Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Química

Coordenação de Graduação

Trabalho de Conclusão de Curso

Geração e aplicações de biogás a partir de resíduos orgânicos residenciais

Aluno e RA:

Felipe Handy Calloni 146023

Supervisor:

Prof. Dr. Ambrósio F. de Almeida Neto

Campinas, SP

07 de agosto de 2020

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiro a minha família por todo apoio emocional, estrutural e educacional que me sempre foi fornecido, num país como o Brasil, devo reconhecer que sou uma pessoa privilegiada por tudo a que tive direito. Agradeço a meu irmão Bruno, por sempre me lembrar o quanto é importante cuidarmos das pessoas próximas a nós, minha mãe Moira e pai Alessandro, por sempre serem exemplos de pessoas quanto a moral e ética, pela educação que me foi passada, pela dedicação a cuidar da nossa família e por todo carinho e amor que nos passaram. Também agradeço a Guta e Bella pela união e amor que trouxeram a nossa família, nos mostrando o quão importante é estarmos próximos uns dos outros e quão confortante é essa proximidade. A minha namorada Camila, a qual sempre fez questão de me ajudar a manter a cabeça erguida e levantar de todas quedas que tive ao longo do meu caminho, além de compartilhar de inúmeros momentos de crescimento pessoal e profissional comigo.

Agradeço aos meus amigos que me ajudaram a crescer e sempre almejar ser uma pessoa melhor desde a infância, como Bruna, Giovanni, Roberto e Vitor. Aos que me ajudaram a crescer como profissional e cidadão dentro da Universidade, como André, Danilo, Léa, Pedro, Rodrigo e Thalles. Aos que dividiram um teto comigo nesses tantos anos morando longe da família, ajudando a enfrentar diversos obstáculos que aparecem no caminho e ajudando a continuar sempre, como Alexandre, Rodolfo, e todos os moradores da República URSSO, incluindo Hinata e Thor que me ajudaram a ver o quão importante é ter paciência, amor e cuidado com o nosso lar, mesmo que seja temporário.

Agradeço aos inúmeros professores, técnicos, seguranças, manutentores e demais funcionários da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP e da universidade em si de uma maneira geral, os quais mesmo tendo o privilégio de lecionar, trabalhar e pesquisar numa universidade com estrutura de primeiro mundo em inúmeros aspectos, estão num país que não dá o valor digno que a educação merece. Vocês são heróis e nós alunos temos o dever de defender o seu trabalho pelo mundo afora.

Muito obrigado a todos pela ajuda no meu desenvolvimento pessoal e profissional, serei eternamente grato.

RESUMO

O crescimento da população urbana e desenvolvimento de metrópoles limita o espaço para descarte adequado de lixo oriundo de centros urbanos populosos. A cidade de São Paulo em 2019 possuía 12,25 milhões de habitantes e destinava cerca de 20 mil toneladas de resíduos diariamente aos aterros da Grande São Paulo, destes, 12 mil toneladas são provenientes dos resíduos domiciliares. Estes resíduos possuem quase que 50% em matéria orgânica, assim, cada cidadão produz 0,459 kg de fração orgânica de resíduos sólidos urbanos diariamente. Há a necessidade urgente de tratamentos alternativos para a diminuição dos Resíduos Sólidos Urbanos. A cidade detém cerca de 1,5 milhão de apartamentos residenciais, o que indica uma grande quantidade de pessoas dividindo o fornecimento de água, luz e gás, além da geração conjunta de um grande montante de resíduos. Utilizando um edifício residencial médio como amostra para o trabalho, há cerca de 78 apartamentos com 205 moradores ao todo e uma quantidade de 200,490 kg por dia de resíduos e uma fração orgânica destes de 100,245 kg por dia. Visando a redução dos resíduos existe a biodigestão anaeróbia como opção, esta permite uma redução do que é destinado a aterros e permite um reaproveitamento energético destes. Um dos produtos oriundos da biodigestão é o biogás, este é composto por uma mistura de gases como CH_4, CO_2 e outros e possui um potencial calorífico que depende da sua composição, com grande participação do metano. O CH_4 chega a concentrações entre 50 a 80% no biogás e tem poder calorífico de 8500 kcal/m^3. No estudo deste trabalho, o sistema elaborado trata os resíduos orgânicos utilizando um reator CSTR de 14m^3, o qual permite manter os parâmetros de operação de forma mais adequada a biodigestão, e tempo de retenção hidráulica de 26 dias, o que respeita o tempo de consumo adequada do substrato por parte dos microrganismos. O sistema permite obter cerca de 16,6 m^3 diários de biogás com 59% de gás metano e poder calorífico de, aproximadamente, 5374 kcal/m^3. Ao final, o sistema proposto consegue reduzir pela metade a produção de resíduos sólidos urbanos do edifício, mesmo desconsiderando a coleta seletiva de materiais recicláveis e fornece combustível para alimentação de aquecimento da água, seja para banho ou da piscina.

Lista de Ilustrações

Figura 1 – Infográfico do destino diário do lixo da capital paulistana.....11
Figura 2 – Imagem do Aterro de Osasco.....13
Figura 3 – Sequências das rotas metabólicas e grupos microbianos ativos em cada etapa da digestão anaeróbia.....21
Figura 4 – Modelo Chinês de biodigestor.....25
Figura 5 – Representação do biodigestor no Modelo Canadense.....26
Figura 6 – Relação entre a carga orgânica volumétrica e o tempo de retenção hidráulica para diferentes concentrações de substrato.....27
Figura 7 – Representação do tipo de lona para armazenagem do Biogás.....28
Figura 8 – Escalonamento da aplicação do Biogás junto da purificação.....34
Figura 9 – Fluxograma do processo de Biodigestão da FORSU.....45

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Comparação do crescimento populacional e físico do município de São Paulo ao longo das décadas e a densidade populacional resultante. 9
Tabela 2 – Composição do biogás, ou Gasolixo, oriundo de aterros sanitários 14
Tabela 3 – Composição do biogás produzido em Digestores Anaeróbicos 15
Tabela 4 – Influência da composição no poder calorífico do biogás.....15
Tabela 5 – Propriedades físicas do CH_4 e CO_2 18
Tabela 6 – Composição típica de biogás a partir de alguns processos anaeróbios.....19
Tabela 7 – Comparativo entre outros combustíveis e seus volumes equivalentes 1m³ de biogás.....19
Tabela 8 – Valores característicos e parâmetros operacionais de gasômetros de biogás externos.....29
Tabela 9 – Caracterização química do resíduos sólidos urbanos.....31
Tabela 10 - Caracterização elementar típica dos resíduos urbanos 31
Tabela 11 – Exemplos de desvios usuais para correlacionar com as palavras guias no método HAZOP 40

Lista de Abreviaturas

ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CNTP	Condições normais de Temperatura e Pressão
CSTR	Ccontinuous Stirred-Tank Reactor
FORSU	Fração Orgância de Resíduos Sólidos Urbanos
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GN	Gás Natural
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS 1

RESUMO 2

Lista de Ilustrações 3

Lista de Tabelas 4

Lista de Abreviaturas 5

1. INTRODUÇÃO 8

2. OBJETIVO 16

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17

3.1 Introdução ao Biogás 17

3.2 Biogás 18

3.3 Processo de formação do gás 19

3.3.1 Hidrólise 21

3.3.2 Acidogênese 21

3.3.3 Acetogênese 22

3.3.4 Metanogênese 22

3.4 Influências 22

3.5 Equipamentos 23

3.6 Substrato 29

3.6.1 Substrato – Lixo 30

3.6.2 Preparação do Substrato 32

3.7 Purificação 33

3.8 Aplicações 33

3.9 Biofertilizante 34

4. METODOLOGIA 35

4.1 Potencial de produção de metano e biogás 35
4.2 Proposta para preparação do substrato 36
4.3 Tempo de Retenção Hidráulica 38
4.4 Proposta para purificação do biogás 39
4.5 Estudo de Risco e Operabilidade 39
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO 40
5.1 Cálculo da quantidade de lixo gerada por edifício 41
5.2 Cálculo da produção de Metano e biogás 41
5.3 Cálculo do volume de água para adição 42
5.4 Questões para definição do Volume do Reator 42
5.5 Cálculo do Tempo de Retenção Hidráulica 43
5.6 Sugestão para armazenamento do biogás 44
5.7 Sugestão de Operação da planta 44
5.8 Aplicação do método HAZOP 45
5.9 Sugestões para aplicação do biogás 47
5.9.1 Aquecedor de água a biogás 47
5.9.2 Fogões a biogás 47
6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES 48
7. BIBLIOGRAFIA 50

1. INTRODUÇÃO

O crescimento desordenado dos centros urbanos acarreta diversos problemas à população local, como o acesso a diversos serviços, por exemplo: transporte, saneamento, saúde, segurança, fornecimento de alimentos, tratamento dos resíduos sólidos e controle da poluição gerada. Dentre os problemas levantados, os resíduos sólidos necessitam de um destino adequado para a diminuição dos impactos ambientais causados por eles. Os resíduos podem ser divididos em 5 grupos, de acordo com a ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária, são eles Grupo A, “engloba os componentes com possível presença de agentes biológicos que, por suas características de maior virulência ou concentração, podem apresentar risco de infecção”; Grupo B, “contém substâncias químicas que podem apresentar risco à saúde pública ou ao meio ambiente, dependendo de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade e toxicidade”; Grupo C, “quaisquer materiais resultantes de atividades humanas que contenham radionuclídeos em quantidades superiores aos limites de eliminação especificados nas normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear”; Grupo D, “não apresentam risco biológico, químico ou radiológico à saúde ou ao meio ambiente, podendo ser equiparados aos resíduos domiciliares”; e Grupo E, “materiais perfuro-cortantes ou escarificantes”. Tal trabalho visa discutir com relação ao Grupo D, os quais são a maior parte do lixo que o cidadão comum descarta.

A cidade de São Paulo é um dos centros urbanos mais importantes do Brasil, tanto economicamente, quanto socialmente. O município de São Paulo é o que detém o maior PIB do Brasil, com R$ 699,3 bilhões, em segundo lugar está o município do Rio de Janeiro com R$ 337,6 bilhões de acordo com levantamento de 2017 feito pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Quanto a população, São Paulo também detém a maior população da federação, sendo de 12252023 habitantes, com o segundo município mais populoso também sendo o Rio de Janeiro com 6178903 habitantes, de acordo com as estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação com data de referência em 1º de julho de 2019 pelo IBGE. Assim, o município de São Paulo será o local do estudo deste trabalho. Tal cidade é ainda uma das com maior índice de custo de vida do país, a qual é calculada com base em uma cesta de produtos e serviços definidos

pela Pesquisa de Orçamentos Familiares do IBGE, a qual “avalia as estruturas de consumo, de gastos, de rendimentos e parte da variação patrimonial das famílias, oferecendo um perfil das condições de vida da população a partir da análise dos orçamentos domésticos”.

Mesmo com o tamanho da população e o alto custo de vida, a cidade de São Paulo ainda recebe diversas pessoas que se mudam para o município. Tais pessoas tem diversos motivos para se mudar e entre estes estão a maior oferta de serviços (como saneamento básico, água potável, energia elétrica, transporte, saúde e outros), fornecimento de recursos (como alimentos, produtos de higiene, lazer e outros) e maior oferta de oportunidades de emprego, além de oportunidades diferentes de carreiras profissionais do que as encontradas em diversas outras regiões.

Assim, o crescimento da cidade de São Paulo e a sua densidade populacional desde a década de 1950 podem ser vistas de acordo com a Tabela 1, a qual mostra a evolução ao longo dos anos. Como pode ser observado, a taxa de crescimento populacional da cidade caiu e a população cresce cada vez menos desde a data de início dos dados, porém para uma cidade com uma densidade populacional cada vez maior, o aumento da população provoca cada vez mais dificuldades em atender as necessidades da população.

Tabela 1 – Comparação do crescimento populacional e físico do município de São Paulo ao longo das décadas e a densidade populacional resultante.

Ano	Número de habitantes	Área (km^2)	Densidade (hab/km^2)
1950	2198096	1624	1354
1960	3666701	1587	2310
1970	5924615	1509	3926
1980	8493226	1509	5628
1991	9646185	1509	6392
2000	10434252	1509	6915
2010	11253503	1509	7458
2019	12252023	1509	8119

(Fonte: Dados obtidos do site da prefeitura de São Paulo)

Este trabalho irá estudar os chamados resíduos domiciliares da cidade de São Paulo buscando uma forma de tratamento a eles que correlaciona o combate aos impactos ambientais e a diminuição do custo de vida da população. De acordo com uma reportagem do Bom Dia SP (programa de televisão matinal da Região Metropolitana de São Paulo da Rede Globo de Televisão) em abril de 2019 (BARBORA, 2019), o lixo na cidade de São Paulo possui um volume diário médio de 20 mil toneladas/dia e pode ser visto melhor na Figura 1, junto dos volumes de lixo das outras cidades que compõe a Grande São Paulo, a qual é a concentração urbana em torno da cidade de São Paulo que ao todo possui 21,5 milhões de habitantes de acordo com estimativas do IBGE em 2018. Tal região produzia em média 27 mil toneladas de lixo por dia em 2018, também de acordo com a Figura 1. Todo este volume de rejeito é destinado a aterros sanitários dispostos nos entornos da Grande São Paulo.

Vale destacar que das 20 mil toneladas de lixo diárias da capital paulista, 12 mil toneladas são provenientes de coleta domiciliar e as 8 mil toneladas restantes são resultados das varrições dos garis (funcionários da prefeitura ou terceirizadas que varrem os espaços públicos da cidade diariamente). A logística em torno deste processo exige em torno de 2282 viagens de caminhões de lixo para atender a demanda diária, os quais em cada viagem levam até 12 toneladas de lixo.

De acordo com ZAGO et al. (2019) cerca de 50% do lixo brasileiro é matéria orgânica, composta por restos de alimentos, alimentos fora de condição de consumo e lixo de banheiro. Sobre o último grupo de componentes listado, um dos resíduos está o papel higiênico, o qual compõe o maior volume do item e não é comum de se ver em muitos países fora do Brasil, uma vez que a disposição de tais resíduos é feita pelo próprio encanamento.

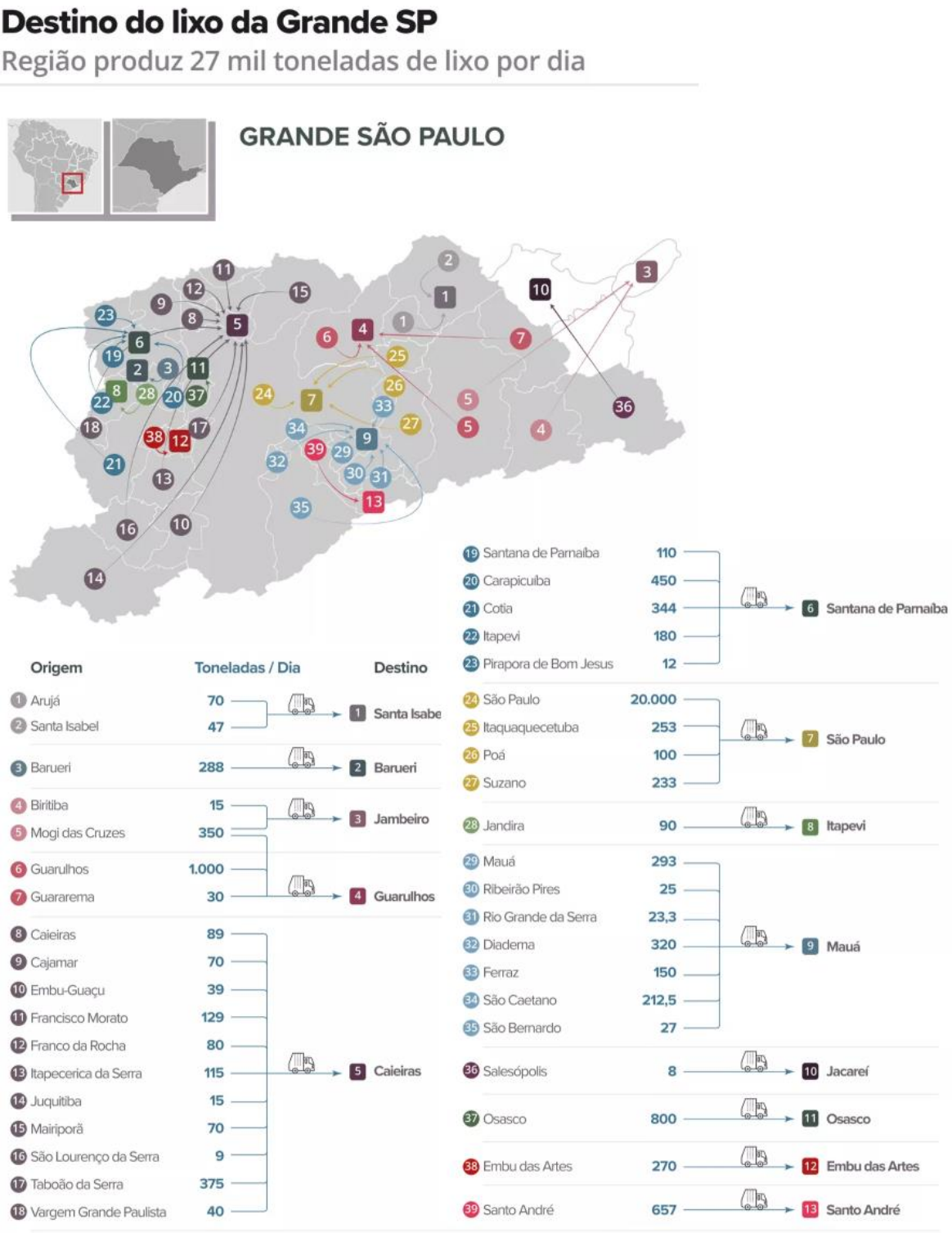

Figura 1 – Infográfico do destino diário do lixo da capital paulistana

Fonte: Adaptado de https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/04/29/cidades-da-grande-sp-produzem-27-mil-toneladas-de-lixo-por-dia-veja-para-onde-vao-os-residuos.ghtml, acessado em 06/05/2020 às 21h15

A partir de tais dados, pode-se calcular a quantidade de matéria orgânica descartada como forma de lixo domiciliar por pessoa diariamente na cidade de São Paulo e, assim, tem-se que cada habitante da capital descarta cerca de 0,489 kg de lixo orgânico por dia.

Como dito, toda esta quantidade de lixo diária, deve ser destinada aos aterros sanitários, pois se tornaram obrigatórios em 2014 com a Lei Federal n° 12.305 de 02 de agosto de 2010 quanto a Política Nacional de Resíduos Sólidos. A norma é aplicável para os responsáveis, direta ou indiretamente, pela geração de resíduos sólidos e para quem desenvolva ações relacionadas à sua gestão integrada ou ao seu gerenciamento. Tal lei tem o objetivo de acabar com a deposição dos resíduos sólidos urbanos – RSU – em lixões, os quais não respeitam as exigências ambientais necessárias quanto aos resíduos e suas implicações ambientais.

A quantidade de resíduos oriundos das cidades da Grande São Paulo é muito grande, o que vale destacar que os aterros sanitários possuem vida útil de operação. Por exemplo, na reportagem do infográfico, é dito que o Aterro Municipal de Osasco funcionaria *“por mais 6 meses em total segurança e sem oferecer qualquer risco à população. O prazo é mais do que suficiente para a prefeitura formatar o segundo aterro no Jardim Açucará, para o qual já dispõe de todas as licenças. Tão logo comece a operar, o atual será desativado.”* Tal aterro está representado na Figura 2, o qual recebia cerca de 800 mil toneladas de lixo diariamente, uma vez que a cidade de Osasco era a segunda maior produtora de lixo da Grande São Paulo. O que reflete a importância da diminuição da quantidade de material direcionado aos aterros, uma vez que um aterro sanitário ocupa uma grande área e tem diversas exigências ambientais, como será discutido a seguir.

Figura 2 – Imagem do Aterro de Osasco

Fonte: TV Globo - https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/04/29/cidades-da-grande-sp-produzem-27-mil-toneladas-de-lixo-por-dia-veja-para-onde-vao-os-residuos.ghtml

Para receber a licença ambiental, o empreendimento que administra o aterro sanitário deve atender a diversas exigências. Como cobrir regularmente os resíduos com terra, o que evita a proliferação de insetos e odores, o aterro deve conter uma base capaz de drenar o chorume (líquido oriundo de processos biológicos de decomposição de resíduos orgânicos) que deve ser tratado e destinado no próprio aterro para evitar que o contato com o solo e lençóis freáticos sejam contaminados, deve ter um sistema de drenagem dos gases oriundos da fermentação anaeróbica que ocorre nas camadas internas, o chamado Gasolixo, também conhecido como biogás.

O Gasolixo contém uma mistura de gases que é apresentada na Tabela 2, os quais estão dentre os gases do efeito estufa, além disso, podem promover explosões ao se acumularem em bolsões nas camadas internas do aterro e mau cheiro na região ao entorno. Para amenizar os seus impactos ambientais, o sistema que capta tais gases os queima (na situação mais simples) para transformar o gás metano em água e dióxido de carbono, demonstrado no Esquema de Reação 1, ou até mesmo reutilizar o biogás para geração de eletricidade.

Tabela 2 – Composição do biogás, ou Gasolixo, oriundo de aterros sanitários

Componente	Porcentagem[1]
Metano	45 – 60
Dióxido de Carbono	40 – 60
Nitrogênio	2 – 5
Oxigênio	0,1 – 1,0
Enxofre	0,0 – 1,0
Amônia	0,1 – 1,0
Hidrogênio	0 – 0,2
Monóxido de Carbono	0 – 0,2
Gases em menor concentração	0,01 – 0,6

Fonte: Tchobanoglous et al (1994)

[1] A distribuição percentual exata variará segundo o tempo de uso do aterro

$$CH_{4\,(g)} + O_{2\,(g)} \rightarrow CO_{2\,(g)} + H_2O_{\,(g)} \quad \text{(R.1)}$$

Outro ponto importante da Lei 12.305/10 está no Título II, Capítulo II – Dos Princípios e Objetivos -, o artigo 7º - São objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos: “Inciso XIV – incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético.” Como destacado na lei, há o reaproveitamento energético com o uso do biogás obtido a partir de lixo urbano, de esgoto ou de biomassa (resíduos agrícolas, agroindustriais, da silvicultura, urbanos e óleos vegetais). Assim, em vista do poder agrícola e urbano brasileiro, há um potencial em biomassa e resíduos urbanos gigantesco. O biogás é um gás com potencial energético promissor e dentro da categoria de biocombustível, proveniente de materiais orgânicos (biomassa). O principal constituinte do biogás, o metano é um composto que pode ser obtido de diversas maneiras, da extração de combustível mineral, processo de digestão em animais herbívoros e decomposição de material orgânico.

Esta última origem, é resultado da digestão anaeróbica da matéria orgânica dos resíduos sólidos podendo ser feita em digestores anaeróbicos de maneira controlada pelo ser humano. Essa mistura gasosa oriunda dos biodigestores contém aproximadamente

a composição mostrada na Tabela 3 e esta possui poder energético semelhante ao gás natural. O qual é composto, da mesma maneira que o biogás, majoritariamente por metano, este composto por sua vez é o que possui o maior potencial energético dentre os gases dessa mistura. Assim, o biogás tem um poder calorífico que varia de acordo com a composição da matéria orgânica decomposta, resultando em composições diferentes do biogás, como pode ser visto na Tabela 4 (VIEIRA et al. 2014).

Tabela 3 – Composição do biogás produzido em Digestores Anaeróbicos

Composto	Porcentagem (%)
Metano	55 – 75
Dióxido de Carbono	25 – 50
Hidrogênio	5 – 10
Nitrogênio	1 – 2
Ácido Sulfídrico	Traços
Vapores de Água	Traços

Fonte: Vieira et al. (2014); Maghanaki et al. (2013); Kapdi et al. (2005)

Tabela 4 – Influência da composição no poder calorífico do biogás

Metano (%)	Hidrogênio (%)	Gás Carbônico (%)	Poder Calorífico (Kcal/m^3)
60	10	30	5.374
50	10	40	4.613
45	10	45	4.094
40	10	50	3.333
35	10	55	3.240

Fonte: Vieira et al. (2014); Frare (2006)

O biogás pode ser empregado em diversas situações, como geradores de combustão interna, células combustíveis, aquecimento de água e até mesmo como combustível para veículos. Algumas aplicações dependem de que a mistura do gás passe por um refinamento para aumentar a concentração de metano e aprimorar a queima. Além disto, o subproduto oriundo da biodigestão pode ser empregado como biofertilizante, podendo ser aplicado no meio rural, por exemplo. O que indica uma vasta gama de aplicação na vida urbana.

Ao longo das últimas décadas, OLVEIRA E ROSA (2003) aponta que foi dada uma grande importância a questões como coleta seletiva e reciclagem, devido ao aumento do custo de disposição final dos resíduos. Uma vez que regulamentações sanitárias e ambientais mais rígidas iam sendo implementadas. Criando ordenações quanto a destinação dos resíduos, como redução da geração de resíduos, reutilização, reciclagem, recuperação energética e aterro sanitário ou outro direcionamento final mais adequado para determinado lixo, como disposição final para os materiais em que nenhuma das outras etapas pode ser aplicada. Mesmo que a inserção de tais ideias necessitarem de mudanças comportamentais da população e participação do setor econômico da sociedade, é uma tendência futura a redução dos resíduos e seu reaproveitamento máximo para manter ou recuperar a qualidade de vida urbana, uma vez que esta é a mais afetada devido a sua maior densidade populacional.

Além do reaproveitamento energético ser uma forma de segurança quanto ao abastecimento elétrico urbano, aumenta a vida útil de aterros sanitários e reduz os possíveis riscos ambientais e sanitários ao meio urbano.

2. OBJETIVO

O objetivo deste projeto é apresentar uma proposta de reaproveitamento energético a partir de biogás gerado pela biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos – RSU – gerados por uma amostra da população paulistana, a fim de servir como forma de contorno às dificuldades cada vez maiores enfrentadas pelos centros urbanos e amplificadas pelo tamanho da cidade paulistana, tanto para a cidade, quanto para a população.

Com a cidade de São Paulo continuamente crescendo em população e já possuindo uma grande densidade populacional como mencionado, exige um crescimento vertical constante das moradias nos bairros mais populosos. Dessa forma a cidade é detentora de uma grande quantidade de edifícios residenciais e será tomado um edifício residencial como base para aplicar um biodigestor e discutir suas funcionalidades.

Tais funcionalidades são o modelo de aplicação do biodigestor dentro do dia a dia dos moradores deste condomínio, a redução do lixo enviado a aterros sanitários, geração de biogás a partir dos resíduos domiciliares destes moradores, possíveis aplicações do gás para redução das contas de água e gás de cozinha e aproveitamento dos subprodutos de tal operação.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Introdução ao Biogás

Como dito anteriormente, o biogás é uma mistura gasosa composta principalmente de gás metano produzido a partir da fermentação de resíduos orgânicos em ambiente anaeróbico. O estudo deste gás no Brasil se iniciou na década de 1970 junto da crise do petróleo, a qual desencadeou pesquisas por fontes alternativas de energia no mundo inteiro (NOGUEIRA, 1986). Já na década de 1980, foi implementado o primeiro projeto de biodigestores na região do nordeste brasileiro, mas focado em redução da carga orgânica das atividades rurais em algumas propriedades ao invés da geração de energia (CEMPRE, 2019).

Há a possibilidade de utilizar a compostagem e a digestão anaeróbia para tratamento da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos – FORSU. Dentre estes processos, a digestão é um processo mais atraente e sustentável para o tratamento deste tipo de resíduo, uma vez que permite um reaproveitamento energético além do reaproveitamento como nutriente dos subprodutos da biodigestão. Quanto aos resíduos que não permitem a biodigestão ou compostagem, estes ainda devem ser direcionados aos aterros sanitários.

Como visto no caso da cidade de São Paulo, o potencial energético brasileiro para geração de energia por meio do biogás oriundo de biomassa é muito grande, capaz de abastecer cerca de 24% da demanda nacional de energia elétrica. Contudo esse abastecimento é cerca de 0,05% (SEBRAE, 2018).

3.2 Biogás

A mistura de gases chamada de biogás pode ser obtida a partir da fermentação anaeróbia por bactérias de resíduos orgânicos como as FORSU. Como já dito, a concentração dos gases presentes na composição do biogás é dependente da matéria-prima que sofreu degradação e as condições de operação do processo de digestão. A Tabela 3, contém as variações em porcentagem que a composição desse gás pode ter junto a cada um de seus componentes, já a Tabela 5 contém as propriedades físicas do Metano e Dióxido de Carbono, os quais compõe a maior parte do volume do biogás.

Tabela 5 – Propriedades físicas do CH_4 e CO_2

Característica	CH_4	CO_2
Massa Molecular (kg/mol)	16,04	44,01
Volume Específico (cm^3/g)	1473,3	543,1
Capacidade Calorífica 1atm (kcal/kg°C)	0,775	0,298
Cp/Cv	1,307	1,303
Poder calorífico	13,268	0

Fonte: ROSS et al, 1996

O biogás também pode ser obtido de outras fontes via processos de digestão anaeróbia, os quais podem variar o método do processo ou o substrato. A Tabela 6 contém os dados de 4 diferentes digestões, sendo estes: Reatores de Metanização, tal qual está sendo discutido neste trabalho; Aterros Sanitários, o qual serve como fonte de dados por parte dos substratos para este trabalho; ETE – Estação de Tratamento de Esgoto – anaeróbia, estação de tratamento de esgoto; e Digestores de Lodo. Vale destacar a concentração da produção de gás metano ao utilizar os reatores em comparação com o aterro sanitário, enquanto o primeiro pode alcançar 80% de metano na composição do biogás, o segundo consegue apenas 60%. Além disso, pode-se observar outra vantagem do reatores quanto a quantidade de CO_2 obtida, a partir dos aterros pode chegar a 60%, enquanto nos reatores chega ao máximo a 45%.

Tabela 6 – Composição típica de biogás a partir de alguns processos anaeróbios

Origem do biogás	CH_4 %	CO_2 %	H_2S ppm	H_2 %	N_2 %	O_2 %	CO %	NH_3 %
Reatores de Metanização	50 – 80	20 – 45	20 – 30000	< 1	< 2	< 2	< 0,3	< 0,05
Aterros Sanitários	45 – 60	40 – 60	10 – 200	1 – 4	2 – 5	< 0,8	< 0,2	< 0,03
ETE Anaeróbios	60 – 85	5 – 15	1000 – 2000	1 – 3	10 – 25	< 1	< 0,3	-
Digestor de lodo	65 – 75	20 – 40	Até 1000	< 5	< 2	< 1	< 1	-

Fonte: Adaptado por Ferreira (2015) de RISE-AT (1998); NOYOLA (2006); FRN (2010); LOBATO (2011)

O gás metano tem a sua reação de combustão demonstrada pelo Esquema de Reação 1, sendo uma reação exotérmica liberando 191,7 kcal.mol^{-1}, assim, na CNTP – Condições normais de temperatura e pressão – o CH_4 tem um poder calorífico de 8500 kcal/m³. Quando parte do biogás, o qual é o gás com maior poder calorífico dentro os gases presentes no biogás, de acordo com o Programa de Pesquisas em Saneamento Básico, PROSAB (2003), uma mistura de gases contendo 70% de metano define um poder calorífico de 5587,95 kcal/m³ de biogás, enquanto o gás natural possui 8914,91 kcal/m³ de poder calorífico. Na Tabela 7, apresenta-se um comparativo com outros combustíveis.

Tabela 7 – Comparativo entre outros combustíveis e seus volumes equivalentes 1m³ de biogás

Combustível	Volume equipavalente a 1m³ de biogás a 25°C e 1 atm
Querosene	0,342 L
Lenha (10% de umidade)	1,450 kg
GLP – Gás Liquefeito de Petróleo	0,396 L
Óleo Diesel	0,358 L
Gasolina	0,312 L

Fonte: PROSAB, 2003

3.3 Processo de formação do gás

A geração de biogás é derivada da decomposição de resíduos por um conjunto de bactérias anaeróbias divididas em diversos grupos, cada grupo é responsável por uma das 4 etapas da biodigestão em questão. A matéria orgânica a ser decomposta é formada por moléculas complexas como lipídeos, proteínas, celulose, hemicelulose e outras (MOTTA, 1986), estas são muito complexas para serem digeridas e transformadas em

energia em apenas uma etapa. A cada etapa um grupo de bactérias quebra e simplifica o substrato para ser usada como alimento e na sequência outro grupo se utiliza dos subprodutos, do grupo anterior, para seu proveito próprio. No processo do biodigestor, esses ciclos ocorrem até a formação do biogás e um subproduto final, o qual pode ser utilizado como biofertilizante.

As etapas para a formação do Metano na biodigestão são hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, cada uma delas possui características únicas que favorecem as suas reações e seus microrganismos. Elas podem ser resumidas com as equações 2, 3 e 4, antes de explicadas uma a uma (IGOMI et al., 2006). A quedra destas moléculas orgânicas complexas, como carboidratos, compostos nitrogenados e gorduras, ao simplificar pode ser exposta pela Esquema de Reação 2.

$$C_6H_{12}O_6 + 2H_2O \rightarrow 2C_6H_4O_2 + 2CO_2 + 4H_2 \quad \text{(R.2)}$$

O ácido acético e hidrogênio gerados a partir da Esquema de Reação 2 passam pelos Esquemas de Reação 3 e 4 para geração do Metano.

$$2C_2H_4O_2 \rightarrow 2CH_4 + CO_2 \quad \text{(R.3)}$$

$$4H_2 + 2CO_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \quad \text{(R.4)}$$

Quando as reações dos Esquemas de Reação 2, 3 e 4 são agrupadas, obtém-se a Esquema de Reação 5 para o processo de digestão anaeróbia.

$$\underset{Orgânica}{Matéria} + Água \xrightarrow{Microrganismos\ Anaeróbios} \underset{Células}{Novas} + \underset{as\ células}{Energia\ para} + CH_4 + CO_2 + \underset{produtos}{Outros} \quad \text{(R.5)}$$

Para uma explicação mais detalhada, a Figura 3 detém o fluxograma do processo da quebra das moléculas complexas até a obtenção do metano, além de quais grupos bacterianos atuam em cada etapa. O processo todo ocorre numa faixa de pH entre os valores de 6,0 a 8,5, mas com cada etapa ocorrendo dentro de uma faixa deste intervalo (VIEIRA et al., 2014).

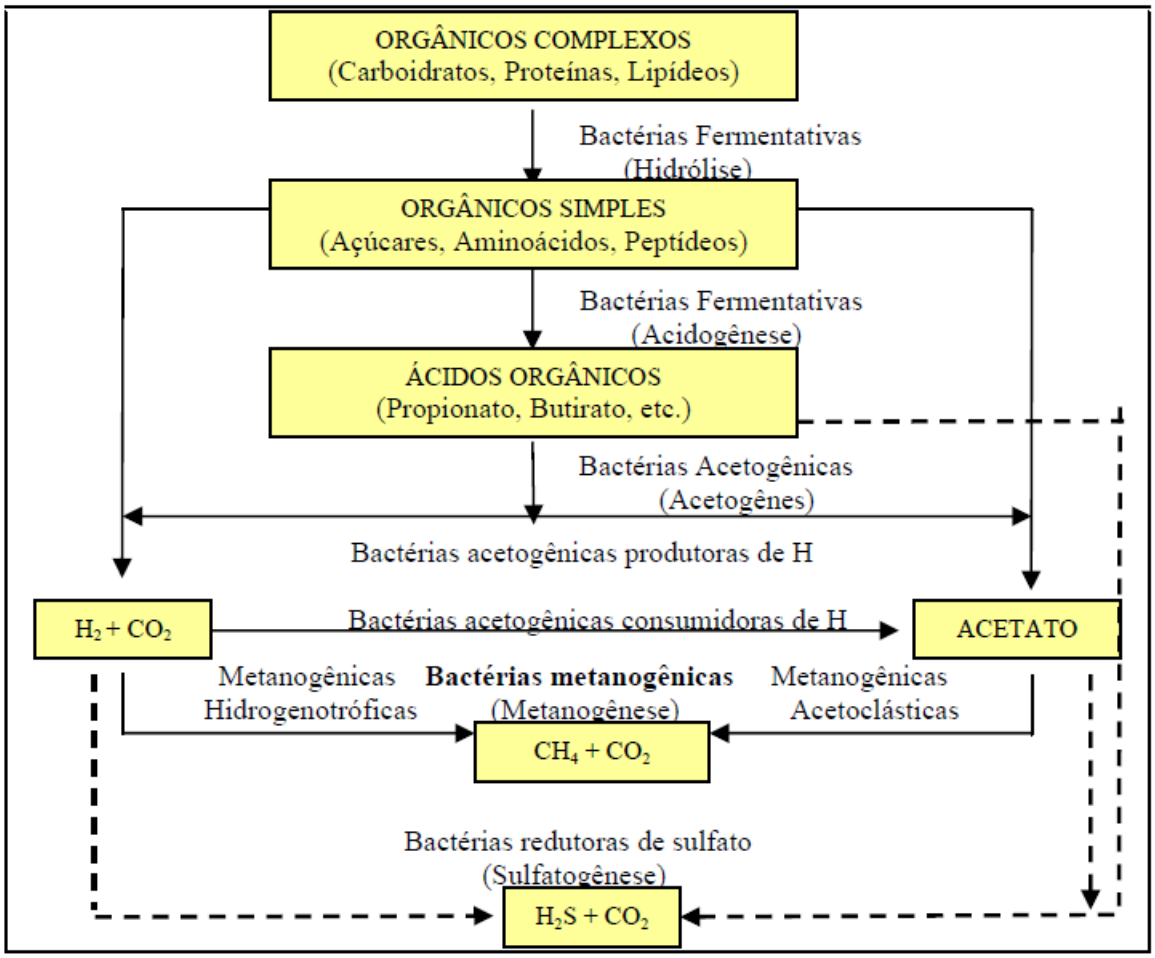

Figura 3 – Sequências das rotas metabólicas e grupos microbianos ativos em cada etapa da digestão anaeróbia

Fonte: CHERNICHARO, 1993 apud MELO, 2003

3.3.1 Hidrólise

A hidrólise é etapa de início do processo, as bactérias fermentativas hidrolíticas convertem os compostos orgânicos mais complexos em moléculas menores, em sequência, esses compostos são quebrados novamente até monômeros simples (METCALF E EDDY, 1991). Para os lipídeos, a conversão ocorre dos ácidos graxos polissacarídeos para monossacarídeos, das proteínas para os aminoácidos e dos carboidratos para os açúcares simples (IGOMI, 2006).

3.3.2 Acidogênese

A acidogênese é etapa de consumo das moléculas de gorduras, aminoácidos e açúcares pelas bactérias acidogênicas, transformando-as em moléculas mais simples

como acetato – CH_3COOH, hidrogênio – H_2, dióxido de carbono – CO_2 – e os ácidos graxos voláteis – propionato e butirato (METCALF E EDDY, 1991). O pH ótimo desta etapa é em torno de 6,0 de acordo com Angelidaki et al. 2003.

3.3.3 Acetogênese

A acetogênese é a etapa de consumo dos ácidos orgânicos produzidos na acidogênese pelas bactérias acetogênicas, tais moléculas são quebradas em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. O pH ótimo desta etapa é em torno de 7,0 com ANGELIDAKI et al. 2003.

3.3.4 Metanogênese

A metanogênese é a fase final com a produção de metano a partir hidrogênio, pelas bactérias metanogênicas hidrogenofílicas e acetato, pelas bactérias metanogênicas acetoclásticas (IGOMI et al., 2006). O pH ótimo desta etapa é em torno de 7,0 com ANGELIDAKI et al. 2003.

Como demonstrado ao final do fluxograma da Figura 3, há ainda as bactérias redutoras de sulfatos, produzindo o H_2S e CO_2.

3.4 Influências

Os processos de tratamentos anaeróbios podem ser influenciados por diversos elementos, dentre eles o pH, temperatura, teor de água e nutrientes do sistema. Quanto ao pH, como já mencionado, cada microrganismo e etapa de produção do gás tem o seu ideal. Podendo decair o rendimento de uma determinada etapa ou até mesmo promover a continuidade de uma etapa anterior levando o sistema ao desequilíbrio.

Quanto a temperatura, a faixa de operação do sistema pode ser de 35 a 45°C ou até mesmo 50 a 60°C, desde que não ocorram variações bruscas na temperatura. Tal impossibilidade de variações bruscas da temperatura se deve às bactérias metanogênicas, as quais são sensíveis a temperatura e não suportariam uma variação dessas (BARRERA, 2003). Dentre estas duas faixas de operação, a menor operaria com bactérias metanogênicas mesofílicas e a faixa de temperatura mais elevada com as bactérias metanogênicas termofílicas.

Ainda quanto estas duas faixas de temperatura, a velocidade de digestão anaeróbica aumenta com junto do aumento da temperatura. Assim, as bactérias termofílicas produziriam uma quantidade maior de gás metano. Contudo, há os custos para aquecimento e manutenção da temperatura no reator, sendo necessário avaliar qual o cenário mais adequado para geração do gás.

O teor de água ou teor de sólidos depende do digestor e sistema de alimentação a ser utilizado, uma vez que há digestores que operam com baixos teores de sólidos, menores ou iguais a 15%, e outros com alto teor, maiores que 20%. Os altos teores exigem maior quantidade de energia para manutenção do sistema, enquanto os com menores teores podem utilizar bombas para transporte do material. Também há o tamanho das partículas do sistema, quanto menores, maior a área superficial que o substrato oferece para os microrganismos e maior a eficiência do sistema. O que também afeta a utilização da bomba, afetando a eficiência da circulação da mistura. Ao final, quanto mais facilitada a circulação da mistura dentro do reator, maior quantidade de contatos entre as bactérias e substratos, aumentando ainda mais a eficiência (VIEIRA et al., 2014).

Outros pontos que influenciam os processos anaeróbios são os compostos inibitórios ou tóxicos, os quais promovem um desequilíbrio das reações do sistema. Por exemplo, a amônia, antibióticos e metais pesados são tóxicos para muitos microrganismos. A amônia está presente em excremento de animais, por exemplo, os quais podem ser utilizados como substrato ou co-substrato nos digestores. Tal composto é obtido a partir da degradação de proteínas e ureia, promovendo inibição a partir da amônia livre, a qual resulta no acúmulo de ácidos graxos voláteis e abaixa o pH do sistema (VIEIRA et al., 2014).

3.5 Equipamentos

Os biodigestores são equipamentos fechado e impermeáveis aptos a fornecer e manter a mistura de substratos e microrganismos responsáveis pela digestão anaeróbia. Tal digestão ocorre dentro de um tempo de retenção específico para o conjunto composto por reator, substrato, bactérias e volume de cada um dos componentes. É composto por uma câmara a qual diminui ou inibe o contato da mistura com o ar, a qual pode ser uma

estrutura cilíndrica, vertical, horizontal, ter ou não uma campânula para acúmulo do gás (PINTO, 2008).

A escolha do biodigestor adequado é dependente de uma série de fatores, como pelo tipo de substrato, volume de efluente e tempo de residência. Historicamente, três modelos de biodigestores foram muito utilizados, o modelo chinês e indiano, representados na Figura 4, e o modelo Canadense ou da Marinha, representado pela Figura 5. O modelo Indiano possui uma campânula no topo do reator conhecida como gasômetro, a qual armazena o gás produzido, e possui uma parede dentro do seu interior, a qual divide o tanque de fermentação em duas câmaras para permitir uma melhor fermentação das etapas (FRIGO et al. 2015). O volume de gás produzido não é consumido constantemente, então há uma manutenção da pressão constante do interior do reator ao deslocar verticalmente a campânula armazenadora de gás (DEGANUTTI et al, 2002). Sua alimentação possui uma concentração de sólidos inferior ou igual a 8% para que não ocorra entupimentos quanto a tubulação do sistema e haja uma eficiência mínima de e é baseada em dejetos de animais de maneira contínua (TARRENTO, 2006).

Já o modelo Chinês é construído em alvenaria e impermeabilizado numa câmara cilíndrica sem campânula, mas com o teto em formato de abóboda. Da mesma maneira que o modelo anterior, não há consumo imediato do biogás formado, porém nesse modelo há um aumento da pressão. Tal aumento funciona semelhante a uma prensa promovendo deslocamento do afluente para a câmara de saída (DEGANUTTI et al., 2002).

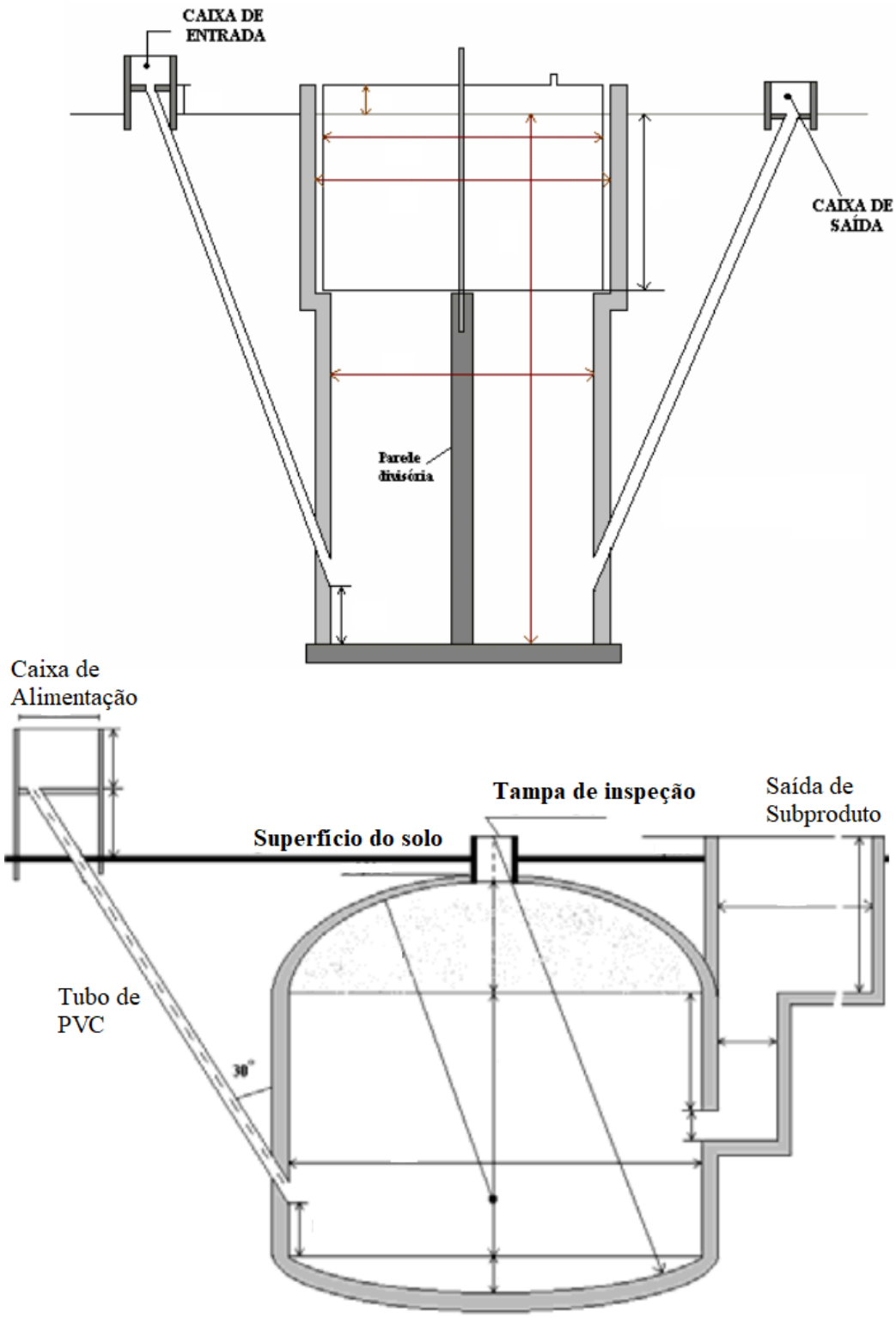

Figura 4 – Modelo Indiano, a esquerda, e Chinês, a direita, de biodigestores

Fonte: adaptado de DEGANUTTI et al., 2002.

Por fim, o modelo Canadense, também chamado de modelo da Marinha, é montado de maneira horizontal com as dimensões de largura maiores do que a profundidade. Assim, há uma maior área superficial para entrar em contato com o calor fornecido pelo sol, aumentando a produção de biogás e diminuindo a ocorrência de entupimentos (FRIGO et al., 2008).

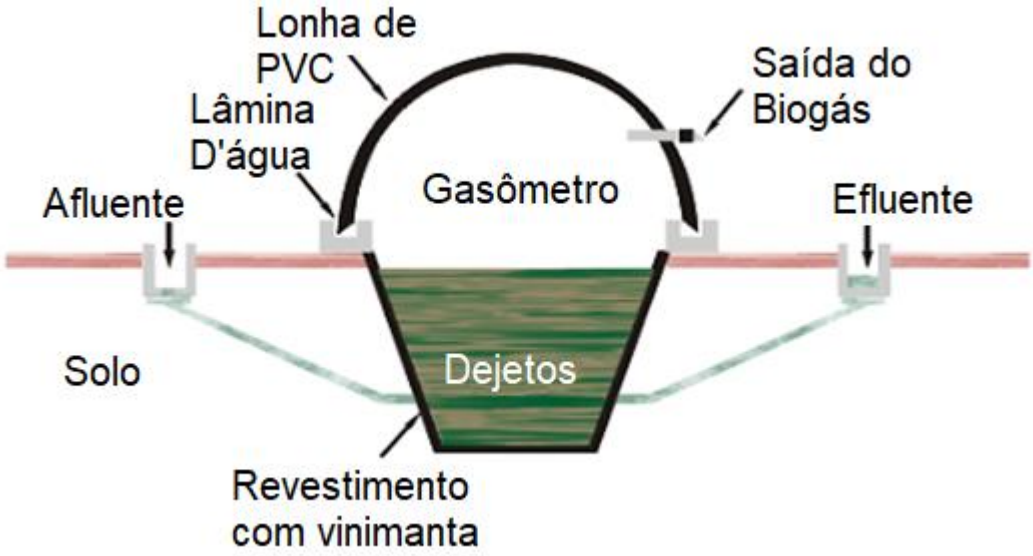

Figura 5 – Representação do biodigestor no Modelo Canadense

Fonte: Adaptado de DEGANUTTI et al. (2002).

Os resíduos sólidos urbanos são um resíduo com alta concentração de sólidos, assim, são digeridos em reatores que se adaptam bem a estas características, porém há outras opções como diluir o substrato a fim de um sistema de abastecimento contínuo como os reatores CSTR – continuous stirred-tank reactor. O substrato deve passar por um pré-tratamento onde deverá ser triturado e diluído a concentrações para atingir os níveis de operação do reator CSTR (IGONI et al., 2008). Tendo em vista que o reator CSTR é continuamente agitado, caso a mistura atenda ao nível de diluição necessário, pode-se considerar a mistura como homogênea. Tal homogeneidade e agitação aumentará a eficiência do sistema uma vez que aumentará a circulação e contato entre substratos e microrganismos. O regime contínuo de operação permite atender a uma demanda constante de redução de resíduos e geração de gás, uma vez que o armazenamento de resíduos orgânicos promove mau cheiro e aglomeração de animais

indesejados e o consumo de gás é contínuo por parte das residências (VIEIRA et al., 2014).

Quanto a quantidade de estágios necessárias para a operação, pode haver um único ou múltiplos, sendo o uso mais comum com um único estágio. Assim, todas as reações ocorrem no mesmo espaço, o que favorece os custos de construção, manutenção e uso do sistema. Contudo, ocorre um menor controle quanto as reações que ocorrem (VIEIRA et al., 2014).

O tempo de retenção hidráulico é o parâmetro utilizado para expressar a velocidade do processo de digestão. Como ocorre uma grande variação da concentração de matéria orgânica, a carga orgânica pode ser um parâmetro para medição da velocidade, uma vez que está diretamente ligada ao tempo de retenção hidráulico. Com variações de 1g até 10g de sólidos voláteis por litro de reator ao dia (SOUZA, 1984). No geral, o tempo de retenção hidráulica para digestores com baixa carga de matéria orgânica como efluente variam de 20 a 40 dias, enquanto os digestores de alta carga variam de 10 a 20 dias. A Figura 6 ajuda a elucidar sobre a relação do tempo de retenção hidráulica e a carga orgânica volumétrica adicionada ao reator diariamente.

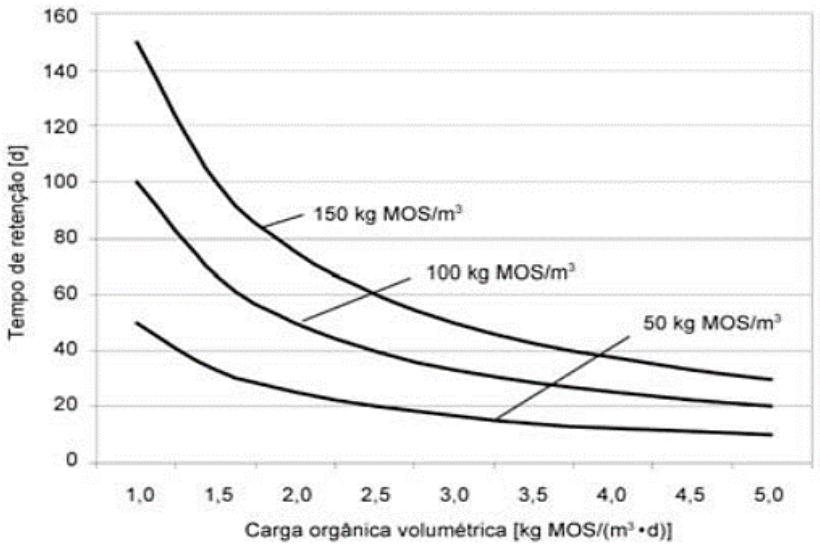

Figura 6 – Relação entre a carga orgânica volumétrica e o tempo de retenção hidráulica para diferentes concentrações de substrato.

Fonte: FNR, 2010.

Como a geração de biogás apresenta variações, uma vez que depende de tantos fatores, há a necessidade de armazenagem do biogás de maneira adequada e segura. Os tanques de armazenamento devem ser impermeáveis a gases e resistentes à pressão, temperatura e às substâncias que entrará em contato. Além de ter equipamentos que assegurem o equipamento quanto a situações de sobrepressão e subpressão (FNR, 2010). Os tanques armazenadores podem ser de baixa, média e alta pressão, sendo o mais comum o de baixa pressão. Tal tanque opera a pressões entre 50 a 3000 Pa, são equipados com lonas impermeáveis. Assim, tais lonas podem ser equipadas, como mostrado na Figura 7, integradas aos biodigestores na parte superior, a esquerda da Figura 7, ou instaladas externamente como um depósito à parte, à direita da Figura 7 (FNR, 2010). A Tabela 8 contém valores e parâmetros quanto aos depósitos de gás externos para elucidar melhor as suas características.

Figura 7 – Representação do tipo de lona para armazenagem do biogás.

Fonte: modificado de FNR, 2010.

Tabela 8 – Valores característicos e parâmetros operacionais de gasômetros de biogás externos.

Característica	Valores ou parâmetros
Valores característicos	Volume de operação: até 2000 m³ Pressão de atuação: 50 – 3000 Pa Permeabilidade da lona: 1 – 5% de perda de biogás ao dia Materiais possíveis: PVC (menos durável), borracha butílica, liga de polietileno e polipropileno
Aplicação	Qualquer usina de biogás
Vantagens	Maior concentração de metano no biogás em formação pode ser medida no gasômetro e reflete a atividade dos microrganismos
Desvantagens	Exigem espaço extra Podem exigir uma edificação adicional
Particularidades	Uso de pesos permite aumentar a pressão para transporte do gás Quando instalados em edifícios, assegurar a boa ventilação do local para evitar misturas de gás explosivas Potência do compressor para abastecimento do queimador pode ser ajustada conforme o nível de enchimento
Formas Construtivas	Balão de PVC abrigado em edifício separado ou tanque Balão de PVC em teto intermediário acima do biodigestor Armazém com lona de membrana dupla
Manutenção	Praticamente livre de manutenção

Fonte: modificado de FNR, 2010.

3.6 Substrato

Tanto a composição, quanto o rendimento de metano no biogás dependem diretamente da composição do substrato e co-substrato na digestão anaeróbia. Uma vez que afeta diretamente as eficiências das reações de cada etapa do processo de metanização. Assim, sendo necessária a caracterização da matéria orgânica a ser inserida no reator quanto a teores de carboidratos, proteínas, gorduras, teor de sólidos, concentração de inibidores e a relação Carbono/Nitrogênio. As misturas de substratos a serem utilizadas possuem um vasto potencial metanogênico entre 170 a 740 L de CH_4/kg de matéria orgânica (VIEIRA et al. 2014).

A razão carbono/nitrogênio é muito importante para o substrato, necessitando estar dentre 16:1 a 25:1. Caso tal razão esteja alta, a fase metanogênica consumirá rapidamente o nitrogênio da mistura, o que produzirá um baixo volume de gás metano. Enquanto uma baixa razão promove um acúmulo de amônia, a qual é tóxica para o sistema, como visto anteriormente (ANASTÁCIO, 2010). Há, também, outra razão a se observar, a razão carbono/nitrogênio/fósforo/enxofre, a qual deve estar entre 500-1000:15-20:5:3 (VIEIRA et al. 2014).

A concentração de sólidos voláteis presentes no substrato é um dos itens utilizados para avaliação das capacidades de geração de biogás, uma vez que é relacionado à fração biodegradável do material que adentra o reator (PALHARES, 2014).

O último fator a ser mencionado é o tamanho das partículas do lixo. Enquanto o lixo manter o seu tamanho original, levará mais tempo para as reações bioquímicas digerirem o material, aumentando o tempo necessário para o crescimento dos microrganismos responsáveis pela digestão (HOBSON et al, 1981). Quanto menor as partículas, maior a área superficial e, assim, mais eficientes serão as reações de digestão da FORSU.

3.6.1 Substrato – Lixo

A digestão anaeróbica da fração orgânica do resíduo sólido municipal vem sendo amplamente utilizada na Europa nas últimas décadas (DE BAERE, 2006). Alguns destes fatores que tem incentivado a implementação são: aumento da legislação ambiental europeia quanto a limitação de deposição de lixo biodegradável em aterros sanitários, o que é uma tendência para os países desenvolvidos; incremento na coleta seletiva e diversificação da matriz energética nacional, utilizando a FORSU como possível fonte de energia.

Alguns pontos que incentivam a utilização da FORSU são o alto teor de umidade, alto teor de matéria orgânica biodegradável, grande variedade de micro e macronutrientes. Como dito no tópico 3.6, a composição do substrato é um fator predominante na quantidade e qualidade de biogás gerado. A quantidade de compostos mais facilmente biodegradáveis, como lipídeos, carboidratos e proteínas, significa maior

quantidade de substrato a disposição das bactérias. A composição e quantidade do lixo depende de questões culturais, financeiras, climáticas e outros fatores (FARIA, 2002). Uma vez que diferentes culturas se utilizam de diferentes insumos agrícolas para suas dietas, o poder aquisitivo aumenta o acesso a produtos industrializados e o clima direciona o quão calórico os alimentos devem ser. A Tabela 9 contém a composição do RSU com relação aos compostos mais facilmente biodegradáveis e levantados por três estudos diferentes, mencionados junto aos dados.

Tabela 9 – Caracterização química do resíduos sólidos urbanos

Compostos	Percentual do peso seco (%), segundo:		
	Pfeffer (1976), Barlaz e Ham (1993) – EUA	Barlez et al. (1989) – EUA	Perez et al. (1992)
Celulose, açúcares e amido	58,0	51,7	32,9
Lignina	11,2	15,2	12,5
Lipídeos	5,7	---	5,9
Proteína	3,4	4,2	9,6

Fonte: adaptado de Maciel (2003)

A composição elementar do substrato também pode ser usada como um ponto de atenção, pois regula a produção de metano no biogás ou a presença inibitória de componentes tóxicos ao sistema. A Tabela 10 contém os dados da composição elementar usual nos RSU com relação aos átomos de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio.

Tabela 10 - Caracterização elementar típica dos resíduos urbanos

Componente	Porcentagem em massa (peso úmido)			
	C	H	O	N
Restos de alimentos	14,44	1,89	11,33	0,78
Papel	40,94	5,65	41,41	0,29
Papelão	41,83	5,67	42,33	0,33
Resíduo de Jardim	18,92	2,34	15,05	1,35
Total	33,00	4,48	32,13	0,57

Fonte: Adaptado de Firmo (2006)

Segundo estudo experimental realizado por Alcântara (2007), após coleta e análise foram obtidas duas umidades da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos do Aterro da Muribeca/PE de uma de 51,9% e outra para 52,4%.

Dois fatores muito importantes para a eficiência da obtenção de biogás a partir do substrato são os Sólidos Totais (ST) e Sólidos Voláteis (SV), os quais são toda a matéria presente no resíduo que não é água e o material carbonáceo que passará pela digestão anaeróbia, podendo ou não ser encontrado no afluente final, respectivamente (MACHADO, 2011). Segundo Angelidaki et al. (2006), para os resíduos sólidos urbanos, foram obtidos os seguintes dados de Sólidos Totais em (% m/m) 30,0 e Sólido Volátil em (% m/m) 24,4.

3.6.2 Preparação do Substrato

A preparação do substrato envolve etapas como trituração, correção de pH e diluição. A trituração do material, pois, como mencionado no tópico 3.5, o tamanho das partículas afeta a eficiência do sistema. Assim, o substrato deve ser triturado a pedaços de tamanho inferior a 3 a 7 cm. Outra vantagem da trituração do material é a compactação da mistura, promovendo uma redução do volume total requerido para a operação do biodigestor (SHARMA et al. 1988) (VIEIRA et al. 2014).

Em seu estudo, Reis (2012), utilizou uma concentração de 10% de Sólidos Totais e identificou uma diminuição no pH do sistema, devido ao aumento da produção de ácidos voláteis, o que diminuiu a produção de metano. Identificando que o ecossistema anaeróbio não estava em equilíbrio de imediato, e nos dias a seguir, ao inserir o substrato. O que indica a importância em muitos casos da aplicação de inóculos juntos das primeiras inserções de substrato na câmara digestiva. O início da digestão tem uma tendência de quantidade maior de ácidos e hidrogênio do que dos demais compostos, o que demonstra maior atuação das bactérias formadoras destes compostos. Inóculos como lodo de esgoto digerido e estrume são comumente usados para acelerar a estabilização do sistema (PINTO, 2000).

Portanto, a aplicação de inóculos com efeitos tamponantes ajudariam a estabilizar o processo ao permitir que os demais microrganismos se desenvolvam e possam

competir num sistema estável. Além da aplicação de compostos como Bicarbonato de Sódio para controle do pH do sistema.

3.7 Purificação

A composição do substrato determina muitos parâmetros da biodigestão, dentre eles a concentração de gás sulfídrico – H_2S – do biogás produzido, a qual pode ultrapassar 30000 ppmV, se aproximando de 5% do volume total do gás (COLTURATO, 2015). O H_2S é um gás favorece os processos corrosivos dos equipamentos ao entrar em contato com o ar ou sofrer combustão, tornando limitada a aplicação do biogás (FRARE et al. 2009). A diminuição dos danos aos equipamentos e maior amplitude na aplicação do biogás exigem a remoção do H_2S a concentrações menores do que 200 ppmV (BRANCO, 2010). Alguns processos existentes para dessulforização do gás são a biodessulfurização externa, lavador biológico de gás, precipitação de sulfeto e o carvão ativado, sendo necessário escolher qual o método pela aplicação desejada do gás (FNR, 2010).

3.8 Aplicações

Para o PROSAB (2003) a aplicação do biogás em situações como fogões, motores, geração de energia elétrica para lâmpadas e outros itens pode ser considerado uma das fontes de energia mais econômicas e de fácil acesso para propriedades rurais. Sendo uma possível fonte de energia elétrica, térmica ou mecânica (SOUZA, 2004). Podendo aplicar na queima direta, como no gás de cozinha, aquecimento de água para banhos e piscinas, ou na conversão para energia elétrica. Destacando o fato de o biogás ser considerada uma fonte de energia renovável em comparação ao gás natural, carvão mineral e demais combustíveis oriundos do petróleo. Como mencionado, o biogás pode ter diversas finalidades de uso, porém elas dependem da qualidade e pureza do biogás. Uma vez que, como mencionado com o H_2S, que certo compostos presentes no gás podem danificar os equipamentos utilizados ou diminuir a eficiência energética do biogás. De acordo com FNR (2010), pode-se escalonar a aplicação do biogás junto da purificação do gás exibidos na Figura 8, da combustão direta que exige um menor nível de purificação para a aplicação de combustível veicular, por exemplo, que exige um grau muito maior de purificação.

Segundo FNR (2010), quanto as transformações térmicas, a obtenção de calor pela queima direta ocorre facilmente, uma vez que os queimadores tendem a ser equipamentos universais que se adaptam bem ao tipo de gás a ser queimado. A mesma literatura menciona que peças de metal colorido e aços de baixa liga podem sofrer mais danos corrosivos devido o H_2S da mistura gasosa, assim é recomendada a troca das peças ou tratamento do gás.

Figura 8 – Escalonamento da aplicação do biogás junto da purificação

Fonte: Adaptado de FNR (2010) por FERREIRA (2015)

3.9 Biofertilizante

O subproduto resultante da digestão anaeróbia da FORSU é composto por lignina e demais materiais que não foram decompostos pelos microrganismos, além de amônia. Os materiais que não foram decompostos durante a digestão anaeróbia podem ser decompostos durante uma compostagem aeróbia por fungos, por exemplo. Já a amônia será degradada em compostos nitrogenados menores que são altamente nutritivos para plantas. Seja aplicando sobre jardins ou aplicando diretamente em outro sistema de compostagem aeróbia (FRN, 2010).

O TRH é importante para a qualidade do biofertilizante, pois permite que o substrato fique o tempo necessário para ser biodegrado. O que aumenta a eficiência de produção de metano e uma qualidade adequada do produto para ser posteriormente aplicado ao solo sem ter que passar por um pré-tratamento antes da aplicação (FNR, 2010).

Um ponto a se considerar quanto a utilização de biofertilizantes é a possível contaminação destes por microrganismos danosos a saúde humana, de outros animais e do meio ambiente. Por exemplo, a presença de *E. Coli* e coliformes totais. O que impõe que o efluente seja utilizado apenas em culturas as quais os produtos não são comidos crus. Necessitando, assim, de avaliações ao começar a retirar o subproduto.

4. METODOLOGIA

4.1 Potencial de produção de metano e biogás

Muitos autores se utilizam de diversas aproximações ou estudos já elaborados por outros autores para definir os possíveis potenciais de produção de metano em cada planta e situação. Para o presente estudo, será utilizada a relação apresentada por Ferreira (2015) em seu estudo, ao avaliar o biodigestor que utiliza como substrato os resíduos alimentares do restaurante universitário da Universidade Federal de Minas Gerais. Fora observado que em situação ideal o biodigestor apresentou um rendimento de cerca 400m^3 de CH_4 para cada tonelada de Sólidos Voláteis presente nos resíduos. Por conta da maior parte da FORSU ser resíduos alimentares, tal produção de metano pode ser levada em conta. Além disso, como mencionado no tópico 3.6.1, a quantidade de sólidos voláteis nos resíduos orgânicos é de 24,4%. Assim, tem-se a equação 1 para cálculo da Massa de Sólidos Voláteis diários a serem inseridos no biorreator, a qual correlaciona a massa de substrato coletada diariamente multiplicada pela fração de sólidos voláteis presentes nos resíduos orgânicos.

$$m_{SVd} = M_{Si} \times f_{SV} \quad (1)$$

Sendo:

m_{SVd} = Massa de sólidos voláteis diária kg/dia

M_{Si} = Massa de Substratos iniciais em kg/dia

f_{SV} = Fração de Sólidos Voláteis presentes no substrato %

Já a Equação 2 calcula o Volume de Metano diário produzido pelo biodigestor de maneira ideal, a qual se aproxima do período de estado de equilíbrio dele, tal equação

$$V_{CH_4} = \frac{400\ m^3 \times m_{SVd}}{1000\ kg} \quad (2)$$

Sendo:

V_{CH_4} = Volume de CH_4 no biogás em m^3

m_{SVd} = Massa de Sólidos Voláteis diários em kg

Quanto ao volume de biogás produzido, a média obtida por Ferreira (2015) fora de 59% de concentração de metano presente no biogás obtido e 39% para CO_2. As densidades deste dois gases são 0,72 kg/m^3 e 1,98 kg/m^3, respectivamente (FNR, 2010). Desta forma, por esses dois gases serem responsáveis por 98% da concentração do biogás e os demais compostos aparecerem em porcentagens muito pequenas e com densidades não muito distantes destes dois, é possível utilizar as frações volumétricas deles na mistura para o cálculo do volume esperado de produção de biogás junto da expectativa de produção de metano. A Equação 3 calcula o volume de biogás obtido diariamente a partir da divisão do volume calculado de CH_4 pela fração do mesmo no biogás obtido.

$$V_{Biogás} = \frac{V_{CH_4}}{\%V_{CH_4}} \quad (3)$$

Sendo:

$V_{Biogás}$ = Volume de CO_2 no biogás em m^3/dia

V_{CH_4} = Volume de Metano no biogás em m^3/dia

$\%V_{CH_4}$ = Fração volumétrica de CH_4 no biogás em %

4.2 Proposta para preparação do substrato

A separação adequada do material orgânico destinado ao biodigestor deve ser feita pelos moradores partindo, com todos os moradores recebendo treinamento quanto ao que é um material reciclável, rapidamente e lentamente biodegradável. Além de separar fezes dos animais domésticos e lixo do banheiro a parte. O lixo de banheiro ainda deve ser também selecionado pelo morador, para separar itens biodegradáveis e outros que contêm materiais dos quais o biodigestor não conseguirá tratar ou não possam ser

considerados como possíveis substratos futuros para compostagem ou biofertilização direta, como fraldas descartáveis, absorventes, preservativos e outros semelhantes.

Quanto aos últimos itens, não foram encontrados estudos que indiquem a utilização como substrato ou até mesmo inóculo. Estes são dois elementos os quais estudos futuros deveriam dar atenção, uma vez que mais compostos possam ter dados de aplicabilidade em biodigestores ajudará ainda mais a reduzir a quantidade de materiais enviados a aterros. Além disso, o cenário brasileiro em 2018 contava com 54,2 milhões de cachorros, 23,9 milhões de gatos e outros animais de estimação, os quais totalizavam cerca de 139,3 milhões (GERALDES, 2019). Assim, a quantidade de resíduos gerados por estes animais somada ao seu possível potencial energético tem uma grande aplicação junto aos biodigestores.

Dessa maneira, tais elementos como lixo de banheiro selecionado e fezes de animais de estimação podem ser adicionados a FORSU durante a próxima etapa da preparação do substrato, a trituração. Para atingir o tamanho adequado de partículas, de 3 a 7cm todo o material coletado deve ser triturado antes de diluído e inserido no biodigestor.

Reis (2012), utilizou cerca de 10% de Sólidos Totais em seu estudo. Sendo esta uma concentração adequada ao reator CSTR. Utiliza-se a Equação 4 para o cálculo da Massa Total a ser inserida no biodigestor (substrato diluído), utilizando a quantidade de substrato gerada diariamente multiplicada pela Fração de Sólidos Totais dos resíduos coletados antes da diluição e divididos pela Fração de Sólidos Totais final, após a diluição.

$$M_{di} = \frac{M_{scd} \times ST_{fi}}{ST_{ff}} \quad (4)$$

Sendo:

M_{di} = Massa total diluída diária em kg/dia

M_{scd} = Massa de Substrato – FORSU – coletada diariamente em kg/dia

ST_{fi} = Fração de ST do Substrato inicial em %

ST_{ff} = Fração de ST do Substrato final em %

A Equação 5 define o volume de água a ser adicionada. É a subtração da M_{di} pela M_{scd}, multiplicados pela massa específica da água, a assumindo, como 997,0 kg/m^3.

$$V_{ad} = (M_{di} - M_{scd}) \times 997{,}0 \frac{kg}{m^3} \quad (5)$$

$V_{ad} =$ Volume de água para diluição m^3/dia

M_{di} = Massa total do substrato diluído em kg/dia

Um ponto interessante a se levantar é a captura de água pluvial para utilização na diluição do substrato, uma vez que a tendência das digestões é a inserção de componentes tamponantes, o que evitaria possíveis problemas frentes a chuva ácida. Tal coleta de água permitiria também uma economia junto do consumo de água.

4.3 Tempo de Retenção Hidráulica

Primeiro, é necessário calcular o volume de substrato a ser inserido no digestor pela equação 6, a qual soma o volume de água a ser adicionado e a divisão da massa de substrato recolhido diariamente pela sua massa específica aproximada. Tchobanoglous (1994) discorre que há variação da massa específica dos resíduos orgânicos de 131,0 kg/m^3 a 481,0 kg/m^3, mas podendo utilizar 291,0 kg/m^3 como um valor usual.

$$V_{sd} = V_{ad} + \left(\frac{M_{scd}}{291{,}0\ kg/m^3}\right) \quad (6)$$

Sendo:

V_{sd} = Volume do Substrato diluído em m^3/dia

O tempo de retenção hidráulica pode ser calculado pela Equação 7, na qual ocorre a divisão do Volume do reator pelo Volume de Substrato adicionado diariamente ao reator, vale ressaltar que será considerado o Volume útil do reator como o Volume total, uma vez que será proposto três opções de tamanho fixo de reatores. A discussão quanto a estes volumes fixos será feita no tópico 5.4.

$$TRH = \frac{V_{UR}}{V_{sd}} \quad (7)$$

Sendo:

TRH = Tempo de Retenção Hidráulico em $dias$

V_R = Volume do reator em m^3/dia

4.4 Proposta para purificação do biogás

Como já mencionado nos tópicos 3.7 e 3.8, a aplicação do biogás é dependente dos componentes presentes nele e a concentração do metano na mistura. Porém as formas mais eficientes de remoção das impurezas, tais como H_2S, CO_2 e NH_3 exigem investimentos para utilização de tecnologias industriais, as quais saem do escopo de aplicação deste projeto. Assim, seguindo Canever (2017) recomenda-se logo após a saída do gás do Biodigestor, passar o gás por um compressor para manter a pressão constante e o destina por uma coluna de lavagem fechada de 500mm de altura contendo água e carbonato de sódio – Na_2CO_3 – a uma concentração de 10,0 g/L e vazão do biogás passando pela coluna de 300L/h. Tal método atinge níveis de remoção de 55% de CO_2 e 99% de H_2S do biogás formado.

Após a purificação, o volume do gás tende a diminuir, já que parte do CO_2 será retirado. Assim, ao avaliar o potencial energético do gás pelo volume de biogás, ele irá aumentar. Trevor Kletz, em 1984, e desenvolveu o método HAZOP, como é conhecido atualmente. Trata-se de uma técnica de análise qualitativa com o propósito de identificar o perigo e a operabilidade e para examinar as linhas de processo em sistemas industriais.

4.5 Estudo de Risco e Operabilidade

O método HAZOP é uma técnica utilizada na identificação de riscos na indústria química. É análise qualitativa que visa a identificação dos risco e operação para examinar as linhas de processo industriais. Para a aplicação do HAZOP são seguidas “palavras guias”, por meio de perguntas direcionadas a possíveis desvios usuais que podem ocorrer durante a operação das linhas medidas, relacionando tais palavras

chaves às variáveis de processo. A Tabela 11 é um demonstrativo da correlação das "palavras guias" e possíveis desvios usuais de exemplo (QUINTELA et al. 2011).

Tabela 11 – Exemplos de desvios usuais para correlacionar com as palavras guias no método HAZOP

Palavra Guia	Desvio
Nenhum	Exemplo: Ausência de fluxo quando deveria existir, ou seja, fluxo zero ou fluxo reverso (fluxo em sentido contrário ao desejado)
Mais de	Elevação de qualquer propriedade física relevante em relação ao nível que deveria existir, como fluxo maior, temperatura maior, pressão maior, viscosidade maior, etc.
Menos de	Diminuição de qualquer propriedade física relevante em relação ao nível que deveria existir, como fluxo menor, temperatura menor, pressão menor, viscosidade menor, etc.
Parte de	Mudança de componentes que deveria existir (troca da relação entre os componentes da mistura)
Mais do que	Mais componentes no sistema, em relação ao que deveria existir, como uma fase extra presente (vapor, sólido), impurezas (ar, água, ácidos, produtos de corrosão), etc.
Outros	Qualquer outra ocorrência que saia da condição normal de operação, como os transientes de partida e parada das unidades, modos alternativos de operação, falta de fluidos de utilidades, manutenção, troca de catalisador, etc.

Fonte: Quintela et al. (2011)

Outro ponto obtido após a aplicação deste método é o levantamento de questões quanto a possíveis desvios operacionais durante o processo, diminuindo assim riscos ligados a erros humanos. Assim, este método visa abranger possíveis situações de risco e corrigir a estrutura do processo antes que ocorram.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cálculos desta metodologia se baseiam nos estudos elaborados por Ferreira (2015) e Reis (2012), com ênfase na última literatura.

5.1 Cálculo da quantidade de lixo gerada por edifício

Segundo LELLO CONDOMÍNIOS (2019) na capital paulista 37% da população vivem em condomínios residenciais espalhados pela cidade, contendo 1,5 milhão de apartamentos e empregam 140 mil funcionários. Além de 20% dos orçamentos dos condomínios serem destinados às concessionárias fornecedoras de gás, energia elétrica e água. Tendo uma média de 78 apartamentos por condomínio e 1,7 edifícios dentro do condomínio.

Já a PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios – de 2018 indicou que existem 27,5%, 26,0% e 19,0% de residências contendo 2, 3 e 4 pessoas, em cada residência respectivamente. Casando as duas informações, consegue-se calcular quantas pessoas moram por edifício, sendo em média 205 pessoas. Assim, esta é a amostra populacional a ser utilizada neste trabalho.

Como visto na introdução, cada pessoa na capital paulista produz 0,489 kg de resíduo orgânico diariamente e correlacionando com a quantidade de pessoas que habitam o edifício médio, tem-se uma produção diária de 100,245 kg de resíduos orgânicos diários.

5.2 Cálculo da produção de Metano e biogás

Segundo o método apresentado no tópico 4.1, podemos calcular a produção diária de metano e biogás.

Para a equação 1: $M_{Si} = 100{,}2\ kg/dia$ e $f_{SV} = 24{,}4\% = 0{,}244$

$$m_{SVd} = 100{,}245 \times 0{,}244 = 24{,}460\ kg/dia$$

Assim, seguindo para a equação 2 com o valor obtido de massa de sólidos voláteis diários.

$$V_{CH_4} = \frac{400 \times 24{,}460}{1000} = 9{,}784\ \frac{m^3}{dia}$$

Assim, seguindo para a equação 3 com o volume de metano diário e $\%V_{CH_4} = 59\% = 0{,}59$.

$$V_{Biogás} = \frac{9{,}784}{0{,}59} = 16{,}583\,\frac{m^3}{dia}$$

5.3 Cálculo do volume de água para adição

Segundo o método apresentado no tópico 4.2, podemos calcular a produção diária de metano e biogás.

Para a equação 4: $M_{scd} = 100{,}245\ kg/dia$, $ST_{fi} = 30\% = 0{,}30$ e $ST_{ff} = 10\% = 0{,}10$.

$$M_{di} = \frac{100{,}245 \times 0{,}3}{0{,}1} = 300{,}735\ kg/dia$$

Para a equação 5.

$$V_{ad} = (300{,}735 - 100{,}245)/997{,}0 = 0{,}201\ \frac{m^3}{dia}$$

5.4 Questões para definição do Volume do Reator

O Volume do biodigestor CSTR fora definido com 3 possibilidades, uma vez que o projeto depende das estruturas físicas e quantidade de investimentos disponíveis pelos edifícios residenciais.

Quanto à primeira dependência, os edifícios em sua maioria não possuem muito espaço disponível e tendem a aproveitar ao máximo as distribuições espaciais de suas utilidades e demais itens. O lixo urbano é um item que fica o mais isolado possível do trânsito dos moradores nas dependências do edifício seja pelo odor da putrefação e atração de animais que possam ser vetores de doenças ou que gerem repulsa, por exemplo. Por isso, este projeto visa a instalação de uma estrutura a qual pode ser concebida nas dependências externas do prédio. Um biodigestor é um equipamento que produz material inflamável, assim, necessitando ficar em uma área isolada, próxima ao depósito dos resíduos do edifiício e que possa haver queima do gás pelo Flare, o qual é um equipamento para a possível queima do biogás em casos de uma produção acima do consumo, uma possível fuga de biogás pelo sistema ou uma necessidade de esvaziamento dos reservatórios de biogás, impedindo que ele seja mandado para a atmosfera como gás metano.

Quanto à segunda dependência, os edifícios variam quanto a seus orçamentos e isto deve ser levado em conta. Foram pensados em reatores CSTR, devido às suas característica já discutidas, cilíndricos com 3 possíveis volumes fixos de $V_1 = 10\ m^3$, $V_2 = 12\ m^3$ e $V_3 = 14\ m^3$, pois, como será visto no tópico a seguir, tais volumes variam o tempo de retenção hidráulico do reator. Tal variação interfere na qualidade do subproduto e gás formados, além de desperdiçar matéria orgânica que ainda possui potencial para a decomposição anaeróbia.

Fora pensada numa altura do tanque de 2m para não dificultar a sua operação de manutenção. Com esta altura e estes volumes de reatores, tem-se os seguintes diâmetros de reatores $d_1 = 3{,}183\ m$, $d_2 = 3{,}820\ m$ e $d_3 = 4{,}456\ m$.

5.5 Cálculo do Tempo de Retenção Hidráulica

Segundo o método apresentado no tópico 4.3, podemos calcular o Tempo de Retenção Hidráulica.

Para a equação 6:

$$V_{sd} = 0{,}201 + \left(\frac{100{,}245}{291{,}0}\right) = 0{,}545\ m^3/dia$$

Para a equação 7: $V_1 = 10\ m^3, V_2 = 12\ m^3\ e\ V_3 = 14\ m^3$

$$TRH_1 = \frac{10}{0{,}545} = 18{,}545\ dias$$

$$TRH_2 = \frac{12}{0{,}545} = 22{,}018\ dias$$

$$TRH_3 = \frac{14}{0{,}545} = 25{,}688\ dias$$

Dentre os três TRH obtidos, o primeiro exigiria que o volume de substratos diluídos a entrarem no biodigestores fosse reduzido para quantidade menores do que $0{,}300\ m^3/dia$, a fim de atender o período de TRH indicado para a digestão de misturas com 10% de ST de FORSU, tal faixa é entre 20 a 40 dias. Contudo, esta redução promoveria uma redução da quantidade de metano obtido diariamente.

Quanto aos outros dois valores obtidos, estes estão dentro da faixa, porém tal volume começa a ter um valor possivelmente elevado e um tamanho de difícil instalações em locais nos quais não houve o planejamento para tal equipamento. Mais uma vez, cada edifício deve considerar qual seria o melhor biorreator a sua estrutura, situação financeira e quantidade de resíduos gerados diariamente.

5.6 Sugestão para armazenamento do biogás

Após realizar o procedimento de lavagem do gás obtido por meio da coluna de lavagem indicada no tópico 4.4, o gás deve ser destinado para a estrutura de armazenamento. Com o objetivo de manter um gás mais adequado para a utilização dentre as aplicações escolhidas.

Das estruturas apresentadas no tópico 3.6, a que melhor se encaixa na aplicação deste projeto é o armazenamento externo, pois permite a purificação do gás antes dele ser armazenado e direcionado para o uso e o permite ser alocado em uma melhor distribuição espacial do que na parte superior do biodigestor. Assim, o espaço destinado a armazenamento depende das estruturas disponíveis pelo ambiente, desde que respeite uma premissa de armazenamento mínimo de 25% da produção diária de metano (FNR, 2010) e possua equipamentos de segurança como os mencionados e ainda mais o Flare.

Uma outra estrutura que deve haver junto de todos os equipamentos é um sistema de exaustão eficiente para recolhimento de todo o gás que possa ser disperso nos arredores dos equipamentos para evitar uma possível atmosfera explosiva.

5.7 Sugestão de Operação da planta

A Figura 9 exemplifica o fluxograma do processo de obtenção do biogás e do Biofertilizante a partir da degradação da FORSU.

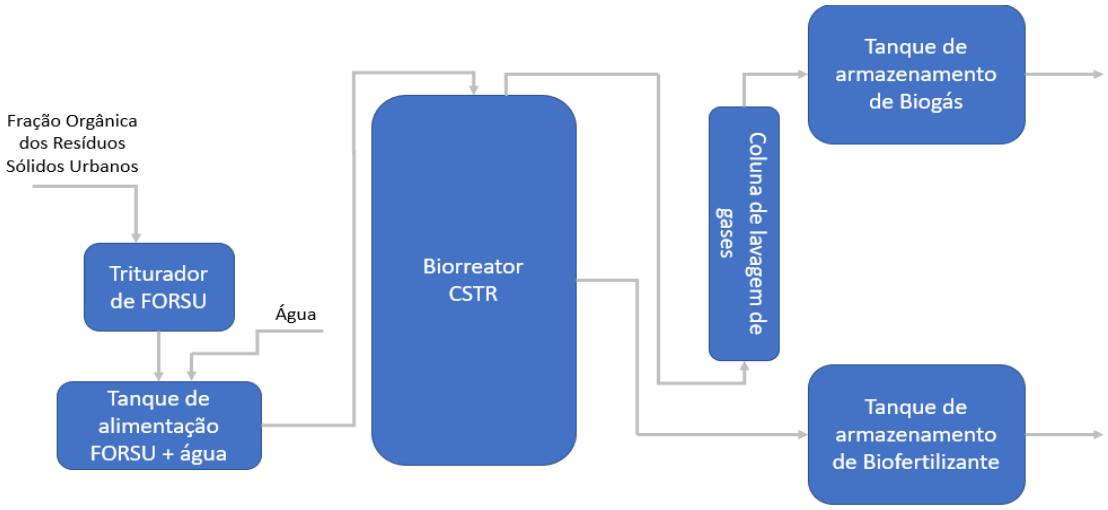

Figura 9 – Fluxograma do processo de Biodigestão da FORSU

Fonte: próprio autor

Para uma melhor eficiência da planta de Biodigestão, sugere-se a seguinte ordem de operação, a considerando como uma operação diária.

Em primeiro, considerando que o sistema está com as válvulas de entrada de substrato diluído, de saída de subprodutos fechadas e de saída de biogás direcionado para a coluna de lavagem de gases fechada. Ocorrer a retirada dos subprodutos, biofertilizante, do sistema. Uma vez que a retirada será mais facilitada pela pressão interna do tanque ser superior a externa, do ambiente.

Em sequência, fechar a válvula de saída do subproduto e abrir a de transferência do gás para a coluna de lavagem. Uma vez que deve haver um compressor para gases na parte superior logo após a saída do biodigestor para atingir a vazão necessária de alimentação do biogás à coluna de lavagem de gases.

Em seguida, ao final de quase toda a transferência de biogás do biodigestor para a coluna, abertura da válvula de entrada de substratos diluídos para aproveitar a redução da pressão interna do biodigestor e facilitar a transferência da mistura diluída.

5.8 Aplicação do método HAZOP

Os principais equipamentos do sistema que podem ser elencados para promover diminuição dos riscos de operação são o triturador, biodigestor e tanque de

armazenamento de gás. Ao longo deste tópico serão elencados os principais riscos quanto a estes equipamentos e suas possíveis soluções.

O triturador utiliza a palavra guia como “outros”, a qual se encaixa nos riscos quanto acidentes graves de lesão nos membros do operador, já que não seria uma necessidade do operador intervir manualmente na região próxima às lâminas, o que exige um isolamento do acesso as lâminas, como por meio de grades. Outro ponto é quanto a resíduos que podem ficar em contato com o material após a operação, assim, uma porção de água deve ser passada ao final da trituração para aumentar a longevidade do material.

O biodigestor e o tanque de armazenamento de gás podem ser conectados a palavras guias como “nenhum” e “mais de” e possuem riscos semelhantes entre si quanto a vazamentos de líquidos, conectado a “nenhum”, e aumento da pressão interna com a produção contínua de gás, conectado a “mais de”. Quanto aos vazamentos de líquidos, pelo conteúdo líquido do biorreator ter um fator de possíveis contaminação de águas e solos, o biorreator deve ser construído em uma área que possa conter todos estes vazamentos, o que possibilitaria uma remoção adequada. Os riscos que podem ocorrer a partir do aumento da pressão interna do biorreator são um possível vazamento de gás, o que tem impactos ambientais, uma vez que o metano é um gás do efeito estufa, e quanto ao gás ser inflamável; outro risco do aumento da pressão é uma possível explosão da estrutura do biorreator que pode causar danos físicos a estrutura do edifício ou oferecer riscos aos moradores. A fim de contornar o aumento da pressão interna do reator, é sugerido a instalação de válvulas de alívio de pressão de acionamento por molas que permitem o biogás ser direcionado ao tanque de armazenamento. Quanto a pressão interna do tanque de armazenamento, também é sugerida uma válvula de alívio de pressão com o mesmo sistema de acionamento, porém que direcione o gás para os queimadores dos sistemas de aquecimento sugeridos no tópico 5.9.

Outro ponto que visa a segurança do equipamento é uma manutenção preventiva adequada, a qual permite a análise em campo do desenvolvimento dos possíveis riscos levantados e antecipando a correção destes.

5.9 Sugestões para aplicação do biogás

A aplicação do biogás pode ocorrer em diversos setores dentro do edifício residencial. Como dito no tópico 3.8, há exigência de determinados níveis de purificação do biogás para determinadas aplicações. Dentre as aplicações, a que exige menor eficiência de purificação é a queima direta, a qual estaria ligada a aplicações como aquecimento de piscinas, água para banho e queima em fogões. Para todos estes, há a necessidade de adaptação nos queimadores (SILVA et al., 2005).

5.9.1 Aquecedor de água a biogás

Silva et al. (2005) a utilização do biogás para pequenas e médias propriedades é dependente da disponibilidade de equipamentos aptos a realizaram a queima adequada e que propicie a mesma eficiência energética da queima de outras fontes de energia, como gás liquefeito de petróleo e gás natural. Amestoy e Ferreyra (1987) recomendam os modelos de acumulação de água para os aquecedores que utilizem o biogás, devido a combinação de eficiência energética do biogás e baixa pressão dos biodigestores. Tais equipamentos possuem um reservatório de água, a qual será aquecida e estão dentre os mais fácil para adaptação para utilização do biogás.

Assim, para aplicações mais próximas dos outros combustíveis, é necessário redimensionar o injetor de gás. O que proporcionaria maiores trocar térmicas. As adaptações de Silva et al. (2005) permitiram alcançar uma eficiência térmica média de 68% da queima do biogás, com um consumo de 1,85m^3 de gás para um período de 24h de operação.

Para o aquecimento de quantidades maiores de água como em piscinas, é sugerido a utilização de sistema em reciclo, interligando a piscina com o reservatório de água do aquecedor. Além de incrementar na quantidade de aquecedores para poder atender ao volume de água.

5.9.2 Fogões a biogás

Adaptações em fogões também são necessárias, uma que suas dimensões são projetadas para operar sobre uma eficiência e determinado combustível. Nascimento et al., (2014) menciona que a aplicação de biogás nos fogões pode se tornar cada vez mais

comum, uma vez que a empresas que estão a entregar produtos voltados para o consumo deste combustível. Além disso, menciona também algumas adaptações que os fogões operantes a GLP devem passar para atender o biogás, como abertura do injetor de gás, diminuição dos pontos de entrada de ar e adaptações na boca do fogão. Tais adaptações visam aprimorar a injeção de biogás, diminuir a incidência de ar ao ponto ideal e distribuir melhor o biogás. Todas as adaptações visam a melhoria da eficiência na combustão.

6. CONCLUSÃO E SUGESTÕES

Este trabalho visou a diminuição da quantidade da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos que é destinada aos aterros sanitários utilizados pela cidade de São Paulo e tendo em vista o aproveitamento energético dentro de um edifício residencial. A partir deste objetivo foi proposto a utilização de um biodigestor anaeróbico para reaproveitamento energético e digestão da FORSU gerados pelo edifício exemplo para este estudo, o qual gera diariamente $100{,}245\ kg$ de matéria orgânica. O que corresponde à metade da produção diária do edifício de $200{,}490\ kg$ de resíduos sólidos urbanos do edifício. Tal quantidade de matéria orgânica pode gerar diariamente, em condições ideias, um volume de $9{,}784\ m^3$ de CH_4 e $16{,}583\ m^3$ de biogás.

Para atender tal quantidade de FORSU e de biogás gerado é sugerida a utilização de um reator CSTR, o qual tem a melhor capacidade de manutenção dos parâmetros necessários para a digestão. Para isso, o tamanho recomendado do reator é de 14 m^3, o qual seria capaz de atender ao TDH de 26 dias, aproximadamente. O que aprimora a qualidade do subproduto gerado.

Quanto a periculosidade de aplicação do sistema, seguindo as sugestões do tópico 5.9 como utilização de válvulas de alívio de pressão, construção dos equipamentos em áreas contidas e conexão com os queimadores do gás dos aquecedores de água para banho ou aquecimento da piscina. Assim, reduzindo os riscos e facilitando a operação do sistema.

A variação da quantidade de moradores alterará na quantidade de material orgânico fornecido ao biorreator, afetando a produção. O que necessita de uma avaliação correta da aplicação do biogás para sempre manter o fornecimento apto a atender as necessidades. Ou o sistema pode operar paralelamente ao abastecimento de gás natural ou GLP.

Ao final, reforça-se que o investimento em equipamentos, mão de obra e estrutura é dependente do orçamento do edifício, o que direcionou este trabalho a manter uma visão simplificada e que indica a expansão dentro do necessário para uma melhor performance.

Como sugestões dois pontos a serem vistos, avaliações quanto a utilização dos dejetos de animais domésticos como inóculo e utilização em paralelo da captura de água pluvial para alimentação da digestão dos resíduos orgânicos antes da inserção deles no biodigestor. Tais pontos podem aprimorar a eficiência e ajudar na utilização destes recursos que muitas vezes são ignorados.

7. BIBLIOGRAFIA

AGUILAR-VIRGEN, Quetzalli et al. Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in situ parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014.

ALMEIDA, Vinicius Negri Lino de; BRUNO, Ricardo Luiz. BIODIGESTOR ORGÂNICO: GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DE BIOGÁS. Revista Científica da FHO, UNIARARAS, Vol. 4, n° 2 2016. Disponível em: http://www.uniararas.br/revistacientifica/_documentos/art.026-2016.pdf. Acesso em: 14 abr. 2019.

AMESTOY, E.A.; FERREYRA, R.D. Utilização del biogas. In: **Seminário internacional de biodigestion anaerobia**, Montevideo. Anais... Montevideo: Comisión de Agroenergia, FAO, 1987. 63 p. 1987.

ANASTÁCIO, Mécia Clara Frias et al. **Produção de energia na forma de biogás a partir de resíduos animais para o desenvolvimento rural**. 2010.

ANGELIDAKI, A., ELLEGAARD, L.; AHRING, B. K. **Applications of the anaerobic digestion process. Advances in Biochemical Engineering**. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 82, 1-33. 2003.

Angelidaki, I., Chen, X., Cui, J., Kaparaju, P., & Ellegaard, L. **Thermophilic anaerobic digestion of source-sorted organic fraction of household municipal solid waste: Start-up procedure for continuously stirred tank reactor**. Water Research, 40(14), 2621–2628. 2006.

BARBOSA, Anne. Cidades da Grande SP produzem 27 mil toneladas de lixo por dia; veja para onde vão os resíduos. **Globo.com**, 2019. Disponível em: https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/04/29/cidades-da-grande-sp-produzem-27-mil-toneladas-de-lixo-por-dia-veja-para-onde-vao-os-residuos.ghtml. Acesso em 10 out. 2019

CASTANÓN, N. J. B. Biogás, originado a partir dos rejeitos rurais. Trabalho apresentado na disciplina: Biomassa como Fonte de Energia - Conversão e utilização. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2002.

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.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA E SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). Biogás: pesquisas e projetos no Brasil. Governo de São Paulo, Secretaria de Meio Ambiente e CETESB. Organização de Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer. Responsável técnico: João Wagner Silva Alves. São Paulo, 2006.

CUETOS, M. J., GOMEZ, X., OTERO, M., MORAN, A., **Anaerobic digestion of solid slaughter housewaste (SHW) at laboratory scale: influence of co-digestion with the organic fraction of municipal solid waste (OFMSW)**. Biochemical Engineering Journal, 40, 99 - 106. 2008.

DE AZEVEDO FRIGO, Késia Damaris et al. **Biodigestores: seus modelos e aplicações**. Acta Iguazu, v. 4, n. 1, p. 57-65, 2015.

DEGANUTTI, Roberto et al. **Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada**. Procedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

ELK, A. G. H. P. Redução de emissões na disposição final. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo aplicado a resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, IBAM, 2007.

FARIA, F. S. **Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos**. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado), Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 401 p. 2002

FERREIRA, Bernardo Ornelas. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. Escola de Engenharia, UFMG, Belo Horizonte, 2015.

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

FRARE, Laercio Mantovani; GIMENES, Marcelino Luiz; PEREIRA, Nehemias Curvelo. **Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 14, n. 2, p. 167-172, 2009.

GERALDES, Daniel. **Censo Pet: 139, 3 milhões de animais de estimação no Brasil**. Revista Pet Food. ed 13 (2019).

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017. Estimativa da população. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?edicao=25272&t=resultados. Acesso em 10 out. 2019.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2017. Produto Interno Bruto dos Municípios. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/contas-nacionais/9088-produto-interno-bruto-dos-municipios.html?=&t=resultados. Acesso em 06 mai. 2020.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua: PNAD Contínua 2018. Rio de Janeiro: IBGE. 2018.

IGONI, A. H., ABOWEI, M.F.N., AYOTAMUNO, M.J. and EZE, C.L. **Comparative Evaluation of Batch and Continuous Anaerobic Digesters in Biogas Production from Municipal Solid Waste**. Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal. Manuscript EE 07 011. Vol. X. September, 2008.

IGONI, A. Hilkiah. **Design of anaerobic bio-reactors for the simulation of biogas production from municipal solid waste**. Tese de Doutorado. Ph. D Thesis, Rivers State University of Science and Technology, Port Harcourt, Nigeria. 2006.

JUCA, J. F. T.; SIMOES, G. F.; CODECEIRA NETO, A.; PERES, S.; GUIMARAES, L. J. N. GERAÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA EM ATERRO EXPERIMENTAL DE RESÍDUOS SÓLIDOSURBANOS. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco. 2009.

LELLO CONDOMÍNIOS. **Mapa dos Condomínios de São Paulo**. São Paulo, 12 2016. Disponível em: https://www.lellocondominios.com.br/wp-content/uploads/2016/12/Indicadores.pdf. Acesso em: 2 jun. 2019.

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.

MACHADO, C. R. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros submetidos a diferentes tempos de exposição ao ar**. Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu/SP: 2011.

Manual de gerenciamento de resíduos de serviços de saúde / Ministério da Saúde, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Brasília: Ministério da Saúde, 2006.

MOTTA, Fernando Sodre da. **Produza sua energia: biodigestores anaeróbicos**. 1ºedição. Recife, E; SETEC; 144 p. 1986.

MUCELIN, Carlos Alberto; BELLINI, Marta. LIXO E IMPACTOS AMBIENTAIS PERCEPTÍVEIS NO ECOSSISTEMA URBANO. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, jun 2008. 20 (1): 111-124, jun. 2008.

NASCIMENTO, Paulo Sérgio de Castro, ACÁCIO, Luciana Carvalho.**SOLUÇÕES EM ENERGIA–PROJETO DE BIODIGESTOR**. "PROJETO INTEGRADOR." (2014).

NOGUEIRA L.A.H. **Biodigestão, A Alternativa Energética**. Editora Nobel, São Paulo. 1986

NOYOLA, A., MORGAN-SAGASTUME, J.M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J.E. **Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery.** Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology, v. 5, p. 93-114. 2006.

OLIVEIRA, L. B. & ROSA, L.P. **Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits**. Energy Policy. v 31. pp. 1481-1491. 2003.

PALHARES, Julio Cesar Pascale; GEBLER, Luciano. **Gestão ambiental na agropecuária**. Embrapa Uva e Vinho-Livro científico. (ALICE), 2014.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA - CASA CIVIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2 ago. 2010.

PROSAB: Programa de Pesquisas em Saneamento Básico; Rede Cooperativa de Pesquisas/ **Digestão Anaeróbia de Resíduos Orgânicos e Aproveitamento de Biogás**. Coordenador: Cassini, S. T., 2003.

QUINTELLA, Mônica Caldeira et al. **Adaptação e aplicação da técnica HAZOP na identificação de risco na área de serviço de saúde: Estudo de Caso HEMOCENTRO/UNICAMP**. 2011.

REIS, Alexsandro dos Santos. **Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio**. 79 f. 2012. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade Federal de Pernambuco, Caruaru. 2012.

ROSS, Charles C.; Drake, Thomas Jefferson; Walsh, James L. **Handbook of biogas utilization.** 2.ed. Atlanta: U.S. Department of Energy, 2p. 1996.

SCHIRMER, W. N. et al. Methane production in anaerobic digestion of organic waste from Recife (Brazil) landfill: evaluation in refuse of diferent ages. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 31, n. 2, p. 373-384, 2014.

SHARMA, V. K. **Anaerobic digestion of semi-solid organic waste: biogás production and its purification**. Energy Conversion and Management, 43, 63-75. 2002.

SILVA, F. M. D., JORGE, L. J. D., BENINCASA, M., OLIVEIRA, E. D. **Desempenho de um aquecedor de água a biogás**. Engenharia Agrícola, 25(3), 608-614. 2005.

SOUZA, M. E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. Revista DAE, (44), p. 88-94, 1984.

TARRENTO. G. E., MARTINES, J. C. Análise da implantação de biodigestores em pequenas propriedade rurais, dentro do contexto da produção limpa. In: SIMPEP, 13. Bauru, SP, Brasil. 2006.

TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Gestión integral de residuos sólidos**. São Paulo: McGraw-Hill, 1994.

VIEIRA, Melissa *et al*. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE SUBPRODUTOS RURAIS E AGROINDUSTRIAIS POR DIGESTÃO ANAERÓBICA. *Em*: FREIRE, Flavio Bentes; FREIRE, Fábio Bentes; FREIRE, José Teixeira. **Tópicos em tratamento de resíduos e meio ambiente**. São Carlos: Animeris, 2014.

ZAGO, Valéria Cristina Palmeira; BARROS, Raphael Tobias de Vasconcelos. **Gestão dos resíduos sólidos orgânicos urbanos no Brasil: do ordenamento jurídico à realidade**. Eng. Sanit. Ambient., Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 219-228, Apr. 2019.

ZHANG L, LEE YW, JAHNG D. **Anaerobic co-digestion of food waste and piggery wastewater: focusing on the role of trace elements**. Bioresour Technol 102:5048–59. 2011.

ZHANG, C; SU, H.; TAN, T. **Batch and semi-continuous anaerobic digestion of food waste in a dual solid–liquid system**. Bioresour Technol 145:10–6. 2013.

ZHANG, Ruihong; El-Mashad, Hamed M.; Hartman, Karl; Wang, Fengyu. **Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion**. Biological and Agricultural Engineering Department, University of California, United States. Elsevier LTD. 929 a 935 p. 2006.