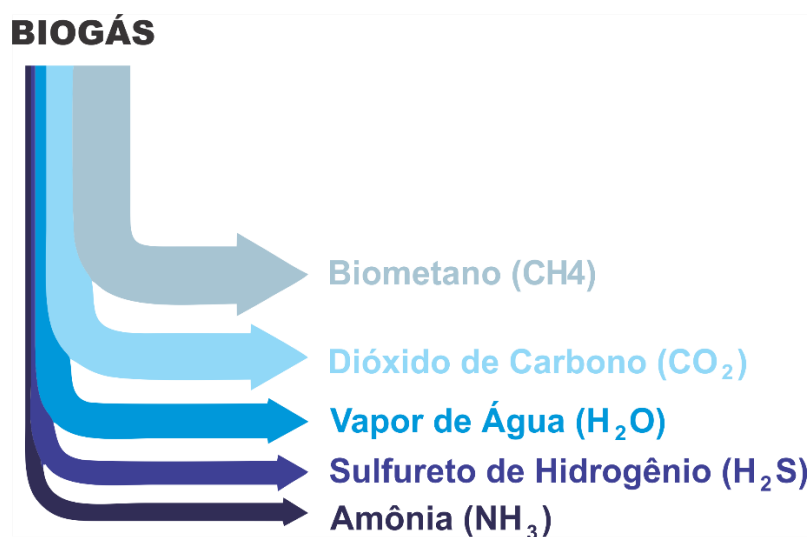


Figura 3.2 - Composição do biogás (Probiogás, 2015 adaptado de EurobservER, 2012)

O biogás é uma ótima fonte energética alternativa, segundo Pavi (2016) a comparação do biogás com outras fontes energéticas é realizada através da análise do poder calorífico de cada fonte energética. No biogás o metano é o gás de maior interesse, pois o poder calorífico do biogás depende diretamente da concentração de metano, que pode chegar a 80% (Rempel, 2014; Schulz, 2015). Por outro lado, é importante salientar que o metano é um gás nocivo para o meio ambiente, sendo gerado principalmente na agropecuária, em estações de tratamento de esgoto, aterros sanitários e lixões. A simples queima do metano é uma solução

que ameniza o problema da degradação ambiental, porém deixa de aproveitar o enorme potencial energético do gás. Na Europa o biogás é uma importante matéria prima utilizada para produção de energia, a principal fonte do gás é advinda de usinas próprias para metanização, porém o biogás gerado em ETE's e aterros também são utilizados. Segundo estudo realizado em 2015, pelo PROSAB, em vários países o biogás produzido em aterros sanitários é aplicado como fonte energética em processos sanitários, e em alguns casos há até a comercialização do biogás para uso nas indústrias.

Segundo relatório da ABRELPE (2014), caso todos os resíduos sólidos produzidos no Brasil fossem enviados para aterros sanitários, o potencial de geração de energia a partir do biogás capturado seria de 536 MW. Caso fosse levado em consideração o biogás produzido em reatores de metanização e em ETE's, o potencial de geração de energia seria bem maior (Ferreira, 2015).

3.4.1 Aproveitamento Energético do Biogás

O biogás pode ser utilizado para diversos fins, desde que atenda os níveis de purificação exigidos para tal (Lobato, 2011; Ferreira, 2015). A Figura 3.3 apresenta as possibilidades mais comuns de uso do biogás.

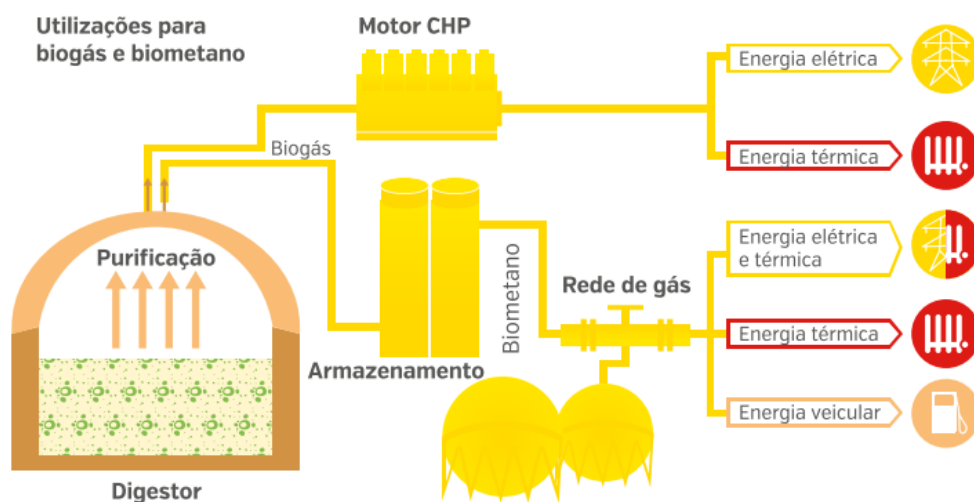


Figura 3.3 - Aproveitamentos energéticos para biogás e biometano (Coletânea Probiogás,2015 adaptado de FNR, 2010).

Conforme mostra a Figura 3.3, o biogás pode ser aproveitado de diversas formas. O emprego mais simples do biogás, de maior eficiência energética e que requer menor qualidade e

controle é a combustão direta, sendo justamente esse aproveitamento o que melhor se adequa a pretensão desse estudo.

O biogás pode ser utilizado para geração de energia elétrica e térmica a partir de motores a gás estacionários. Também existe a possibilidade da cogeração de energia (elétrica e térmica), o que é uma grande vantagem, pois a maior parte da energia gerada durante o processo de transformação do biogás é térmica (calor), que acaba sendo dissipada para o ambiente (Lobato, 2011). A geração simultânea é conhecida com CHP (*combined heat and power*) e promove melhor eficiência energética do sistema.

Outra possibilidade para o biogás após ser purificado e classificado como biometano é a injeção direta na rede de gás natural, possibilitando posterior aproveitamento como energia elétrica, térmica e energia veicular. O biometano misturado ao gás natural pode ser comercializado por meio de conexão à rede de distribuição de gás, ou então, na forma de gás comprimido (Resolução ANP nº 8/2015). Segundo a ANP para que o biometano possa ser misturado ao gás natural é necessário que a concentração de gás metano seja superior à 96,5 % mol.

3.4.2 Biomassa

A fração sólida resultante do processo de digestão anaeróbia, pode ser utilizada para diversos fins, a depender principalmente da qualidade do substrato utilizado no processo. Em alguns casos é necessário que a biomassa passe apenas um processo final de maturação para que ocorra sua completa estabilização e refino para possibilitar seu uso. Os compostos orgânicos gerados podem ser utilizados para recuperação de áreas degradadas, condicionamento de encostas e taludes, recuperação de solos desertificados e condicionantes de solo para fins agrícolas. Além de ser produzido em menor volume, se comparado com o processo de compostagem, o composto anaeróbio é considerado de melhor qualidade, já que possui maior concentração de nutrientes.

3.4.3 Sistemas Anaeróbios

Existem diversas tecnologias para a digestão anaeróbia, segundo Colturato et al., (2015) apud Austermann et al. (2007), os processos de digestão anaeróbia podem ser diferenciados conforme algumas características básicas. A Figura 3.4 apresenta a inter-relação entre as características básicas de processo de digestão anaeróbia.

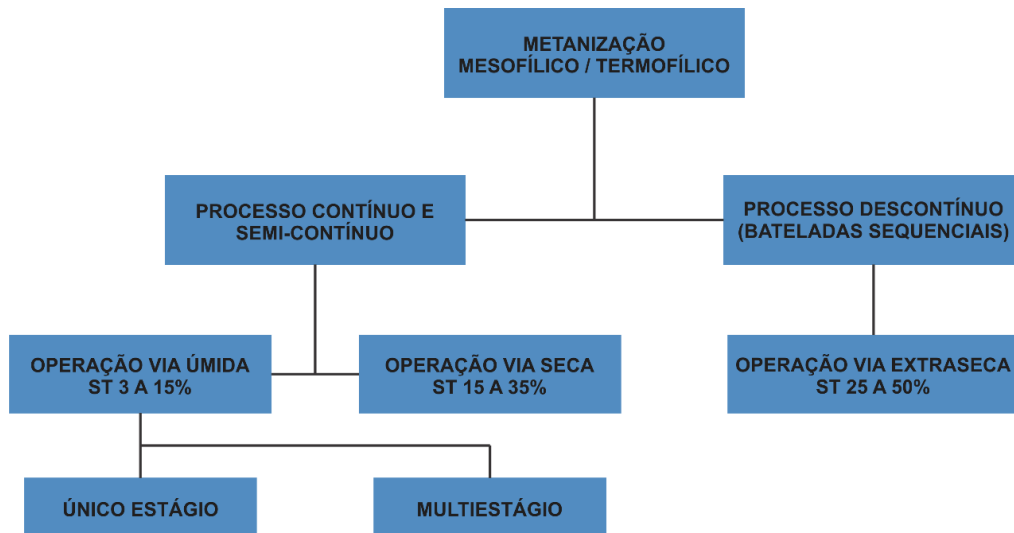


Figura 3.4 - Características básicas de processo das diferentes tecnologias de metanização.

Adaptada de Fricke & Pereira, 2013

- Temperatura do processo: mesofílico ou termofílico;

No processo mesofílico os reatores operam a temperaturas variando entre 30 °C e 40 °C, já no processo termofílico a temperatura ideal varia entre 50 °C e 60°C.

- Sistema de operação: contínuo, semicontínuo ou descontínuo;

Em sistemas contínuos e semicontínuos o substrato é inserido de forma intermitente ou semi-intermitente, o processo descontínuo é quando o reator opera com uma quantidade pré-estabelecida de substrato, em sistema de batelada.

- Concentração de sólidos totais (ST): via úmida, via seca ou extrasseca;

Em relação ao teor de sólidos totais, os reatores são classificados como sistemas que operam via extrasseca quando o teor de ST está entre 25% e 50%, via seca quando o ST está entre 15% e 35% e via úmida quando o teor de ST fica abaixo dos 15%.

- Divisão das etapas de digestão: único estágio ou multiestágio;

Os reatores de único estágio são aqueles que realizam todas as fases da DA em um único reator. Os reatores tipo multiestágio separam as fases da DA em diferentes reatores, normalmente são utilizados dois reatores, um para as etapas de hidrólise, acidogênese e acetogênese e outro para a fase metanogênica.

De acordo com estudo realizado pela BN Umwelt GmbH, 2015, para o PROBIOGÁS, as sobras alimentares oriundas de cozinhas são ideais para tratamento em digestores anaeróbios, devido aos seus altos teores de gorduras, carboidratos e proteínas. Os resíduos alimentares possuem propriedades físico-químicas propícias para o aproveitamento energético por meio da DA (Ali et al., 2012), porém é necessário escolher uma tecnologia de digestor anaeróbio que seja compatível com as características do substrato a ser utilizado. A composição dos resíduos utilizado na DA é fator determinante na produção e qualidade do biogás e em sua qualidade. Segundo Mayer (2013) quanto mais componentes de fácil degradação, maior a produção de biogás.

Na Tabela 3.1 podemos observar o potencial de produção de biogás através de restos alimentares de grandes geradores coletados separadamente.

Tabela 3.1. Potencial de produção de metano com resíduos de alimentos.

Parâmetro	Restos de Alimentos
Sólidos Totais (ST)	15 - 20%
Sólidos Totais Voláteis (STV)	85 – 95%
Impurezas (sem sedimentos)	5 – 10%
Potencial de produção de biogás	850 Nm ³ /t SV
Porcentagem de Metano	55 – 60% CH ₄

Fonte: BN Umwelt GmbH, PROBIOGÁS.

Em relação ao processo ser realizado em único estágio e multiestágio não existe um consenso, diversos autores estudaram o processo de DA em ambos sistemas e obtiveram bons resultados. Em comparação realizada por Ganesh *et al.* (2014) o sistema de único estágio apresentou maior produção de metano que o reator de duas fases. A preferência por reatores de único estágio se dá principalmente por conta de sua simplicidade e menor custo de investimento (Vandevivere *et al.*, 2002).

Um exemplo dessa tecnologia é o reator que foi instalado no Campus Pampulha da UFMG (Figura 3.5 e Figura 3.6) com vistas ao aproveitamento energético do biogás, de forma a propiciar o correto gerenciamento dos resíduos sólidos orgânicos gerados no Campus.

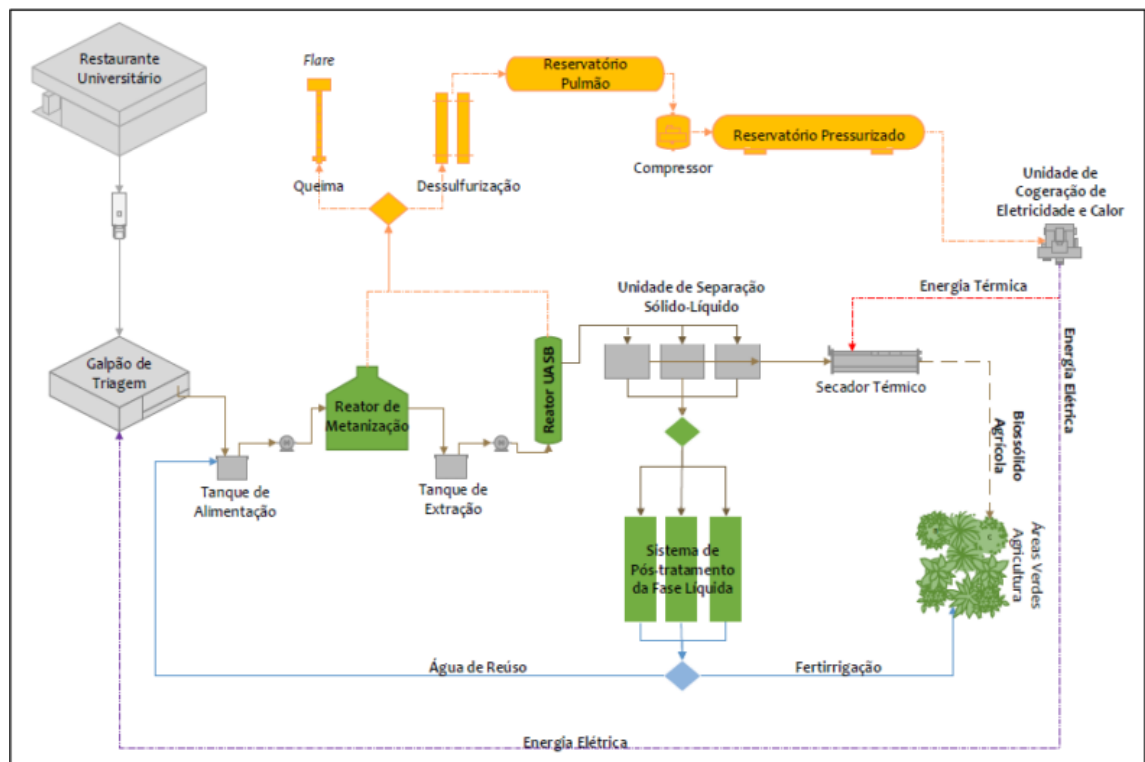


Figura 3.5 - Fluxograma do sistema integrado de metanização de resíduos orgânicos implantado no Campus Pampulha da UFMG (Ferreira, 2015).



Figura 3.6 - Reator anaeróbico. Fonte: Methanum (2015)

O reator opera sob via úmida e em único estágio, a eletricidade e o calor gerados na unidade são utilizados na própria planta e em outras áreas da universidade, os bio-sólidos e a água para reuso servem como composto orgânico para as áreas verdes (Ferreira, 2015).

3.5 Estudo de Caso

Lei do Grandes Geradores de Resíduos Sólidos – Brasília e o *campus* Darcy Ribeiro (UnB)

A Lei Nº 5610/16 instituiu responsabilidades para os grandes geradores de resíduos sólidos não perigosos e não inertes do Distrito Federal, sendo considerados grandes geradores todos aqueles estabelecimentos de caráter público ou privado que produzam uma quantidade média superior a 120 litros por dia de resíduos similares aos resíduos domiciliares. A coleta, transporte, disposição final e tratamento dos resíduos indiferenciados gerados por grandes geradores deixa de ser responsabilidade do (Serviço de Limpeza Urbana - SLU), e passa a ser do grande gerador. Caso a segregação seja feita na fonte, a coleta dos materiais recicláveis, com a exceção do vidro, não é cobrada pelo SLU.

Devido ao seu porte e conseqüente geração diária de resíduos indiferenciados, a UnB é considerada uma grande geradora e apresenta inúmeros problemas relacionados a o manejo dos resíduos sólidos, de modo que a responsabilidade obrigatória do gerenciamento dos resíduos produzidos e conseqüentemente seus custos associados, deixa ainda mais em evidência alternativas para o tratamento e disposição final dos resíduos, alternativas essas que deveriam ser naturalmente utilizadas somente por conta das sérias conseqüências ambientais, muitas vezes irreparáveis para os solos, a água, fauna, flora e atmosfera resultantes do gerenciamento inadequado dos resíduos. Além dos aspectos ambientais, as vantagens econômicas que alguns tipos de tratamento podem trazer, são diversas, dentre as vantagens pode-se citar o fato de que ao diminuirmos a quantidade de lixo que é destinada aos aterros, haverá uma economia significativa dos passivos associados ao uso de transporte e uso do próprio aterro, prolongando sua vida útil.

No *campus* Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília, o grande responsável pela geração de resíduos é o Restaurante Universitário, que gera basicamente resíduo orgânico, mas não aproveita seu potencial energético, encaminhando tudo para o aterro sanitário. Diversos estudos trazem à tona alternativas para o tratamento da parcela orgânica dos resíduos, a

Tabela 3.2 apresenta algumas pesquisas científicas que objetivaram investigar o tratamento dos resíduos sólidos orgânicos através da compostagem ou digestão anaeróbia.

Tabela 3.2 – Pesquisas científicas sobre tratamento dos RSO

Referência	Estudo
CARRILHO (2012)	Digestão anaeróbia de resíduos alimentares
DUTRA (2013)	Compostagem de resíduos orgânicos domésticos
ELIAS (2014)	Compostagem de resíduos orgânicos da Coleta Seletiva
LUSTOSA et al (2014)	Digestão Anaeróbia dos RSO do RU
BASSO et al (2015)	Compostagem de resíduos do RU e resíduos de poda
ZANETTE (2015)	Compostagem de resíduos orgânicos do RU

Os resíduos orgânicos gerados no RU poderiam ser tratados por meio da Digestão Anaeróbia e o biogás produzido utilizado como combustível nas caldeiras que preparam os alimentos do RU. Atualmente duas caldeiras (Figura 3.7) são responsáveis pelo aquecimento das panelas que preparam os alimentos do Restaurante Universitário, elas consomem juntas cerca de 1.000 (mil) litros de óleo diesel por dia, portanto, em um mês são necessários 30.000 (trinta mil) litros de óleo diesel para preparo das 3 refeições diárias (café da manhã, almoço e jantar).



Figura 3.7 – Caldeiras do RU – campus Darcy Ribeiro UnB

3.5.1 Potencial de geração de biogás

Pela falta de reatores em escala real ou protótipos a disposição, buscou-se experiências em escala de bancada que objetivaram estimar a produção de biogás. Diversos estudos utilizaram reatores de bancadas para estimar a produção de gases, os mais comuns são aqueles que operam em sistema de batelada e na faixa mesofílica (Ağdağ e Sponza, 2007; Gomes, 2014; Oliveira, 2015; Pavi, 2016; Vieira, 2017).

Quatro reatores de bancada foram levados em consideração para escolha do modelo a ser utilizado nessa pesquisa, todos trabalham em sistema de batelada e se diferenciam principalmente em relação a forma de captação e medição de Biogás.

Pavi (2016) utilizou garrafas de vidro de borossilicato selados com rolhas de borracha. A produção diária de biogás foi medida pelo método de deslocamento de coluna de água conforme a Figura 3.9.



Figura 3.8 Reator anaeróbico de bancada e sistema de medição de biogás (1) saída para retirada de material digerido; (2) saída de biogás do reator para a ampola; (3) saída para retirada de amostra de biogás; (4) ampola de vidro parcialmente imersa em proveta com água; (5) deslocamento da coluna de água indicando o volume de biogás gerado. (FONTE: Pavi, 2016)

Vieira (2017) utilizou como reatores frascos de vidro âmbar com volume total de 1 l, o orifício foi selado com tampa plástica roqueável com orifício para fixar mangueira e direcionar o biogás a dispositivo de medição de volume. A medição do biogás foi realizada através do deslocamento de volume de líquido em proveta, o líquido utilizado na medição era composto por solução alcalina de NaOH 1M, que dissolve os gases CO₂ e H₂S, de modo que reste apenas gás metano. O objetivo do estudo de Vieira (2017) foi medir a produção de metano com lodos de esgoto. Os frascos utilizados estão apresentados na Figura 3.9 bem como o aparato experimental em escala de bancada (a) e diagrama esquemático do sistema de deslocamento de volume (b).



Figura 3.9 Reatores de bancada e sistema de medição. (FONTE: Vieira, 2017)

Gomes (2014) utilizou frascos âmbar, tipo penicilina, de 250 mL, vedados com tampas de borracha e lacres de alumínio (Figura 3.10). O biogás gerado foi medido através de um conjunto de seringas esmerilhadas acopladas a bico de três vias, conforme Figura 3.11



Figura 3.10 – Procedimentos de montagem do experimento (Fonte: GOMES, 2014)

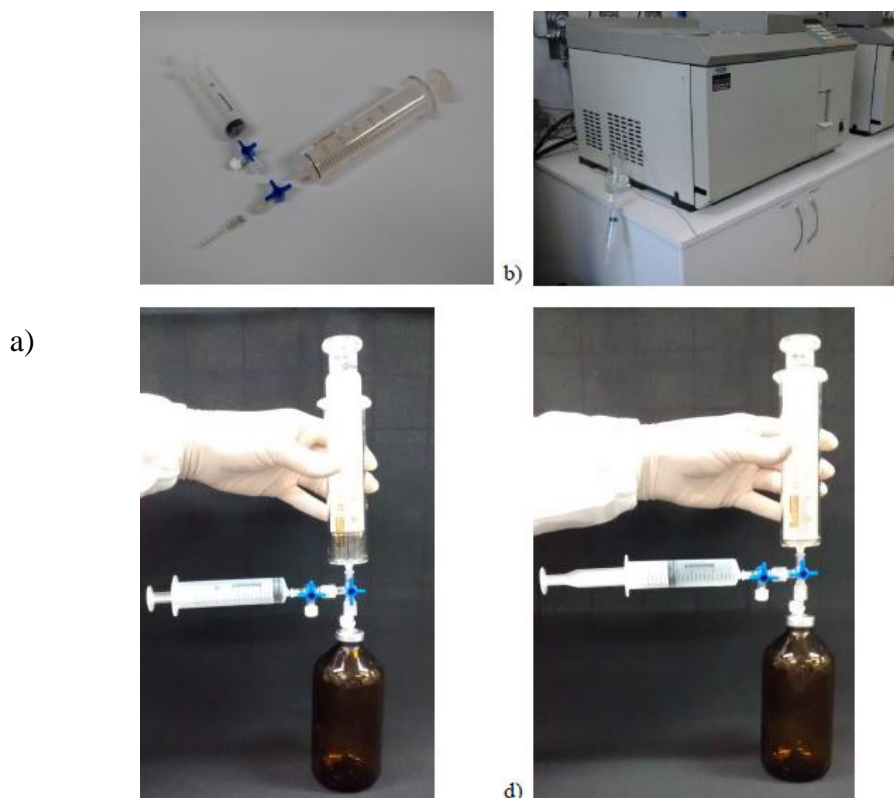


Figura 3.11 – Monitoramento da produção de biogás. (a) seringa de vidro esmerilhada, bico de três vias, seringa de plástico e agulha comum; (b) amostra em análise no cromatógrafo a gás;

c)

Oliveira (2015) construiu reatores para serem operados em bateladas sequenciais, os reatores foram construídos a partir de tubos de acrílico de diâmetro interno de 90 mm e parede com espessura de 5 mm, com volume total de 1600 mL, capazes de resistir a uma pressão de 2,24 Kgf.cm⁻², de modo que o sistema ficasse estável e em condições anaeróbias (Figura 3.12). O monitoramento da produção de gases foi feito de acordo com o deslocamento da massa de água, proposta por Suneethi e Joseph (2011).

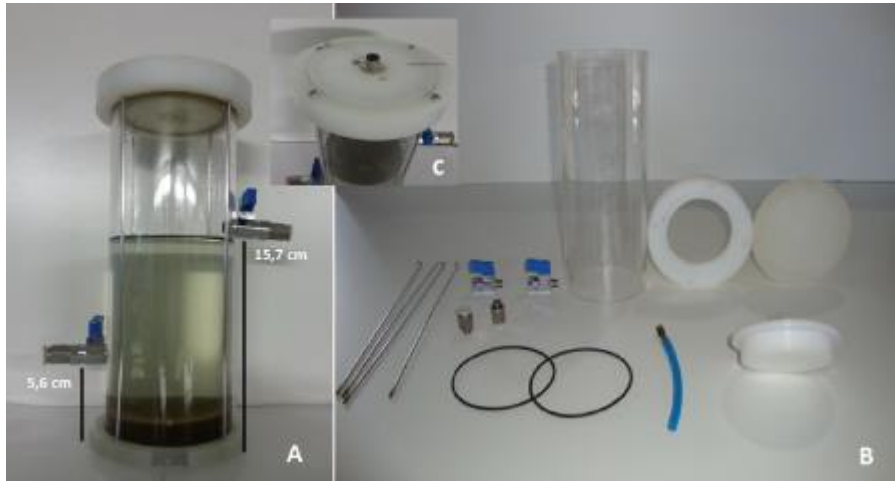


Figura 3.12 - A) Localização das válvulas de alimentação e descarte dos reatores; B) Componentes utilizados na produção dos reatores; C) Válvula para escape dos gases produzidos nos sistemas biológicos. (Fonte: Oliveira, 2015)

4 PROPOSTA METODOLÓGICA

Este trabalho tem como objetivo avaliar a possibilidade de utilizar a digestão anaeróbia como processo de tratamento dos RSO gerados no restaurante universitário da UnB a fim de aproveitar o biogás produzido no processo como fonte energética e ainda reduzir a quantidade de resíduos a ser enviado para o aterro sanitário. Para avaliar a viabilidade de instalação de um reator anaeróbio se faz necessário o conhecimento de alguns parâmetros do substrato que será utilizado no processo de DA, tais como: suas características físico-químicas que serão utilizadas como indicadores para otimizar a taxa de produção de biogás e o montante total de RSO gerado em determinado período de tempo. A proposta metodológica apresentada a seguir se desenvolve conforme as considerações acima.

De modo geral, a presente pesquisa foi dividida em 2 etapas, a primeira (Figura 4.1) baseada nos experimentos em escala de bancada, tendo como objetivos: avaliar as características físico-químicas do substrato, construção de um reator de bancada e análise do comportamento do substrato no reator, de modo que se possa analisar a quantidade do biogás gerado e sua proporção teórica de metano.

Os RSO utilizados nesta etapa foram coletados no Restaurante Universitário do Campus Darcy Ribeiro UnB, e toda etapa experimental realizada no Laboratório de Saneamento do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília.

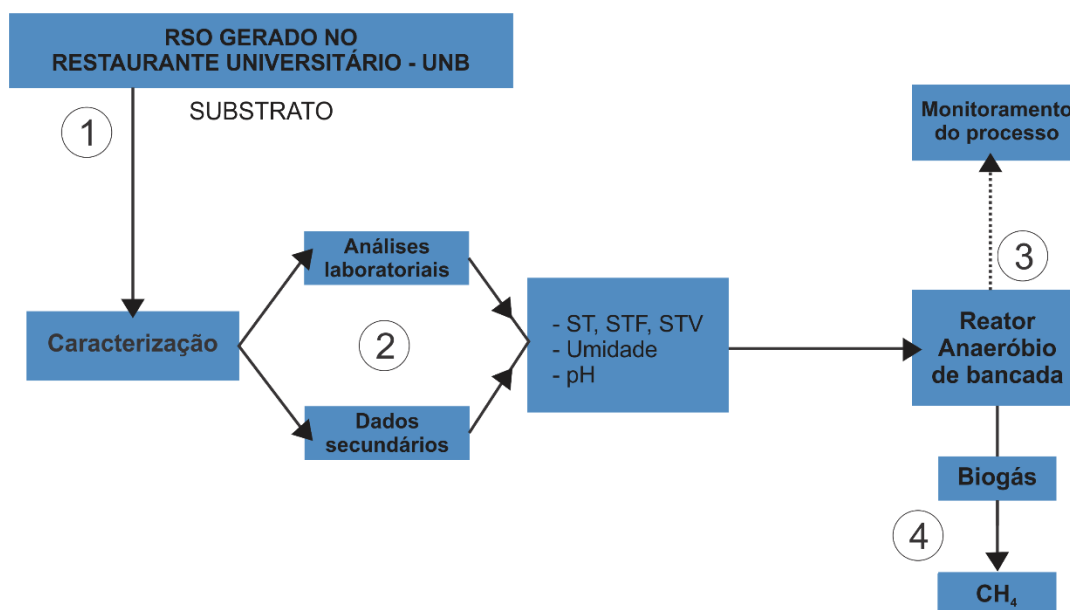


Figura 4.1 - Etapa Metodológica 1

Na segunda parte, foi avaliada e quantificada a geração de RSO no RU através de dados secundários e aferição *in locu*. Em seguida, os dados de produção de biogás obtidos na etapa 1 foram analisados juntamente com a quantidade média de resíduos geradas, de modo que se pôde estimar a produção de biogás.

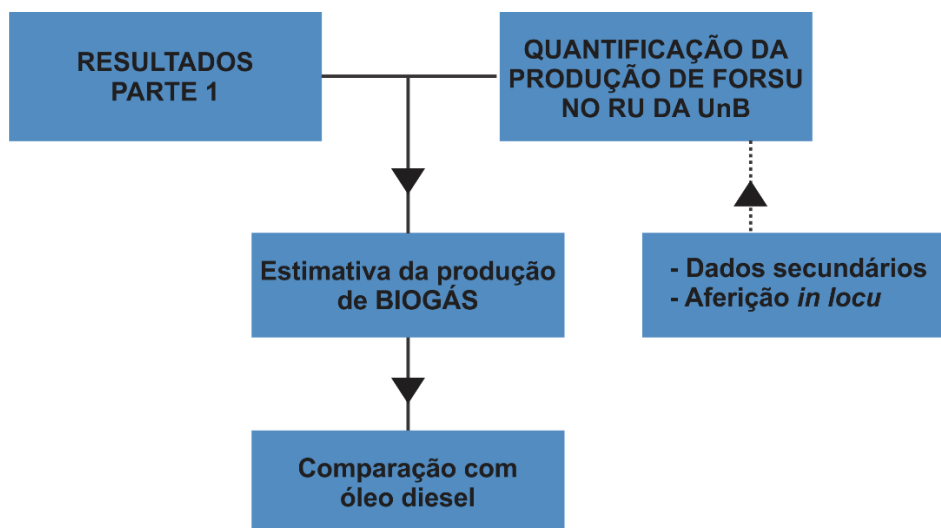


Figura 4.2 - Etapa Metodológica 2

Após a estimativa de produção de biogás, foi diagnosticado o volume médio diário de óleo diesel necessário para a manutenção das caldeiras de vapor responsáveis pelo cozimento dos alimentos do Restaurante Universitário, a partir dessa informação e da análise de eficiência energética do biogás em comparação ao óleo diesel, foi possível quantificar o volume necessário de biogás necessário para suprir a demanda do RU.

4.1 Etapa 1

4.1.1 Amostragem

A diferenciação dos resíduos orgânicos gerados no RU foi dividida em dois grupos, classificados quanto a origem:

Origem 1 (O1)- Resíduo advindo da preparação dos alimentos, sendo eles em sua maior parte, considerados frios e crus (cascas de frutas, cascas de vegetais e legumes, pedaços de carnes, componentes de molhos).

Origem 2 (O2)- Resíduos provenientes dos refeitórios (sobra de alimentos nos pratos dos usuários e o resto de alimento que ficam nas cubas).

A diferenciação quanto a origem é importante para que se identifique qual é a maior fonte de geração de resíduos orgânicos e também suas características.

O RU do Campus Darcy Ribeiro serve 3 refeições diárias (desjejum, almoço e jantar), porém foi constatado que dificilmente se produz RSO no café da manhã, quando ocorre essa geração é mínima. Portanto a geração foi dividida em 2 grupos, diferenciado quanto o tipo de refeição.

Grupo 1 (G1): Almoço

Grupo 2 (G2): Jantar

Para realização do Procedimento Experimental 1 e Procedimento Experimental 2, foram coletadas 8 amostras de resíduos ao longo de um dia, divididas conforme **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 4.1 – Número de Amostras coletadas segundo Grupo e Origem

Procedimento experimental	Grupo 1 Origem 1	Grupo 1 Origem 2	Grupo 2 Origem 1	Grupo 2 Origem 2	Soma
1	2	2	2	2	8
2	2	2	2	2	8

Posteriormente foi realizado o quarteamento das amostras, até atingir quantidade suficiente para realização dos experimentos e preenchimento dos reatores anaeróbios.

4.1.2 Método para amostragem de resíduos

Quando a quantidade de resíduo é muito grande ou não há necessidade de estudar todo o resíduo gerado, podem ser realizadas amostragens por meio de uma coleta representativa deste resíduo. Para definir a forma como deve ser feita a coleta, é utilizada a Norma NBR 10007/2004 da ABNT (ABNT, 2004). A norma define quatro tipos diferentes de amostras:

1. amostra composta: soma de parcelas individuais do resíduo a ser estudada, obtidas em pontos, profundidades e/ou instantes diferentes, através dos

processos de amostragem. Estas parcelas devem ser misturadas de forma a se obter uma amostra homogênea.

2. amostra homogênea: amostra obtida pela melhor mistura possível das alíquotas dos resíduos. Nota: Esta mistura deve ser feita de modo que a amostra resultante apresente características semelhantes em todos os seus pontos. Para resíduos no estado sólido, esta homogeneização deve ser obtida por quarteamento.

3. amostra representativa: parcela do resíduo a ser estudada, obtida através de um processo de amostragem, e que, quando analisada, apresenta as mesmas características e propriedades da massa total do resíduo.

4. amostra simples: parcela do resíduo a ser estudada, obtida através de um processo de amostragem em um único ponto ou profundidade (ABNT, 2004).

Quarteamento é definido como um processo de divisão do resíduo em quatro partes iguais, sendo escolhidas duas partes opostas entre si que para formar uma nova amostra, que deve ser misturada para repetição do processo até a obtenção do volume desejado. As partes não escolhidas devem ser descartadas (ABNT, 2004). A Figura 4.3 **Erro! Fonte de referência não encontrada.** mostra os passos do quarteamento.

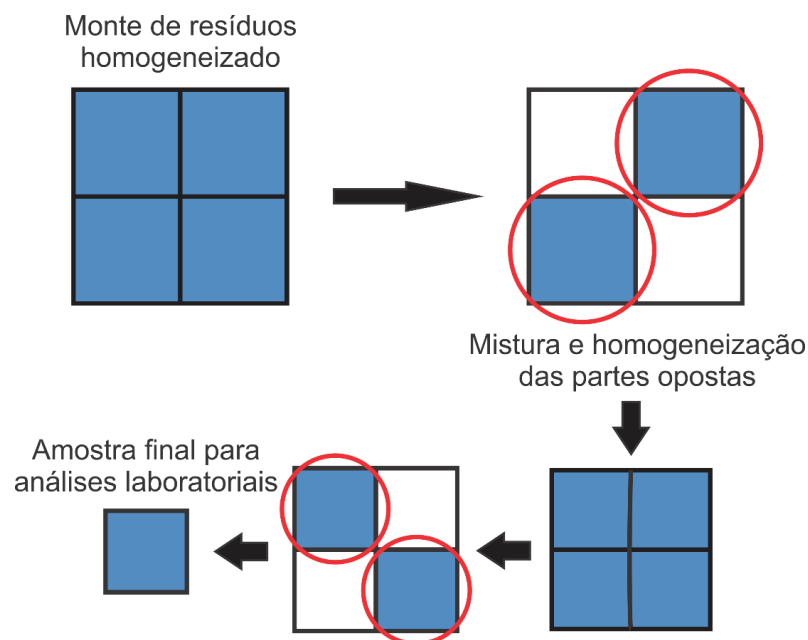


Figura 4.3 - Etapas do quarteamento.

As amostras coletadas por virem de diferentes lugares do restaurante, apresentavam características físicas distintos, portanto para que o efeito da heterogeneidade fosse minimizado as amostras foram trituradas (APHA, 2012).

4.1.3 Caracterização dos resíduos

As amostras de resíduos sólidos orgânicos utilizadas durante as análises laboratoriais foram obtidas após quarteamento, trituração e homogeneização, sendo as mesas utilizadas no preenchimento dos reatores. Foram realizados as seguintes análises físico-químicas: teores de sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV), umidade, pH, alcalinidade, acidez e DQO.

O fluxograma da Figura 4.4 apresenta um esquema da metodologia de preparação das amostras para a caracterizações físico-químicas dos resíduos utilizados na digestão anaeróbia.

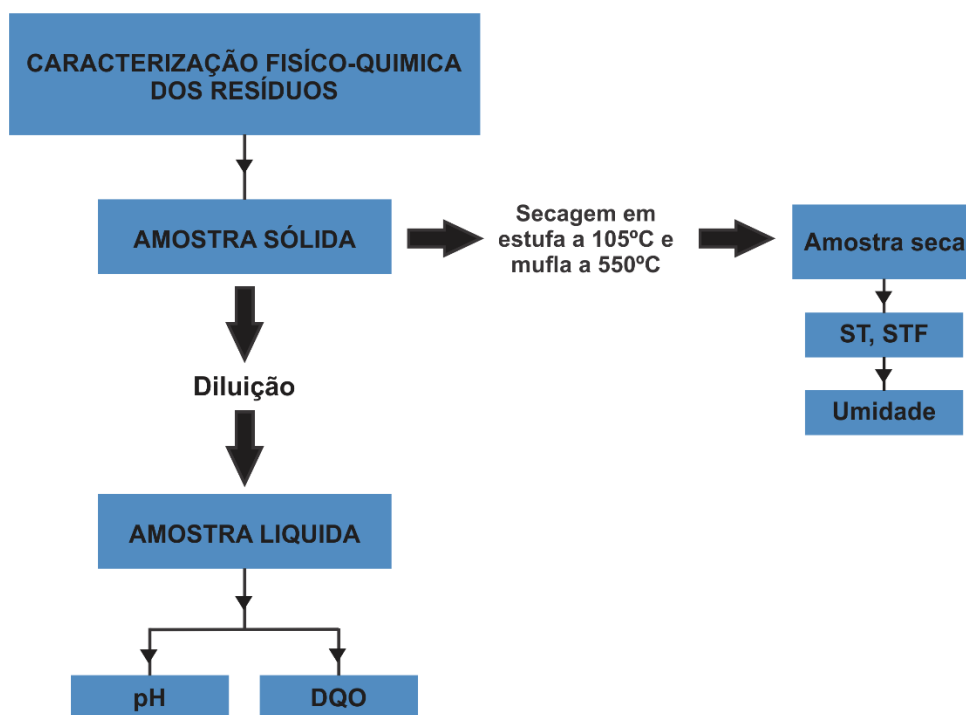


Figura 4.4 - Fluxograma da metodologia de caracterização dos resíduos.

Diversos autores como Ferreira (2015), Gadelha (2015), Pavi (2015), Lima (2015), Hallam (2016) e Vieira (2017) estudaram as características físico-químicas dos resíduos sólidos orgânicos, todos utilizaram as metodologias presentes no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005 e 2012) como parâmetro para as

análises físicas e químicas de sólidos totais (ST), sólidos voláteis (SV), sólidos fixos (SF), e Demanda Química de Oxigênio (DQO). Sendo assim as características dos RSO provenientes do RU serão analisadas de acordo com as metodologias do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. É importante salientar que o Standard Methods foi desenvolvido para análise de água e esgoto, sua adaptação para resíduos orgânicos podem gerar fatores de incerteza que devem ser levadas em consideração.

4.1.4 Reator em escala de bancada

Na realização dos experimentos de bancada foram utilizados os reatores de acrílico desenvolvidos por Oliveira (2015). Na parte superior dos reatores foram inseridas mangueiras de silicone para direcionamento do biogás para sistema de medição.



Figura 4.5 – Reatores de bancada para digestão anaeróbia

A medição da produção de biogás foi feita de acordo com a técnica de deslocamento de volume à pressão constante citada por Vieira (2017), Oliveira (2015) e Raposo et al. (2011), conforme esquema representado pela Figura 4.6 - Esquema do sistema de deslocamento de volume (Vieira, 2017). A solução utilizada para medição do biogás foi água destilada.

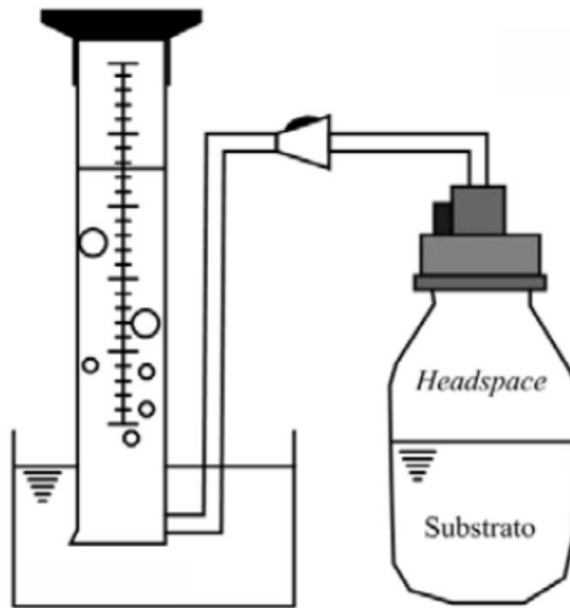


Figura 4.6 - Esquema do sistema de deslocamento de volume (Vieira, 2017)

O procedimento experimental foi realizado duas vezes (Procedimento experimental 1 e Procedimento experimental 2) por um período de 30 dias em datas distintas, conforme os tópicos descritos a seguir:

1 - As amostras de RSO recolhidas no RU em data específica foram homogeneizadas, uma parte foi utilizada para realização das análises laboratoriais descritas e a restante utilizada como substrato nos reatores de bancada;

2 - O conjunto de reatores foram preenchidos com 1000 mL de amostra de RSO:

Procedimento experimental 1: 6 (seis) reatores

Procedimento experimental 2: 2 (dois) reatores

No Procedimento experimental 2 foram utilizados apenas dois reatores (duplicata) por conta dos resultados encontrados no Procedimento experimental 1, que não apresentaram variações significativas na geração de biogás. Os dois reatores que apresentaram maior produção de biogás no Procedimento experimental 1 foram os escolhidos para o Procedimento experimental 2.

3 - Os reatores foram mantidos na faixa de temperatura mesofílica em sala com temperatura controlada;



Figura 4.7 – Aparelho que indica a temperatura da sala

4 - Durante o período de digestão anaeróbia os reatores foram agitados pelo menos uma vez ao dia de forma manual;

5 - A produção de Biogás foi medida diariamente;

6 - O tempo de detenção hidráulica (TDH) foi definido individualmente em função da produção de biogás. No momento em que não se detectou mais a produção de biogás nos reatores, considerou-se o fim do processo.

4.2 Etapa 2

4.2.1 Análise quantitativa da geração de RSO do RU

A quantificação da geração de resíduos orgânicos do Restaurante Universitário Campus Darcy Ribeiro – UnB, foi realizada de duas formas:

- 1- Por meio de dados secundários, como as duas pesquisas já realizados no Restaurante Universitário: Levantamento conduzido pela Professora Izabel Zaneti em novembro de 2015 e os dados obtidos para projeto da disciplina de Resíduos Sólidos Urbanos em setembro de 2016;
- 2- Aferição *in locu* durante uma semana contínua, com o objetivo de alcançar maior representatividade, que devido à complexidade e diversidade da composição dos resíduos gerados e da oscilação do número de refeições servidas durante o ano é difícil de ser alcançada.

4.2.2 Avaliação Quantitativa – Aferição *in locu*

Os resíduos gerados no RU foram pesados diariamente segundo origem e grupo, por um período de uma semana. A planilha utilizada para anotação das pesagens pode ser conferida nos anexos. Os dados coletados foram interpretados em conjunto com os dados secundários e com a quantidade real de refeições servidas nos períodos específicos das aferições. Cruzando todas as informações foi possível calcular a geração total, a geração média diária e também a média de resíduo orgânico por pessoa, conforme a Equação 4.1, e ainda, entender quais as origens e motivos da geração do resíduo, como por exemplo, a diferença entre refeições esperadas e reais e o desperdício do usuário.

$$RES_{per\ capta} = \frac{RES_T}{REF_T}$$

Equação 4.1

Onde:

RES_{per capita} = Resíduo gerado por refeição oferecida, em kg/refeição

REF_T = Número de refeições totais oferecidas em um dia, expresso em ref/dia

RES_T = Peso total de resíduos gerados em um dia, em kg/dia

4.2.3 Avaliação Qualitativa

O processo de produção das refeições foi acompanhado durante uma semana, mediante autorização prévia da administração do Restaurante Universitário, sendo possível verificar o funcionamento da cozinha e a consequente geração de resíduos.

4.2.4 Potencial de produção de Biogás

Utilizando-se dos dados da geração de resíduos orgânicos do Restaurante Universitário do *campus* Darcy Ribeiro - UnB, obtidos através dos levantamentos anteriores (Tabela 5.3) e do presente nessa pesquisa e dos dados de produção específica de biogás, obtidos na literatura e nos ensaios de bancada, foi possível estimar a produção mensal de biogás advindo da biometanização dos resíduos orgânicos do RU, conforme a Equação 4.2.

$$GER_{biogás} = TAXA_{geração} \times RES_{mês}$$

Equação 4.2

Onde:

$GER_{biogás}$ = Geração teórica total de biogás em um mês, em Nm^3

$TAXA_{GERAÇÃO}$ = taxa de geração de biogás em função da quantidade de sólidos voláteis, expresso em Nm^3 biogás/tSV

$RES_{mês}$ = Peso total de resíduos gerados em um mês, em t/mês

De posse das estimativas de geração de biogás, buscou-se avaliar a substituição do óleo diesel, combustível utilizado atualmente nas caldeiras, pelo biogás obtido através da DA, bem como o impacto econômico que essa substituição pode impactar.

$$BIOGÁS_{necessário} = \frac{30.000}{0,55}$$

Equação 4.3

Onde:

$BIOGÁS_{necessário}$ = Quantidade de biogás necessário para substituir o óleo diesel como combustível nas caldeiras do RU, em Nm^3

0,55 = equivalente a $1m^3$ de biogás (Bermann, 2013 e FEN, 2013)

30.000 = Consumo de biodiesel em um mês, em l.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

É importante salientar que os procedimentos experimentais foram realizados duas vezes, a única diferença entre eles foi o número de reatores utilizados no Procedimento experimental 2, as etapas, porém, foram seguidas com rigor. Primeiramente foram realizadas as análises laboratoriais para entender as características do substrato que viria a ser utilizado nos reatores de bancada, após as análises o substrato foi colocado nos reatores para o teste de DA. A geração de biogás foi monitorada e depois comparada com os dados de literatura para substratos com características semelhantes. Na etapa seguinte foi feita uma avaliação e quantificação do resíduo do RU, de modo que se pode estimar a quantidade de biogás que pode ser gerado através da DA dos RSO do Restaurante.

5.1 Etapa 1

5.1.1 Caracterização inicial

As características iniciais do experimento podem indicar previamente o resultado do desempenho dos reatores durante o processo de Digestão Anaeróbia, bem como a concentração e produção final de metano no biogás (Qiao *et al*, 2011). As análises foram realizadas duas vezes, a primeira em função do Procedimento Experimental 1 e a segunda para o Procedimento Experimental 2, conforme Tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Caracterização físico-química inicial do substrato

Procedimento Experimental 1	Sólidos Totais (ST)	15,04 %
	Sólidos Totais Voláteis (STV)	96,10 %
	pH inicial	6,57
	DQO (ST)	42,3 %
Procedimento Experimental 2	Sólidos Totais (%ST)	16,23 %
	Sólidos Totais Voláteis (STV)	96,52 %
	pH inicial	7,3
	DQO (%ST)	45,7 %

As análises de ambas amostras, apresentaram resultados semelhantes, indicando que as características do substrato do RU não variaram de forma considerável no decorrer do estudo. O pH está próximo da faixa que Mao *et al.* (2015) consideraram ótima para o processo de digestão anaeróbia, os demais parâmetros como teor de sólidos totais e voláteis,

incluindo o pH, ficam dentro dos parâmetros estabelecidos pela BN Umwelt GmbH, PROBIOGÁS (2015) para resíduos orgânicos de grandes geradores separados na fonte.

Os resultados obtidos indicam componentes de fácil degradação que resultam em uma maior produção de biogás (Mayer, 2013), confirmando que os resíduos alimentares possuem propriedade físico-químicas ideais para o aproveitamento energético por meio da DA (ALI *et al.*, 2012).

5.1.2 Ensaios de Degradação Anaeróbia

O teste de produção de biogás nos reatores de bancada foi realizado duas vezes, no Procedimento experimental 1 (Abril/Maio de 2018), seis reatores foram utilizados, já no Procedimento experimental 2 (Setembro/Octubre de 2018), o teste foi realizado em duplicada. Em ambos os testes, os reatores foram preenchidos com 1000 ml de substrato. O encerramento dos testes ocorreu por volta de 30 dias, quando a curva de produção acumulada de biogás se estabilizou, conforme Figura 5.1 e Figura 5.2.

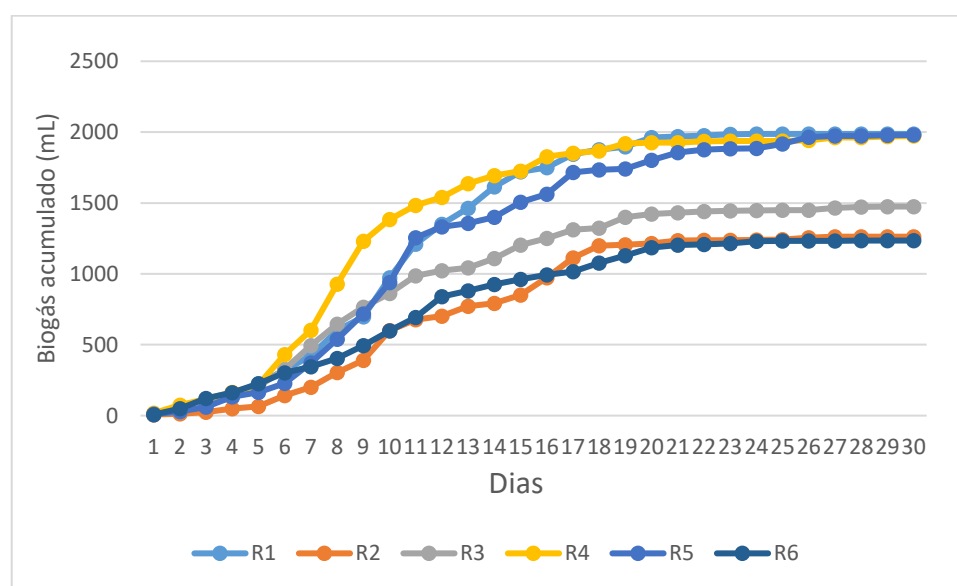


Figura 5.1 - Produção Acumulada de Biogás - Procedimento Experimental 1

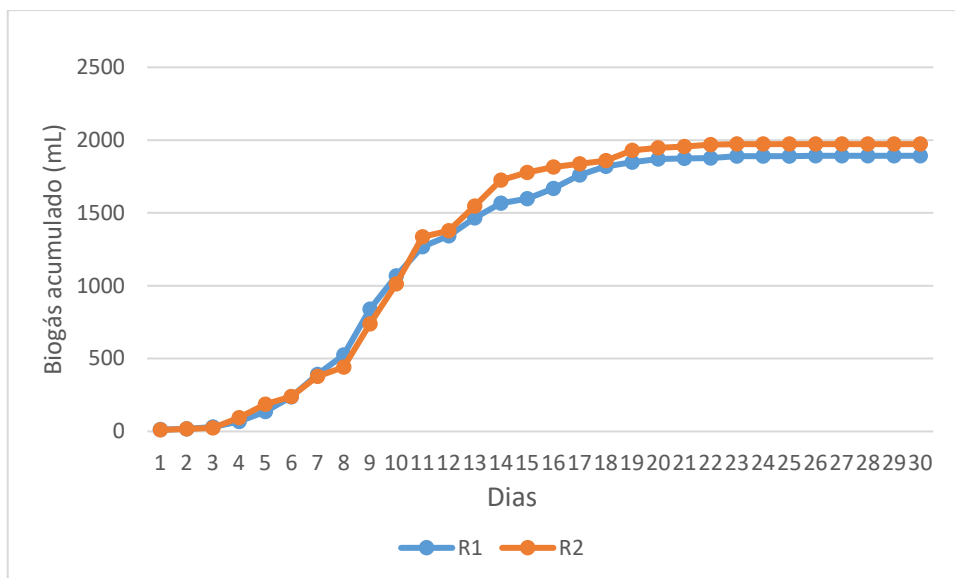


Figura 5.2 - Produção Acumulada de Biogás - Procedimento Experimental 2

Considerando que todos os reatores continham a mesma concentração de resíduos (gSTV), poderia se esperar uma produção semelhante de biogás, sendo possível que a longo prazo a produção volumétrica seja igual para todas as amostras (Gomes, 2014). Após obter o valor acumulado da produção volumétrica de biogás, buscou-se determinar a produção específica ($\text{Nm}^3 \text{ biogás} \cdot \text{t STVresíduo}^{-1}$) para cada amostra, conforme Figura 5.3 e Figura 5.4.

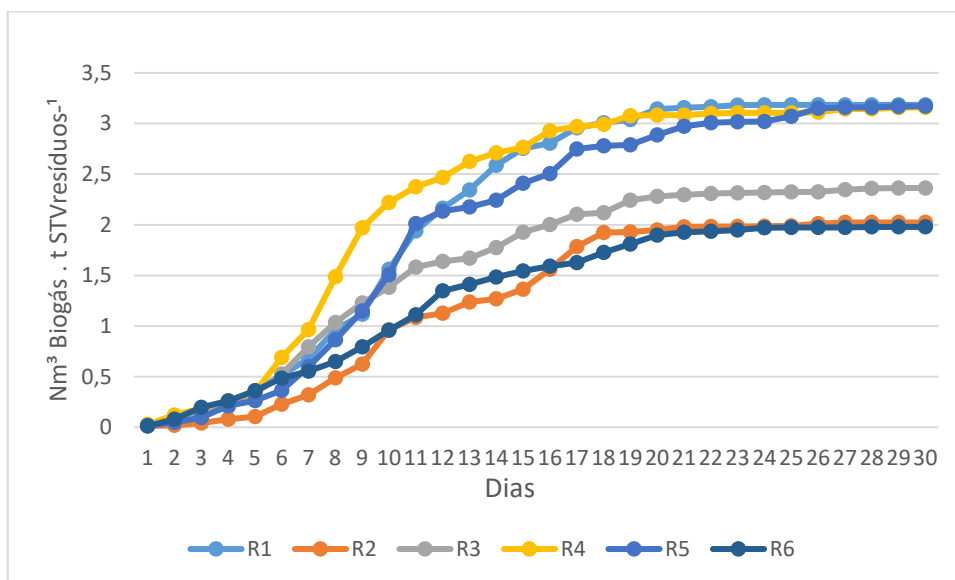


Figura 5.3 - Produção específica de biogás - Procedimento Experimental 1

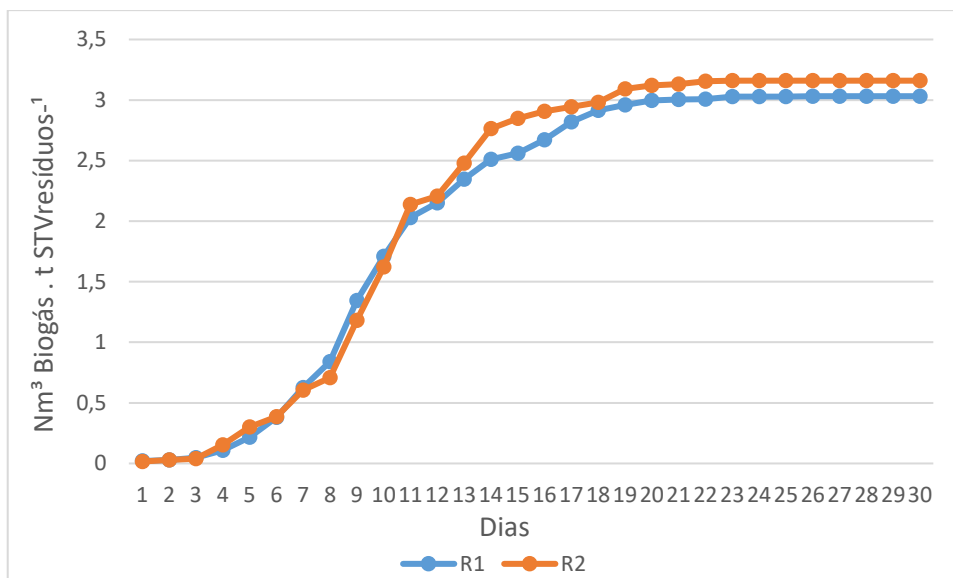


Figura 5.4 - Produção específica de biogás - Procedimento Experimental 2

Os resultados encontrados, ficaram abaixo dos valores reportados na literatura para produção de biogás com substratos e condições semelhantes, como: Resíduos orgânicos de grandes geradores separados na fonte com 850 Nm³biogás/tSV (BN Umwelt GmbH, PROBIOGÁS, 2015) e resíduos orgânicos de restaurante com 100 a 120 Nm³biogás/tSV (Plataforma pMethar, Methanum). Os valores de produção aquém do esperado podem estar relacionados a ausência de inóculos (Lima, 2015 e Silva, 2016), presença de substâncias inibidoras no substrato, vazamento de biogás nos sistemas de vedação do reator ou no sistema de captação do biogás e ainda devido ao fato do reator anaeróbico não ter atingido a estabilidade no processo de digestão anaeróbia (Vieira, 2017).

Apesar de baixa, é possível observar que há geração de biogás e que a curva de produção obedece ao padrão esperado, pois o processo anaeróbico não se inicia imediatamente após o substrato entrar no reator, sendo necessário um tempo para que os microrganismos se estabeleçam no sistema. Nos dois procedimentos experimentais nota-se que a fase de adaptação dura de 4 a 5 dias, a partir de então se inicia um crescimento exponencial na geração de biogás, que se estabiliza por volta de 26 dias após o abastecimento do reator. 30 dias depois, não se observa mais produção significativa de biogás, marcando o fim do teste de biometanização.

5.2 Etapa 2

5.2.1 Diagnóstico da Geração de Resíduos Sólidos Orgânicos no Restaurante Universitário

O Restaurante Universitário é o principal restaurante da UnB, atende estudantes, professores, técnicos e a comunidade externa, atualmente funciona todos os dias da semana e serve as 3 principais refeições do dia: desjejum, almoço e jantar.

O aumento do número de refeições servidas pelo restaurante acompanhou o crescimento da comunidade acadêmica da universidade, o crescimento histórico pode ser acompanhado através das informações obtidas nos anuários da Universidade. A Tabela 5.2 abaixo apresenta o número de refeições servidas pelo restaurante no período entre 1999 e 2016.

Tabela 5.2 - Histórico do número de refeições servidas no RU

ANO	1999	2003	2006	2013	2016
População Acadêmica	28.594	34.130	31.612	48.098	50.703
Número de Refeições	479.584	624.332	866.701	1.043.611	2.135.714

Fonte: Anuários da UnB.

Estudos e pesquisas levam à conclusão de que o brasileiro, em relação à quantidade de alimentos, come menos do que aquilo que joga fora (Gonçalves, 2005). Estima-se que, no Brasil, de 30 a 40% do que é produzido vai para o lixo (Lopes, 2011). São vários os fatores que determinam tais níveis de desperdício, como planejamento inadequado do número de refeições a serem produzidas, variações no número de clientes diariamente e suas preferências alimentares, produção e porcionamento inadequados dos alimentos por falta de treinamento dos funcionários (Sales, 2009).

Em um restaurante universitário o processo de produção de refeições se dá através de uma cozinha industrial. Em estudo sobre a geração de resíduos de um restaurante industrial analisou previamente o processo produtivo do local e verificou que a etapa de higienização dos alimentos de origem vegetal era a que mais gerava resíduos (Venkze, 2001).

Dentro da cozinha industrial de um restaurante universitário, há uma estrutura básica, que gera resíduos orgânicos em praticamente todas as etapas. De forma simplificada, essa estrutura pode ser dividida conforme a Figura 5.5

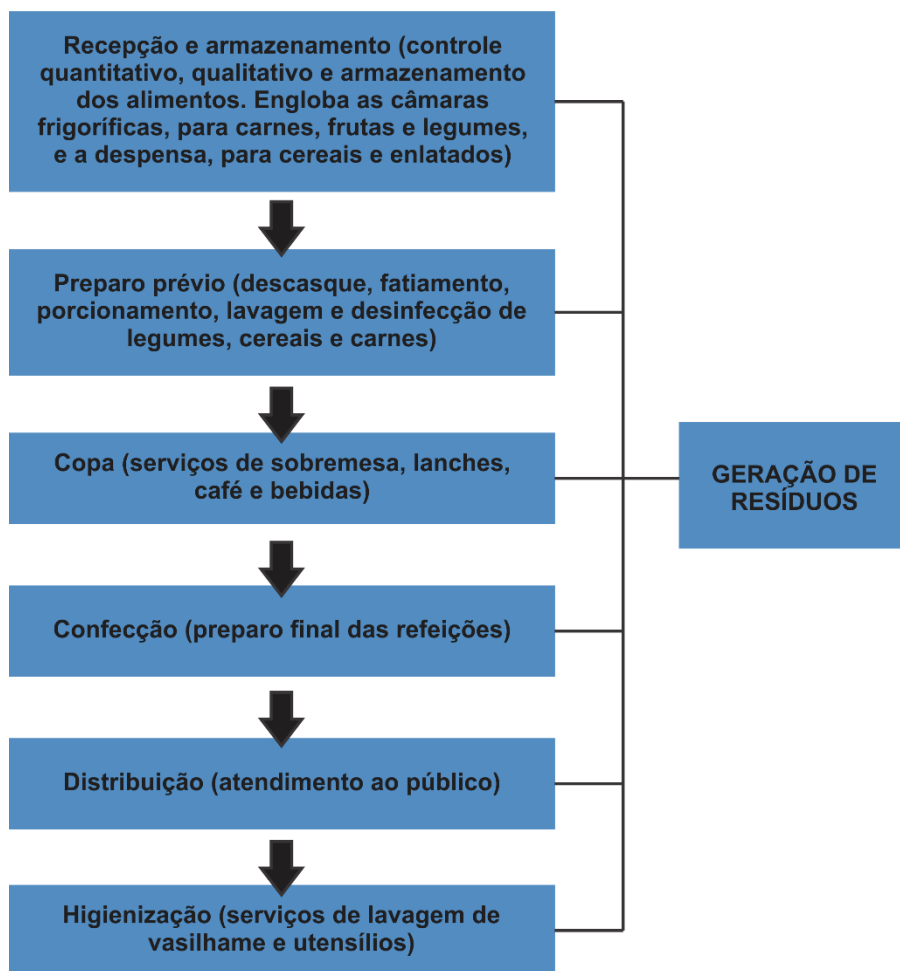


Figura 5.5. Estrutura básica do processo produtivo de refeições dentro de um restaurante,
Fonte: Adaptado de SEBRAE RJ (2010).

No *campus* Darcy Ribeiro, além do Restaurante Universitário, diversas outras lanchonetes e restaurantes são responsáveis pela geração de RSO, como por exemplo o Restaurante do Beijódromo, Restaurante da Praça Chico Mendes, Restaurantes localizados nos blocos conhecidos popularmente como Amarelinho, Cantinas do ICC, da Faculdade de Tecnologia, Faculdade de Medicina e Faculdade de Direito, dentre outras. Porém, o principal responsável pela geração de Resíduos Orgânicos presente na universidade de Brasília é o Restaurante Universitário, representado na Figura 5.6.



Figura 5.6 – Restaurante Universitário da UnB

O presente estudo irá considerar somente os resíduos sólidos orgânicos produzidos pelo restaurante universitário do campus Darcy Ribeiro por três motivos principais:

- 1 – O RU é responsável pela maior produção concentrada de RSO no campus Darcy Ribeiro;
- 2 – Os RSO do RU já são previamente segregados, condição que contribui para o processo de digestão anaeróbia, que depende entre outros fatores, da qualidade do substrato utilizado;
- 3 – O RU se enquadra como grande gerador de acordo com a Lei 5.610/2016 e precisa se adequar as novas diretrizes.

Como o objeto de estudo dessa pesquisa é a digestão anaeróbia para tratar os RSO gerados no Restaurante Universitário do *campus* Darcy Ribeiro – UnB, com vistas a produção e utilização do biogás gerado no processo, a parcela de resíduos de maior interesse é a

orgânica, sendo assim, buscou-se pesquisas recentes (Tabela 5.3) que quantifiquem a produção diária de RSO no RU.

Tabela 5.3 – Geração de RSO no RU do campus Darcy Ribeiro

ANO	Novembro	Setembro
	2015	2016
Número de refeições por dia	7.629,03	8.683,46
RSO por dia (kg)	2.212,96	2.088,96
RSO por refeição (Kg)	0,29	0,26

Fonte: Izabel Zaneti e Disciplina de Resíduos Sólidos Urbanos

Os dados de 2015 são de propriedade da professora Izabel Zaneti, coordenadora do Núcleo de Sustentabilidade da UnB, e os dados de 2016 foram obtidos em levantamento realizado por meio da disciplina de Resíduos Sólidos Urbanos do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB no 1º semestre de 2016 (Figura 5.7), onde constatou-se que somente o almoço e o jantar eram responsáveis pela produção de RSO, sendo esta geração resultado de todas as etapas do processo, iniciando na manipulação e preparo dos alimentos até o descarte das sobras contidas nos pratos após a refeição.



Figura 5.7 – Pesagem de RSO no RU (Fonte: Próprio autor, 2016)

5.2.2 Análise quantitativa da geração de RSO do RU

O Restaurante Universitário do Campus Darcy Ribeiro - UnB funciona durante todos os dias da semana e fornece as 3 principais refeições, portanto a geração de resíduos é diária e contínua. A geração de resíduos se inicia por volta de 8 horas da manhã com a preparação do almoço e tem fim somente após as 19 horas, quando as sobras geradas nos refeitórios são descartadas. Entre os dias 12 e 18 de Abril de 2018, segunda a domingo, foi realizado o levantamento da geração de resíduos orgânicos do RU, conforme

Tabela 5.4. Os resíduos foram pesados em balança digital (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) de precisão de 0,05kg disponibilizada pela administração do restaurante.

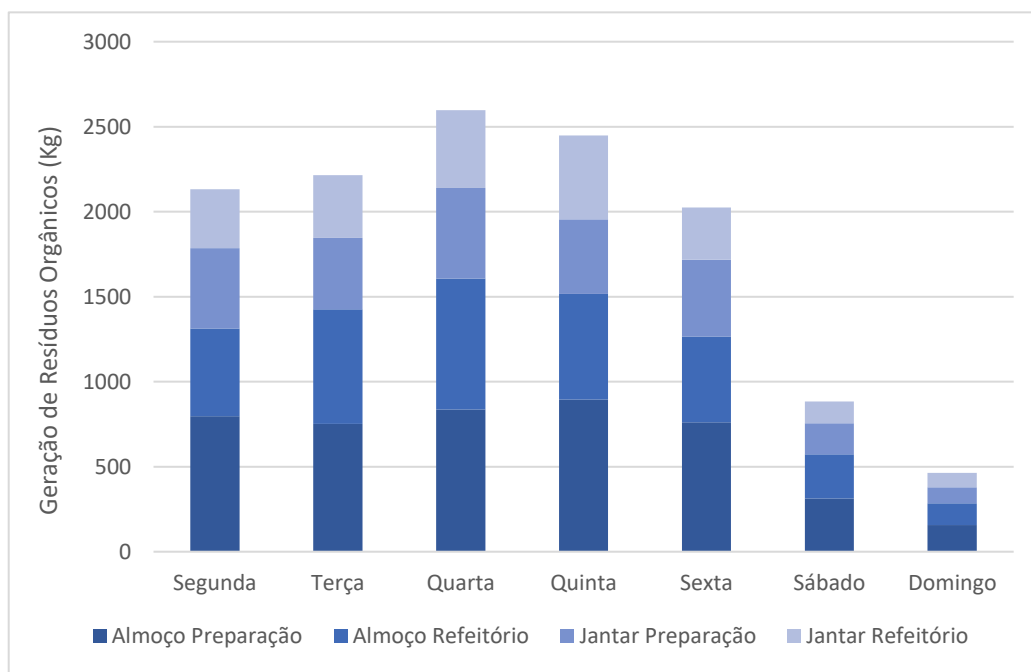
Tabela 5.4 - Geração de Resíduos Orgânicos do Restaurante Universitário
- Campus Darcy Ribeiro UnB

	Grupo 1 – Almoço		Grupo 2 - Jantar		Total (Kg)
	Origem 1	Origem 2	Origem 1	Origem 2	
	Preparação	Refeitório	Preparação	Refeitório	
Segunda (12/04/2018)	796,3	517,3	472,7	345,4	2.131,7
Terça (13/04/2018)	751,7	673,7	420,1	369,2	2.214,7
Quarta (14/04/2018)	837,3	769,8	532,3	458,2	2.597,6
Quinta (15/04/2018)	895,1	620,3	439,6	493,7	2.448,7
Sexta (16/04/2018)	762,1	504,1	451,6	307,2	2.025,0
Sábado (17/04/2018)	313,4	259,5	182,8	128,1	883,8
Domingo (18/04/2018)	157,2	127,8	93,9	84,1	463,0
	Média (kg)				1.823,5

Nota-se que a geração de resíduos é regular de segunda a sexta e reduz consideravelmente no sábado e domingo, tal diferença se justifica devido ao fluxo universitário, que é bem menor durante os finais de semana e reflete também no número de refeições servidas pelo Restaurante. Segundo a administração do RU, de segunda a quinta são servidas em média 10.000 refeições (café da manhã, almoço e jantar), na sexta 7.350, no sábado 1.650 e no domingo 1.000.

Os resíduos possuem diferentes origens, uma parcela é gerada na preparação das refeições (Origem 1) e a outra advinda dos refeitórios (Origem 2). O Gráfico 5.1 apresenta em uma melhor visualização o somatório das parcelas de geração diária de RSO.

Gráfico 5.1 - Somatório das parcelas de RSO gerados no RU



No período do levantamento, foram servidas aproximadamente 8.683 refeições por dia, levando-se em conta a geração de RSO total no período, temos que a cada pessoa gera cerca de 0,21 kg de RSO por dia. A geração *per capita* de resíduos no RU é menor se comparada aos levantamentos realizados em anos anteriores, essa diferença pode estar relacionada a medidas de redução do desperdício implementadas no intervalo entre os levantamentos, como por exemplo a diminuição dos pratos e das conchas de servir e do reaproveitamento das cascas de frutas e verduras gerados na preparação dos alimentos que anteriormente eram descartadas.

A Tabela 5.5 mostra a comparação da geração diária de RSO, número de refeições e geração per capita dos últimos levantamentos realizados no RU do *campus* Darcy Ribeiro – UnB.

Tabela 5.5 - Levantamentos da geração de RSO no RU do campus Darcy Ribeiro - UnB

ANO	Novembro 2015	Setembro 2016	Abril 2018	Média (dos 3 levantamentos)
Nº de refeições por dia - Média	7.629,03	8.034,46	8.683,43	8.115,64
RSO por dia (kg) - Média	2.212,96	2.088,96	1.823,50	2.041,63
RSO por refeição (Kg) - Média	0,29	0,26	0,21	0,25

De acordo com as informações presentes na Tabela 5.5, é possível observar um aumento contínuo do número de refeições servidas diariamente no RU e ao contrário do que se espera, houve uma diminuição da geração de resíduos. Entre novembro/2015 e abril/2018 constatou-se aumento de aproximadamente 1.000 refeições servidas diariamente, entretanto a geração de resíduos caiu consideravelmente, o que reflete na média de geração *per capita*.

5.2.3 Análise qualitativa dos RSO do RU

Durante dois dias, foi possível acompanhar todo o processo de produção das refeições e também a dinâmica dos refeitórios. A segregação dos resíduos na cozinha é realizada por meio de lixeiras, bem distribuídas e sempre em pares, uma destinada para recicláveis e outra para orgânicos, mesmo assim foi possível observar a presença de embalagens plásticas transparentes em algumas lixeiras. Um dos pontos que observados foi a relação dos funcionários com os resíduos e a dificuldade de segregação dos diversos tipos de resíduos gerados durante a preparação das refeições, pois um dos principais fatores intervenientes para a produção de biogás está relacionado a qualidade do substrato. Não há lixeiras exclusiva para os rejeitos, sendo assim, esponjas, panos de limpeza, lãs de aço, toucas, luvas e outros rejeitos acabam sendo descartados com os orgânicos ou recicláveis.

No refeitório, notou-se que os resíduos remanescentes dos pratos, são descartados com o auxílio de esponja umidificada com água e detergente, como forma de lavagem preliminar, essa conduta, por fim, acaba contaminando os resíduos orgânicos. Não foi observado desperdício significativo de comida por conta do planejamento do número de refeições a serem servidas, o pouco que sobra é refrigerado e utilizado nas refeições seguintes. De acordo com as observações é possível concluir que o desperdício significativo no refeitório não se dá por conta de planejamento deficiente do número de refeições e sim pelas sobras

individuais, associadas a falta de consciência de alguns frequentadores do RU ou até mesmo pela utilização de conchas e escumadeiras inadequados para servir (Sales, 2009).

5.2.4 Potencial de Produção de Biogás

De acordo com os levantamentos anteriores e com o atual (Tabela 5.5), o Restaurante Universitário gera em média 8.115,64 kg de resíduos orgânicos por dia. Extrapolando esse valor, pode-se estimar que a geração mensal de resíduos orgânicos é de 243,47 toneladas. As análises laboratoriais indicaram que os sólidos voláteis dos resíduos orgânicos correspondem em média a 96,31%, sendo assim a geração mensal de resíduos orgânicos do RU é de 234,48 toneladas de SV.

Como os resultados da geração de biogás obtidos nos testes de bancada ficaram muito abaixo dos valores expressos na literatura para substratos com características semelhantes ao resíduo orgânico do Restaurante Universitário, serão considerados os valores de produção específica de biogás do estudo realizado pela empresa BN Umwelt GmbH para o PROBIOGÁS (2015) e os valores fornecidos pela fabricante Methanum Resíduos e Energia, responsável pela plataforma pMethar instalada no *campus* da Pampulha, UFMG, que utiliza justamente resíduos do Restaurante Universitário local como substrato no reator.

Tabela 5.6 - Potencial de produção de Biogás

Estudo / Tecnologia	Produção específica Nm ³ biogás/tSV	RSO (ton/mês)	SV (ton/mês)	Produção mensal de Biogás (m ³)
BN Umwelt GmbH	850			199.308,00
pMethar, Methanum	100 a 120	243,47	234,48	23.448,00 a 28.137,60

Segundo Bermann (2013) e FEN (2013), 1m³ de biogás equivale energeticamente a 0,55 l de óleo diesel. Como o consumo das caldeiras é de 30.000 litros de óleo diesel por mês, serão necessários pelo menos 54.545,45 m³ de biogás para substituir o óleo diesel no preparo dos alimentos do RU.

De acordo com a Tabela 5.6, se considerado o estudo da BN Umwel GmbH ou a tecnologia pMethar, a quantidade de biogás gerada é capaz de atender totalmente ou parcialmente, respectivamente, a demanda do RU. Considerando o valor atual (15/11/2018) do litro do

óleo diesel (R\$3,50) foi possível estimar de forma simples (Tabela 5.7) uma possível economia mensal caso o biogás fosse utilizado como combustível.

Tabela 5.7 - Economia mensal gerada pelo uso do biogás

Estudo / Tecnologia	Produção mensal de Biogás (m³)	Economia mensal
BN Umwelt GmbH	199.308,00	R\$ 105.000,00
pMethar, Methanum	23.448,00 a 28.137,60	R\$ 45.137,4 a R\$ 54.167,88

Os resultados expressados acima indicam a possibilidade de substituição do óleo diesel pelo biogás, sendo possível até mesmo suprir toda a demanda do RU, é necessário porém, deixar claro que essa avaliação desconsidera alguns custos que estarão associados a substituição do combustível, como por exemplo o custo de instalação de uma planta de biometanização, o custo de entrega do óleo diesel, de manutenção da planta e adaptação das caldeiras, dentre outros.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A digestão anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos é um procedimento complexo e envolve diversas variáveis que influenciam diretamente na produção de biogás. Identificar e controlar as variáveis é fundamental para o sucesso do processo. Os resultados encontrados na etapa 1, através dos ensaios de bancada, ficaram aquém do esperado em termos de produção, porém confirmaram que é possível produzir biogás a partir de resíduos sólidos orgânicos, mesmo sem a utilização de inóculos ou mistura de outros tipos de substrato. Resultados encontrados na literatura por outro lado, indicam que resíduos orgânicos com as características físico-químicas similares aos do RU, possuem potencial elevado para geração de biogás, o que confirma a necessidade de se avaliar melhor todo o processo, desde a escolha dos reatores até o monitoramento constante de todas as variáveis que influenciam o processo da digestão anaeróbia.

Os resultados da geração de resíduos orgânicos do RU, expressos na etapa 2, mostram que o tratamento deles por meio da digestão anaeróbia para produção de biogás a ser utilizado em substituição ao óleo diesel nas caldeiras do restaurante, é uma opção viável se considerada as taxas de geração de biogás expressas na literatura para resíduos com características similares. Os resíduos orgânicos do restaurante já são separados na fonte, porém têm todo seu potencial energético perdido, uma vez que ainda são encaminhados para o aterro sanitário, cenário que provavelmente irá perpetuar por algum tempo. O Plano de Logística Sustentável da UnB que prevê ações de sustentabilidade para a universidade entre os anos de 2018 e 2021, tem um capítulo específico para tratar da gestão dos resíduos sólidos, porém ignora a parcela orgânica gerada na universidade (principalmente pelo RU), prevendo apenas o tratamento dos resíduos de poda por meio da compostagem.

Para futuras pesquisas recomenda-se o estudo da viabilidade econômico financeira de implementação de uma planta de digestão anaeróbia no *campus* Darcy Ribeiro, para aproveitamento energético do biogás tanto nas caldeiras do RU como na geração de eletricidade. Também se recomenda a construção de um reator em escala piloto para que as variáveis que envolvem o processo de digestão anaeróbia e as taxas de produção de biogás possam ser melhor acompanhadas e controladas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE. Panorama Dos Resíduos Sólidos No Brasil. p. 120, 2014.

AGDAG, O. N; SPONZA, D. T. (2007). "Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors".

ALI, G.; NITIVATTANANON, V.; ABBAS, S.; SABIR, M. Green waste to biogas: Renewable energy possibilities for Thailand's green markets. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, n. 7, 2012.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). Standard methods for the examination of water and wastewater. 22nd ed. Washington, DC. 2012.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 21^a ed. Washington, D.C. 2005

AUSTERMANN, S.; ARCHER, E.; WHITING, K. J. Comercial Assessment - Anaerobic Digestion Technology for Biomass Projects, Juniper for Renewables East. Juniper for Renewable East, 2007.

BASSO, L. A. Compostagem dos resíduos dos restaurantes universitários e dos resíduos de poda na cidade universitária Crmando Calles de Oliveira. Trabalho de graduação em Engenharia Ambiental, Escola Politécnica da USP, 2015.

BARCELOS, B.R. Avaliação de diferentes inóculos na digestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos domésticos. 2009. 75 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental. Universidade de Brasília, Brasília, DF. 2009.

BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit. Neue Wege zur Prozessoptimierung in Biogasanlage – band 11. 2013 BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental / Ministério das Cidades. Resíduos sólidos: plano de gestão de resíduos sólidos urbanos: guia do profissional em treinamento: nível 2. Belo Horizonte: ReCESA. 96 p. 2007.

VIEIRA, G. inibição e toxicidade no processo de digestão anaeróbia dos lodos gerados na ETE Brasília Sul: Estudo de caso em escala laboratorial. Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hidricos). Universidade de Brasília, DF. 91p. 2017.

CARRILHO, N. P. Q. Valorização de Bio-Resíduos Alimentares por Digestão Anaróbia Descentralizada - Caso de Estudo: Campus da FCT/UNL. Dissertação de Mestrado em Energia e Bioenergia. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2012.

CARNEIRO, P. H.. Efeitos da adição de lodo ao inóculo de reator anaeróbio híbrido sólido-liquido tratando fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. 2005. 135 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2005.

CASTILLO M. E. F.; CRISTANCHO, D. E.; ARELLANO, A. V. Study of the operational conditions for anaerobic digestion of urban solid wastes. Waste Management v. 26, 2006.

CHEN, Y., CHENG, J. J., CREAMER, K. S. "Inhibition of anaerobic digestion process: a review." In: Bioresource technology. 2008.

CHERNICHARO, C.A.L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Reatores Anaeróbios. 2a.ed. Belo Horizonte: Departamento de engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.

COLTURATO, L., F., D., B. Dessulfuração de Biogás da metanização da vinhaça: uma nova abordagem para remoção de altas concentrações de H₂S. Tese (doutorado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2015.

DUTRA, B. R. M. Resíduo Sólido Orgânico Doméstico da Moradia Estudantil da UNICAMP: potencial de geração e plano de gerenciamento. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil na área de Concentração de Saneamento e Ambiente. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, 2013.

ELIAS, V. O. M. Transferência Tecnológica do projeto de coleta seletiva e compostagem de resíduos orgânicos da UFSC para UFGD. Trabalho de graduação no curso de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Santa Catarina, 2014.

FERREIRA, B. O. Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás. 117f. 2015. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, MG. 2015.

FERREIRA, J. A. ; ANJOS, L. A. Aspectos de saúde coletiva e ocupacional associados à gestão de resíduos sólidos municipais. Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente. Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2001.

FLOR, A. P. C. P. Comportamento de reatores anaeróbios tratando a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos. Dissertação de Doutorado em Ciências aplicadas ao Ambiente. Universidade de Aveiro. 2006.

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

FRICKE, Klaus; PEREIRA, Christiane. Global Trends in Waste Management. Alemanha: Technische Universität Braunschweig/ Center for Research, Education and Demonstration in Waste Management, 2013.

FUNDAÇÃO ECOLÓGICA NACIONAL, FEN. Biogás - Fontes alternativas de energia. Disponível em <<http://fen.org.br/wp-content/uploads/2013/05/Fontes-Alternativas-de-Energia.pdf>>. 2013.

GADEKHA, E. P. “Avaliação de Inóculos Metanogênicos na Aceleração do Processo de Degradação da Fração Orgânica dos Resíduos Sólidos Urbanos”. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 95 p. 2005.

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. 2014.

GOMES, J. N. C. Potencial de produção de energia a partir da biometanização de resíduos orgânicos do Câmpus Pampulha da UFMG. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, MG. 2014

GONÇALVES, Benjamin S. (coordenação e edição). O Compromisso das Empresas com o Combate ao Desperdício de Alimentos – Banco de Alimentos, Colheita Urbana e Outras Ações. São Paulo: Instituto Ethos, 2005. Disponível em <http://www.ethos.org.br/_Uniethos/Documents/compromisso_empresas.pdf>. Acesso em 10 de Junho de 2017.

HALLAM, M.J. Efeito da relação substrato/inóculo na partida de reator anaeróbio para digestão de resíduos alimentares. 119 f. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS. 2016.

IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. STOCKER, T. F., D. QIN, G. K. PLATTNER, M. TIGNOR, S. K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX, P. M. MIDGLEY (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (2000). “Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado”. 2ª ed., São Paulo, IPT/CEMPRE. 370 p.

KHALID, A.; ARSHAD, M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWSON, L. The anaerobic digestion of solid organic waste. Waste Management, v. 31, n. 8, p. 1737-1744, 2011.

KONDUSAMY, D. KALAMDHAD, A.S. Pre-treatment and anaerobic digestion of food waste for high rate methane production – A review. Journal of Environmental Chemical Engineering. 2014.

LIANG, C. et al. The influence of temperature and moisture contents regimes on the aerobic microbial activity of a biosolids composting blend. Bioresource Technology, Amsterdam. 2003.

LIMA, N. C. Análise de tipos e concentrações de inóculos para potencializar a geração de biogás na digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos domiciliares (FORSD) do Bairro Pici, Fortaleza. 2015.

LOBATO, L. C. S. Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2011.

LOPES, Ana C. C. Avaliação do desperdício alimentar num Restaurante Universitário no Brasil. 2011. 30 f. Dissertação (Licenciatura em Ciência da Nutrição) - Universidade Atlântica, Bacarena, 2011.

LUSTOSA, G.N.; MEDEIROS, I. H. B. Proposta de um biodigestor anaeróbio modificado para produção de biogás e biofertilizante a partir de resíduos sólidos orgânicos. Graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília, 2014)

MAFACIOLLI, Debora. Produção de biogás através do processo de digestão anaeróbica utilizando dejetos de aves de postura com suplementação da glicerina bruta. 2012. Monografia (Engenharia Ambiental) - Centro Universitario UNIVATES. Lajedo, PE, 2012.

MAYER, Mateus Cunha. Estudo da Influência de Diferentes Inóculos no Tratamento Anaeróbio de Resíduos Sólidos Orgânicos. 2013. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental) - Centro De Ciências E Tecnologia Na Universidade Estadual Da Paraíba. Campina Grande-PB, 2013.

NAYONO, S. E. Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production. KIT scientific Publishing, 2010.

OLIVEIRA, Genilda Maria de. Processo anammox na remoção de nitrogênio de águas residuárias - Avaliação de sistemas em escala de bancada. xxix, 208p., 210 x 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2015). Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

PAVI, SUELEN. Produção de biogás a partir da co-digestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e resíduos de hortifrutigranjeiros. 2016.

Plano de Logística Sustentável da Universidade de Brasília. Disponível em <<https://www.noticias.unb.br/images/20180606PLSVersaoFinal.pdf>>.2018.

Qiao, W., Yan, X., Ye, J., Sun, Y., Wang, W., Zhang, Z. Evaluation of biogas production from different biomass wastes with/without hydrothermal pretreatment. 2011.

REIS, A. S. Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. 2012.

REMPEL, N. Biodigestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos consorciado com glicerina. 103f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS. 2014.

Resolução ANP nº8/2015. Agência Nacional do Petróleo, gás natural e biocompostíveis. Disponível em <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2015/janeiro&item=ranp-8--2015>>

SALES, Gizene L. P. de. Diagnóstico da geração de resíduos sólidos em restaurantes públicos populares do município do Rio de Janeiro: Contribuição para minimização de desperdícios. 2009. 140 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Nutrição, 2009. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/cp093589.pdf>>. Acesso em 13 de Maio de 2017.

SANTOS, Átila Caldas. Estimativa da geração de metano no aterro Sanitário Metropolitano Centro, Salvador-Ba. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental Urbana) Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2012.

SCHULZ, F. Biodigestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. 110 f. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, RS. 2015.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS. Primeiro passo: Cozinha Industrial. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <[http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/bds.nsf/9D3E3DE9452C3F32832578A3004CE035/\\$File/Cozinha%20Industrial.pdf](http://www.biblioteca.sebrae.com.br/bds/bds.nsf/9D3E3DE9452C3F32832578A3004CE035/$File/Cozinha%20Industrial.pdf)>. Acesso em 25 de Maio de 2017.

SILVEIRA, B. et al. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás; Ministério das Cidades, Brasil. p.183, 2015.

SILVA, C.C. (2016). Proposta de Biodigestor Anaeróbico para a Co-digestão dos Lodos Gerados na ETE Brasília Norte e a Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos. Monografia de Projeto Final, Publicação G.PF-002/16, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88 p.

SUNEETHI, S.; Joseph, K. (2011). “Batch culture enrichment of anammox populations from anaerobic and aerobic seed cultures”.

TUOMELA, M. et al. Biodegradation of lignin in a compost environment: a review. Bioresource Technology, Amsterdam, 2000.

VANDEVIVERE, P.; DE BAERE, L.; VERSTRAETE, W. Types of anaerobic digesters for solid wastes. In: MATA-ALVAREZ, J. (Org.). Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. IWA Publishing, 336 p. 2002.

VANDEVIVERE, P.; DE BAERE, L.; VERSTRAETE, W. Types of anaerobic digesters for solid wastes. In: MATA-ALVAREZ, J. (Org.). Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes. IWA Publishing, 336 p. 2002.

VENZKE, Cláudio S. A geração de resíduos em restaurantes analisada sob a ótica da produção mais limpa. In: XXI Encontro Nacional de Engenharia da Produção, 2001, Salvador, BA. Anais do XXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção. Salvador: 2001.

WANG, X.; YANG, G.; FENG, Y.; REN, G.; HAN, X. Optimizing feeding composition and carbon– nitrogen ratios for improved methane yield during anaerobic codigestion of dairy, chicken manure and wheat straw. Bioresour Technol120:78–83. 2012.

ZANETTE, P. H.O. Compostagem dos Resíduos Orgânicos do Restaurante Universitário do Campus 2 da USP São Carlos - Balanço do Funcionamento inicial e propostas de melhorias. Trabalho de graduação - Escola de Engenharia de São Carlos, USP São Carlos, 2015.

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

ANEXO 1

Caracterização gravimétrica da fração orgânica dos resíduos sólidos do restaurante universitário da Universidade de Brasília							
NOME:							
DATA:		HORÁRIO ENTRADA:			HORÁRIO SAÍDA:		
COZINHA / PREPARAÇÃO				REFEITÓRIOS / CUBAS			
Saco nº	Massa (Kg)	Saco nº	Massa (Kg)	Saco nº	Massa (Kg)	Saco nº	Massa (Kg)
1		51		1		51	
2		52		2		52	
3		53		3		53	
4		54		4		54	
5		55		5		55	
6		56		6		56	
7		57		7		57	
8		58		8		58	
9		59		9		59	
10		60		10		60	
11		61		11		61	
12		62		12		62	
13		63		13		63	
14		64		14		64	
15		65		15		65	
16		66		16		66	
17		67		17		67	
18		68		18		68	
19		69		19		69	
20		70		20		70	
21		71		21		71	
22		72		22		72	
23		73		23		73	
24		74		24		74	
25		75		25		75	
26		76		26		76	
27		77		27		77	
28		78		28		78	
29		79		29		79	
30		80		30		80	
31		81		31		81	
32		82		32		82	
33		83		33		83	
34		84		34		84	
35		85		35		85	