

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS

LUCAS MONTEIRO GALOTTI DE SOUZA

**DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS PARA PRODUÇÃO
E TRATAMENTO DE BIOGÁS GERADO A PARTIR DE RSU -
ESTUDO DE CASO PARA CONDOMÍNIO RESIDENCIAL EM
CAMPINAS**

CAMPINAS/SP

CENTRO ESTADUAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE CAMPINAS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM PROCESSOS QUÍMICOS

LUCAS MONTEIRO GALOTTI DE SOUZA

**DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS PARA PRODUÇÃO
E TRATAMENTO DE BIOGÁS GERADO A PARTIR DE RSU -
ESTUDO DE CASO PARA CONDOMÍNIO RESIDENCIAL EM
CAMPINAS**

Trabalho de Graduação apresentado por Lucas Monteiro Galotti de Souza, como pré-requisito para a conclusão do Curso Superior de Tecnologia em Processos Químicos, da Faculdade de Tecnologia de Campinas, elaborado sob a orientação da Profa. Dra. Juliana Pedrilho Foltin.

CAMPINAS/SP

2021

FICHA CATALOGRÁFICA
Biblioteca - Fatec Campinas – CEETEPS

S716d

SOUZA, Lucas Monteiro Galotti
Dimensionamento de equipamentos para produção e tratamento
de Biogás gerado a partir de RSU – Estudo de caso para
Condomínio Residencial em Campinas.
Campinas, 2021.
54 p.; 30 cm.

Trabalho de Graduação do Curso de Tecnologia em Processos
Químicos – Faculdade de Tecnologia de Campinas.
Orientador: Profa. Dra. Juliana Pedrilho Foltin.

1. Biogás. 2. RSU. 3. Enxofre. 4. Biodigestor. 5. Absorção.
I. Autor. II. Faculdade de Tecnologia de Campinas. III. Título.

CDD 665

Catálogo-na-fonte: Bibliotecária: Aparecida Stradiotto Mendes – CRB8/6553

TG PQ21.1

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Sayuri, minha amada companheira, amiga e mulher.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Sayuri por todo apoio e parceria ao longo da minha trajetória.

Agradeço minha família pelo suporte e compreensão.

Agradeço o corpo docente da Fatec Campinas pelo apoio e qualidade no ensino, em especial a professora Juliana Foltin pela orientação neste trabalho.

Agradeço os colegas e os funcionários da Fatec pelo companheirismo e gentileza.

RESUMO

O biogás é uma fonte de energia que pode ser obtida de material orgânico. Resíduos sólidos urbanos (RSU) são um tipo de material que pode ser aproveitado para a produção de biogás. Áreas de concentração humana, como condomínios, são adequadas para promover esse aproveitamento, pois há geração de RSU em grande quantidade. Para a produção de biogás, é necessária a construção de uma planta, composta por um biodigestor e por um sistema de tratamento do gás bruto. Neste trabalho, foi proposta a construção de uma planta de biogás em um condomínio residencial em Campinas, com mais de mil moradores e geração de mais de 1 tonelada de RSU por dia. Através do dimensionamento da planta, calculou-se a produção de biogás diária de 163,2 m³. Caso aproveitado para geração de energia elétrica, esse volume poderia gerar uma potência de 10 kW. As dimensões calculadas para o biodigestor foram de 2,05 m de raio e 4,09 m de altura. Para o sistema de tratamento do biogás, foi adotada uma coluna de absorção para remoção do gás sulfídrico, acoplada a um reator de algas e um decantador de enxofre, reduzindo sua concentração de 5000 ppm para 10 ppm. Para atingir tal eficácia, são necessários 184,48 L de água por dia e 3,39 kg de hidróxido de sódio. A coluna deve operar com uma vazão de 128 mL por minuto. O sistema de tratamento do biogás ainda permite a recuperação de 1,2 kg de enxofre por dia, que pode ser aproveitado como fertilizante.

Palavras-chave: biogás; RSU; enxofre; biodigestor; absorção.

ABSTRACT

Biogas is an energy source that can be obtained from organic material. Municipal solid waste (MSW) is a type of material that can be used for the production of biogas. Areas of human concentration, such as condominiums, are suitable for promoting this use, as there is a large amount of MSW generated. For the production of biogas, it is necessary to build a plant, consisting of a biodigester and a raw gas treatment system. In this work, the construction of a biogas plant in a residential condominium in Campinas was proposed, where more than a thousand residents generate more than 1 ton of MSW per day. Through the plant sizing, the daily biogas production of 163.2 m³ was calculated. If used for electricity generation, this volume could generate a power of 10 kW. The dimensions calculated for the biodigester were 2.05 m in radius and 4.09 m in height. For the biogas treatment system, an absorption column was adopted to remove the hydrogen sulphide, coupled to an algae reactor and a sulfur decanter, reducing its concentration from 5000 ppm to 10 ppm. To achieve such effectiveness, 184.48 L of water per day and 3.39 kg of sodium hydroxide are needed. The column must operate at a flow rate of 128 mL per minute. The biogas treatment system also allows for the recovery of 1.2 kg of sulfur per day, which can be used as fertilizer.

Keywords: biogas; MSW; sulfur; biodigester; absorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Biodigestor indiano.	17
Figura 2 – Sistema THIOPAC®, da Paques.....	22
Figura 3 – Sistema de produção, tratamento e aproveitamento de biogás a partir de RSU em condomínio.	26
Figura 4 – Esquema de uma coluna de absorção e seus fluxos de líquido e gás. G: gás; L: líquido; x: fração do gás; y: fração do líquido; o: entrada; f: saída.	31
Figura 5 – Formato e dimensões do biodigestor em vista tridimensional.	42
Figura 6 – Formato e dimensões do biodigestor em vista frontal (esquerda) e superior (direita).....	42
Figura 7 – Vista superior do condomínio Rubi Ville, com a área proposta para construção da planta de biogás em destaque.....	49
Figura 8 – Vista superior da área proposta para construção da planta de biogás em destaque com dimensões.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição média do biogás. Fonte: PROBIOGÁS (2010).	32
Tabela 2 – Solubilidade em água das moléculas de interesse na coluna de absorção na pressão atmosférica.	36

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	12
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	13
3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA	14
3.3 BIOGÁS, METANO E SUAS APLICAÇÕES	15
3.4 TIPOS DE BIODIGESTORES	16
3.5 PARÂMETROS PARA DIGESTÃO ANAERÓBIA	18
3.6 ESTRUTURA DE UMA PLANTA DE BIOGÁS	19
3.7 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS	20
3.7.1 Dessulfurização	20
3.7.2 Secagem	22
3.8 ASPECTOS ENERGÉTICOS DO BIOGÁS	23
4 MATERIAS E MÉTODOS	25
4.1 CÁLCULOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA	25
4.2 DIMENSIONAMENTO DA PLANTA DE BIOGÁS NO CONDOMÍNIO E ECONOMIA DO SISTEMA	29
4.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE DESSULFURIZAÇÃO	30
4.3.1 Cálculo de densidade do biogás	31
4.3.2 Cálculo de densidade dos gases que compõem o biogás	33
4.3.3 Cálculo de vazões mássicas dos gases que compõem o biogás	33
4.3.4 Balanço massa global e de H ₂ S	34
4.3.5 Cálculo de solubilidade de gases e solutos e quantidade de NaOH e H ₂ O necessária na coluna de absorção	35

4.3.5.1 Solubilidade do gás sulfídrico e volume de água necessário	36
4.3.5.2 Solubilidade do CO ₂ , massa extra de NaOH necessária e balanço de massa de CO ₂	37
4.3.5.3 Conferência dos valores de solubilidade	38
5.3.6 Vazão da solução de NaOH na coluna de absorção	39
5 RESULTADOS	40
5.1 CÁLCULOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA	40
5.2 DIMENSIONAMENTO DA PLANTA DE BIOGÁS NO CONDOMÍNIO	41
5.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE DESSULFURIZAÇÃO	43
5.3.1 Cálculo de densidade do biogás	43
5.3.2 Cálculo de densidade dos gases que compõem o biogás	43
5.3.3 Cálculo de vazões mássicas dos gases que compõem o biogás	44
5.3.4 Balanço massa global e de H ₂ S	44
5.3.5 Cálculo de solubilidade de gases e solutos e quantidade de NaOH e H ₂ O necessária na coluna de absorção	45
5.3.5.1 Solubilidade do gás sulfídrico e volume de água necessário	45
5.3.5.2 Solubilidade do CO ₂ , massa extra de NaOH necessária e balanço de massa de CO ₂	46
5.3.5.3 Conferência dos valores de solubilidade	47
5.3.6 Vazão da solução de NaOH na coluna de absorção	47
6 CONCLUSÕES	51
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

O biogás é uma fonte de energia que pode ser obtida de diversos resíduos e efluentes que contenham matéria orgânica, sejam eles de origem urbana, industrial ou agrícola. No caso dos resíduos sólidos urbanos (RSU), originados em residências e instalações comerciais, seus destinos mais comuns são aterros e lixões, os quais muitas vezes não possuem sistemas para aproveitamento energético e precisam de vastas áreas, cujo tempo de vida é limitado.

Uma alternativa para o destino e tratamento de RSU são os biodigestores, reatores anaeróbios alimentados com material orgânico cujos principais produtos são o biogás e o biodigerido. O biogás é um material com elevada concentração energética e que pode ser aproveitado de diversas formas, como para geração de energia elétrica, térmica, mecânica, como combustível veicular e como gás de cozinha, junto ao gás natural encanado.

Atualmente, biodigestores para tratamento de RSU não são realidade no Brasil. Em outros países, como Alemanha, a abordagem é muito mais difundida. No entanto, o Brasil conta com alguns exemplos bem sucedidos que mostram a viabilidade técnica e econômica desse tipo de projeto. É o caso da CS Bioenergia, em Curitiba, e da UFMG, em Belo Horizonte, que têm biodigestores para tratamento de RSU gerados em suas respectivas regiões e aproveitamento energético do biogás produzido.

Para cada aplicação do biogás, há processos e equipamentos diferentes que são demandados para seu tratamento e uso. A aplicação mais comum do biogás é seu uso para geração de energia elétrica, através de sua queima em motores acoplados a geradores de eletricidade. Para que o biogás possa ser aproveitado, este deve passar por alguns tratamentos, que podem incluir remoção de gás sulfídrico, umidade, siloxanos e gás carbônico, a depender da aplicação.

O trabalho tem o objetivo de calcular o dimensionamento e definir especificações de equipamentos que envolvem operações unitárias para tratamento de biogás produzido. Para isso, foi delimitado o espaço de estudo, que foi o condomínio residencial Rubi Ville, administrado pela MRV, no bairro Jardim Nova Europa, em Campinas, SP.

Informações como quantos moradores habitam o espaço e a média de resíduos orgânicos que cada um gera por um dado período foram obtidas do próprio condomínio. Dados sobre a composição gravimétrica média dos RSU, e parâmetros cinéticos relevantes de produção de biogás em sistemas contínuos de tratamento de RSU foram obtidos da literatura científica. Dados sobre produção de biogás no sistema proposto foram calculados a partir das informações obtidas, e, com base nestes cálculos e no uso final proposto para o biogás, foi feito o dimensionamento dos equipamentos para seu tratamento.

No cenário proposto, as principais operações envolvidas para tratamento do biogás são a dessulfurização e secagem. A dessulfurização é comumente feita por meio de colunas de adsorção, ao passo que a secagem pode ser feita via condensação.

2 OBJETIVOS

O objetivo principal do projeto é dimensionar uma planta de biogás para um condomínio residencial de Campinas.

Os objetivos específicos são:

- Determinar a produção de biogás que pode ser obtida a partir do aproveitamento dos RSU do condomínio;
- Determinar o tipo e as dimensões do biodigestor, a partir dos cálculos de produção de biogás;
- Determinar os tipos de tecnologia e desenvolver o dimensionamento dos equipamentos para dessulfurização do biogás.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os resíduos sólidos urbanos, mais conhecidos por RSU, são os materiais descartados originais de residências e ambientes públicos, que comumente são direcionados para aterros ou lixões. Sua composição é variada, podendo conter restos de alimentos, papéis, latas, plásticos, metais, eletrônicos, dentre outros. No entanto, apenas a fração orgânica, proveniente de alimentos, dejetos, papéis e vegetais, pode ser aproveitada energeticamente via digestão anaeróbia.

Segundo dados do IPEA (2020), em 2018, foram gerados cerca de 79 milhões de toneladas de RSU no Brasil, o equivalente a pouco mais de um quilograma de RSU por dia por habitante. Desse total, cerca de 90% foi coletado e menos de 60% do coletado foi disposto em aterros sanitários, ao passo que o restante foi despejado em lixões ou depósitos irregulares. O aproveitamento energético dos RSU, no entanto, é ínfimo.

Existem diversas técnicas que permitem o aproveitamento dos RSU, como a compostagem, a incineração e a gaseificação. A compostagem consiste na degradação biológica da matéria orgânica, para obtenção de material rico em nutrientes, propício para aplicação industrial. Pode ocorrer a céu aberto e não envolve aproveitamento ou controle do gás produzido. A incineração é uma técnica muito usada em países e regiões com limitações de espaço físico. Consiste na combustão completa da matéria orgânica para geração de calor, que é usado para aquecer água e gerar vapor, o qual pode ser usado para aproveitamento energético. A gaseificação, por sua vez, envolve o aquecimento da matéria orgânica, sem que ocorra sua combustão, originando gases que podem ser aproveitados não só para geração de energia, mas também para síntese de outros compostos. Trata-se, no entanto, de uma técnica pouco usada (GOMES, 2018).

Além de tais técnicas, os RSU podem ser aproveitados pela digestão anaeróbia, explicada na seção a seguir.

3.2 DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia (DA) é a ferramenta mais utilizada para obter biogás a partir de resíduos e efluentes orgânicos. Representa um conjunto de reações metabólicas, desempenhadas por diversos microrganismos, através das quais macromoléculas, como açúcares, lipídios e proteínas são convertidas em moléculas cada vez menores e com elevada densidade energética (ADEKUNLE et al, 2015).

A DA é tradicionalmente dividida em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (ADEKUNLE et al, 2015). Na hidrólise, ocorre a quebra de macromoléculas e de grandes particulados sólidos. Nesta etapa, moléculas de difícil degradação, como lignina e celulose são decompostas em açúcares menores, como glicose e frutose. Por serem de difícil degradação, esta etapa costuma ser limitante, levando vários dias para ocorrer (GONZÁLEZ et al, 2018).

Na acidogênese e acetogênese, ocorre a conversão de açúcares, lipídios e proteínas, ou seja, moléculas com cinco ou mais carbonos, em moléculas com menos carbonos. Dentre as principais moléculas formadas, estão ácidos, cetonas, álcoois e aldeídos, as quais têm de dois a quatro carbonos. Nestas etapas também ocorre formação de gases, como dióxido de carbono e hidrogênio. Vários são os microrganismos responsáveis pelo metabolismo dessa etapa, mas sobretudo bactérias fermentadoras, como as dos gêneros *Clostridium*, *Bacillus* e *Lactobacillus*, as quais apresentam metabolismo e crescimento rápido, da ordem de horas a poucos dias. Também são organismos resilientes, com resistência a condições extremas (KANDYLIS et al, 2016).

Na metanogênese, as pequenas moléculas orgânicas formadas ao longo do processo são convertidas em gases, como metano e gás carbônico. Essa etapa é desenvolvida por arqueias metanogênicas, as quais apresentam metabolismo e crescimento lento, na ordem de semanas a meses. Por isso, a etapa da metanogênese costuma ser lenta e limitante, especialmente em condições instáveis e desfavoráveis aos microrganismos (ADEKUNLE et al, 2015).

O entendimento da digestão anaeróbia, assim como das condições ideais para os organismos que a compõem, é essencial para que a produção de biogás a partir de

resíduos seja eficiente e bem sucedida. De forma geral, é muito importante que as condições de cultivo dos microrganismos, como pH, temperatura, ausência de oxigênio e concentração de ácidos sejam mantidas o mais constante possível (KANDYLIS et al, 2016).

3.3 BIOGÁS, METANO E SUAS APLICAÇÕES

Os principais produtos de interesse que podem ser obtidos a partir da DA são biogás, metano, hidrogênio e biodigerido, os quais podem ser aplicados para diferentes finalidades dentro e fora da propriedade onde esteja a planta de biogás. Algumas de suas aplicações incluem geração de energia elétrica, geração de calor, uso como combustível por caminhões e tratores de frota agrícola, uso como combustível por veículos comuns, injeção na rede de gás natural e, no caso do biodigerido, uso como biofertilizante em campos e plantações (HOLM-NIELSEN et al, 2009).

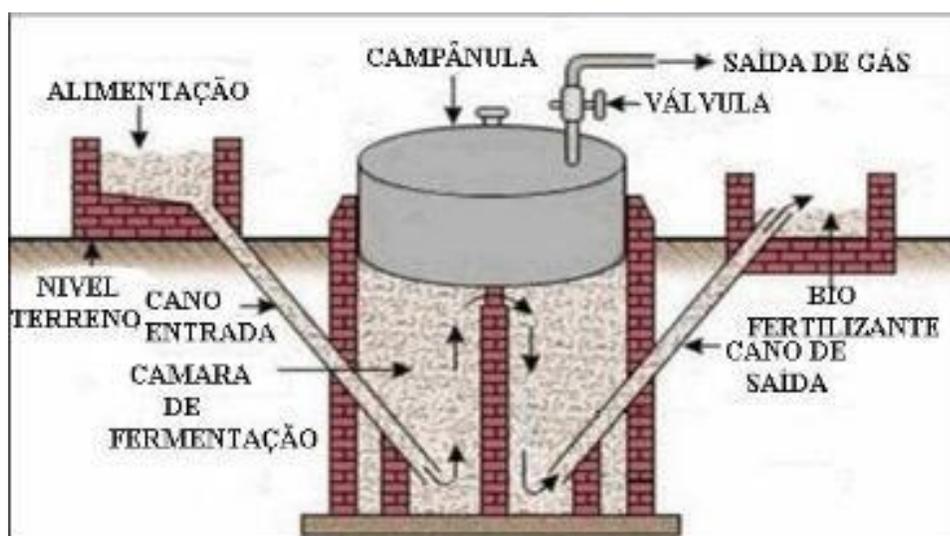
O biogás é o produto bruto obtido do processo, e, para que possa ser aproveitado, deve passar por etapas de purificação. O grau exigido de pureza depende de sua aplicação. Uma de suas possíveis aplicações é seu uso em motores para geração de energia elétrica. Para isso, substâncias corrosivas, como ácido sulfídrico, devem ser removidos (HOLM-NIELSEN et al, 2009). Outra aplicação é o seu uso como combustível para veículos diversos. Para esse propósito, além da remoção de substâncias nocivas a equipamentos, a concentração do CH₄ em níveis elevados exigidos por legislação também deve ser procedida, de forma a se obter o biometano. Esse combustível deve apresentar características similares ao gás natural veicular (GNV), disponível em postos de abastecimento (PASQUAL et al, 2017).

3.4 TIPOS DE BIODIGESTORES

Há vários tipos de biodigestores, e a sua escolha deve ser determinada de acordo com diversos parâmetros do substrato, tais como tipo, concentração de sólidos, umidade, volume produzido, frequência com que é produzido, necessidade de tratamento, carga orgânica e uso dos produtos dele derivados. Também depende da área disponível para construção, o quanto o proprietário está disposto a gastar e quanto tempo ele pode esperar pelo retorno do investimento. Logo, a escolha do tipo de biodigestor é complexa e precisa ser determinada com cautela (YU et al, 2010).

Os principais tipos de biodigestores são: modelo indiano, mistura completa, lagoa coberta e leito fixo. Biodigestores de modelo indiano são moldes simples e geralmente adotados para pequenas propriedades rurais. Trata-se de um tanque cilíndrico enterrado, feito de alvenaria, com uma tubulação de entrada que conduz a alimentação da superfície para o fundo do reator e outra, do lado oposto, que conduza o efluente tratado para a superfície novamente, por pressão hidrostática. É comum a instalação de uma barreira na parte central do tanque, para que a alimentação não seja destinada diretamente para a tubulação de saída e, portanto, percorra um maior trajeto ao longo do biodigestor. Geralmente é utilizado para tratamento de dejetos suínos e bovinos e seu porte é pequeno, de até 50 m³. O biogás é coletado em seu topo, com tubulações que o conduzem para o aproveitamento desejado (COSTA et al, 2016). A Figura 1 mostra o esquema de um biodigestor indiano.

Figura 1 – Biodigestor indiano.



Fonte: COSTA et al, 2016.

Biodigestores de mistura completa têm formato cilíndrico, com as dimensões de altura e diâmetro da base similares. Geralmente têm controle sobre temperatura. Recebe alimentação pela base e o efluente é retirado pela parte superior. É composto por hélices em seu interior, que giram com o auxílio de motores localizados externamente ao biodigestor. As hélices permitem homogeneizar o conteúdo do reator, de tal forma que, idealmente, as concentrações de qualquer composto sejam idênticas em qualquer ponto de seu interior, assim como em seu efluente. São mais adequados para tratamento de materiais com elevada concentração de sólidos (COLLINS et al, 2000)

Biodigestores de lagoa coberta (BLC) são reatores horizontais, com formato de paralelepípedo, com comprimento muito superior à altura e à largura e, por isso, demandam uma grande área. Podem ser enterrados ou não e podem ter agitação e aquecimento ou não. Geralmente são utilizados para materiais líquidos gerados em grande quantidade e que precisam de um tratamento antes de serem despejados na natureza. Indústrias de laticínios, que geram efluentes em grande quantidade, são um exemplo de onde esse tipo de biodigestor pode ser encontrado (PARK et al, 2007).

Biodigestores de leito fixo são reatores cilíndricos utilizados para efluentes com carga orgânica bastante diluída com demanda de tratamento rápido, como esgoto, por

exemplo, São reatores que retêm a biomassa microbiana em seu interior e permitem um fluxo rápido do efluente. Ocupam áreas pequenas, e costumam ter dimensões de 6 a 10 metros de altura e cerca de 3 metros de diâmetro. Sua agitação, ao contrário do reator de mistura completa, é feita por aeração a partir da base. Algumas ETEs costumam ter vários reatores de leito fixo agrupados em uma pequena área (SINGH et al, 2009).

3.5 PARÂMETROS PARA DIGESTÃO ANAERÓBIA

Alguns parâmetros são de importância fundamental no estudo da produção de biogás. Um dos mais importantes é o Tempo de Detenção Hidráulica (TDH), que é definido como o tempo médio que o substrato alimentado no reator fica em seu interior, antes de ser retirado. Deve ser determinado de acordo com sua degradabilidade. Por exemplo, se um material leva 30 dias para ser degradado ao máximo, o TDH adotado deve estar próximo desse valor (YADVIKA et al, 2004). O TDH pode ser calculado de acordo com a Equação 1,

$$TDH = \frac{V}{Q} \quad \text{(Eq. 1)}$$

em que Q é a vazão de alimentação e de saída de material do reator e V é o volume útil do reator. TDH é medido em dias.

O TDH deve levar em consideração o tipo de reator. Em um reator de mistura completa ou em um BLC, como não há retenção de microrganismos, eles saem junto com o efluente. Por isso, o TDH deve ter um limite mínimo, para que sua taxa de crescimento seja maior ou igual à sua taxa de saída. Caso contrário, pode ocorrer o fenômeno de *lavagem*, em que os os microrganismos são retirados do reator com muita rapidez, e não há suficiente deles para promover a produção de biogás. Já em um reator de leito fixo, o TDH pode ser bastante reduzido, uma vez que os microrganismos são retidos no interior do reator (YADVIKA et al, 2004).

Outro parâmetro importante é a carga orgânica volumétrica (COV), definida como

a quantidade de matéria orgânica que é alimentada diariamente no reator. É importante pois microrganismos têm um limite de tolerância a elevadas cargas orgânicas e, portanto, define o bom ou mal funcionamento do reator em termos de produção de biogás. Além disso, microrganismos levam tempo para se adaptar a mudanças de carga orgânica e, por isso, alimentações iniciais devem ter baixa carga orgânica, a qual deve ser aumentada gradualmente ao longo de semanas ou mesmo meses (YADVIKA et al, 2004). O cálculo para COV é feito de acordo com a Equação 2,

$$\text{COV} = \frac{Q \times S}{V} = \frac{S}{\text{TDH}} \quad (\text{Eq. 2})$$

em que S é a concentração de matéria orgânica do material que é alimentado no reator (g/L), e COV é a carga orgânica volumétrica, massa de matéria orgânica alimentada por volume do reator por dia (g L⁻¹ d⁻¹).

3.6 ESTRUTURA DE UMA PLANTA DE BIOGÁS

Uma planta de biogás é composta por diversos equipamentos, os quais devem ser considerados no cálculo do custo do projeto. O elemento principal da planta é o biodigestor, que pode ser construído com concreto, aço inoxidável ou polietileno de alta densidade. Além dele, a planta é dividida, de forma geral, entre as partes para as fases líquidas e gasosas (SAMER et al, 2012).

Para a parte para a fase líquida, devem ser construídos tanques para armazenamento do material de alimentação (se necessário, a depender do material e do processo que o gera) e do efluente do biodigestor (se necessário, a depender de seu destino final). Conexões entre todos os elementos são feitas com tubulações, válvulas e bombas hidráulicas (SAMER et al, 2012).

Para a parte para a fase gasosa é necessário um reservatório para armazenamento do biogás, o qual pode ser uma lona inflável de polietileno ou um tanque de aço inox reforçado com liga de cromo. Também são necessários equipamentos para

o sistema de purificação do biogás. Quanto mais refinado for o uso final do gás, mais complexo fica esse sistema. Mas, de forma geral, deve haver equipamentos para três tipos de tratamento do gás: remoção de umidade, de gás sulfídrico e de gás carbônico, de forma que a composição final do gás seja predominantemente metano (SAMER et al, 2012).

3.7 PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás produzido nos biodigestores dificilmente pode ser usado em sua forma bruta, devido à presença de componentes danosos e corrosivos, como gás sulfídrico e a própria umidade. Gás sulfídrico pode ser encontrado no biogás na concentração de 100 a 30.000 ppm, sendo que valores adequados para uso do biogás são de 1 ppm a 50 ppm. Por isso, o gás deve ser submetido a uma série de tratamentos que reduzam a quantidade desses componentes. Tais tratamentos envolvem operações unitárias, que podem ser diversas, dependendo do porte da planta, do tipo de aplicação e do orçamento disponível (PROBIOGAS, 2010).

3.7.1 Dessulfurização

A dessulfurização pode ser feita por métodos físicos, químicos e biológicos, ou mesmo uma combinação deles, sendo que o resultado pode ser uma remoção fina ou grossa. Também pode ser feita no interior do biodigestor ou fora dele.

Para remoção grossa e interna, uma alternativa é a injeção de jatos de ar, contendo oxigênio no biodigestor. Tal ação é favorável para o desenvolvimento de bactérias que convertem sulfeto em enxofre elementar. No entanto, tal técnica traz uma série de desvantagens, pois reduz a anaerobiose do reator, reduzindo com isso a eficiência de produção de metano, reduz a concentração do metano no biogás, uma vez que outros gases, como oxigênio e nitrogênio, passam a compô-lo, e aumenta o risco de

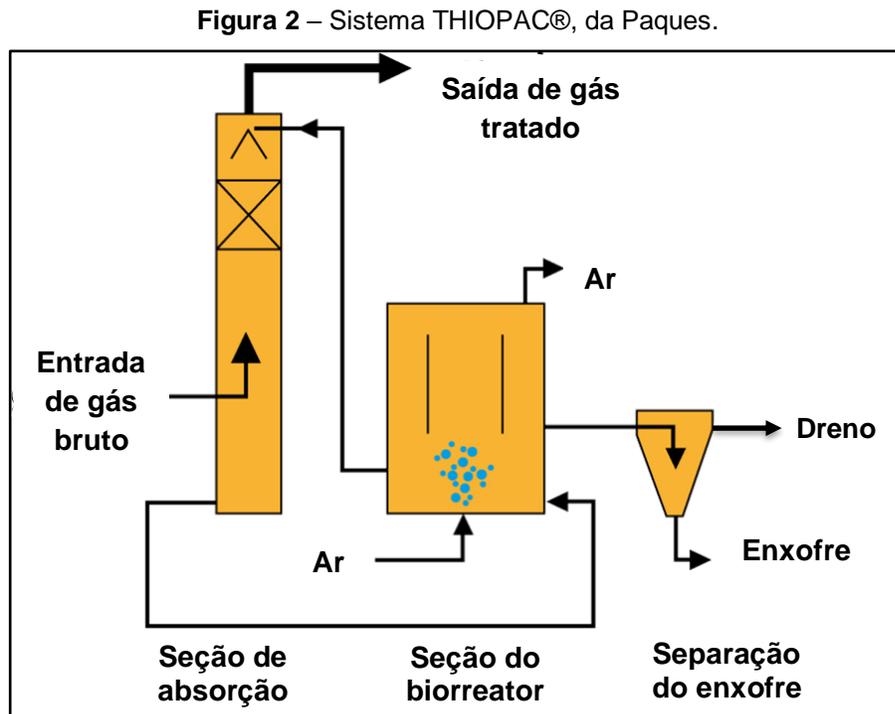
explosões, uma vez que há a adição de um comburente (oxigênio) a um combustível (metano). Outra alternativa para remoção interna é a adição de ferro, causando a precipitação do enxofre (PROBIOGAS, 2010).

Métodos externos ao reator podem envolver tanto absorção quanto adsorção. Na remoção por absorção, o biogás é direcionado para uma coluna com solução de soda cáustica ou hidróxido de ferro, onde o sulfeto de enxofre é retido e o metano, junto a outras moléculas, passam de forma inerte. A solução é regenerada com a injeção de ar, com a qual o enxofre é precipitado e recuperado em um separador. Na remoção por adsorção, são utilizadas colunas de carvão ativado, onde ocorre a retenção do gás sulfídrico. Para que a remoção seja eficiente, deve ocorrer a impregnação da coluna com compostos oxidantes, como permanganato de potássio ou iodeto de potássio, na presença de vapor e oxigênio (PROBIOGAS, 2010).

Dessulfurização do biogás é a separação do sulfeto de hidrogênio dos demais gases que compõem o biogás, como metano e gás carbônico. Sua remoção é fundamental por razões de saúde, segurança, meio ambiente e manutenção dos equipamentos, visando evitar a corrosão de caldeiras, motores e tubulações.

Uma tecnologia disponível no mercado é o sistema THIOPAC®, da empresa Paques. Que converte o enxofre do H_2S em enxofre elementar, o qual pode ser usado como fertilizante natural. Nesse sistema, não há injeção de ar ou oxigênio no biogás, fator que aumenta a segurança do sistema. O sistema consiste em uma coluna de absorção conectada com um biorreator e um decantador. O biogás produzido entra pela base da coluna, que recebe pelo topo água levemente alcalinizada do biorreator, no sentido contrário do gás. A água, que absorveu o sulfeto, retorna ao biorreator pela base da coluna e o gás é liberado pelo topo da coluna. O biorreator é preenchido com água levemente alcalinizada e bactérias autotróficas de enxofre, as quais convertem sulfeto dissolvido na água em enxofre elementar, na presença de oxigênio, que é bombeado no biorreator pela sua base. Conectado ao biorreator está um decantador e, à medida que a oxidação do enxofre ocorre, o enxofre elementar, sólido, é decantado e coletado na base do decantador. Portanto, o sistema combina abordagens físicas, químicas e biológicas para a remoção do sulfeto no biogás, podendo alcançar taxas de remoção de 99,5 %. O sistema da Paques permite vazões de gás de 50 Nm^3 a 2500 Nm^3 por hora e

cargas de enxofre de até 600 kg por dia. A Figura 2 esquematiza o funcionamento do sistema THIOPAC®.



Fonte: PAQUES (adaptado).

3.7.2 Secagem

A secagem do biogás consiste na remoção de vapor de água e ocorre após a etapa de dessulfurização. Pode ser desenvolvida por condensação, absorção ou adsorção. Na remoção por condensação, o biogás é resfriado a uma temperatura abaixo do ponto de orvalho da água, para que o vapor seja convertido em líquido. O resfriamento pode ser feito na própria tubulação, que deve conduzir a água a um ponto de coleta, ou em um equipamento específico. Na remoção por absorção, o biogás é conduzido a uma coluna com glicol, o qual retém umidade e outras moléculas indesejadas. Para a regeneração do fluido, ele deve ser aquecido a temperaturas acima do ponto de bolha da

água. Na remoção por adsorção, utilizam-se materiais que retém umidade em sua superfície, como gel de sílica, óxidos de alumínio ou zeólitos, que também podem ser regenerados por aquecimento (PROBIOGAS, 2010).

3.8 ASPECTOS ENERGÉTICOS DO BIOGÁS

Para que um projeto de uma planta de biogás seja bem sucedido, alguns parâmetros devem ser calculados.

Ensaio em escalas laboratorial e piloto permitem conhecer as características do material a ser alimentado no reator, assim como TDH e COV adequados e, por consequência, quanto de biogás a planta é capaz de produzir por dia.

Tendo tais dados calculados, é necessário contabilizar todos os custos iniciais para construção da planta, conhecidos como *Capex (Capital Expenditure)*, e os custos mensais para operação da planta, conhecidos como *Opex (Operational Expenditure)*, assim como todas as receitas mensais obtidas com o aproveitamento do biogás (WOJCIECH et al, 2015). Dessa forma é possível calcular o *Payback*, ou seja, o tempo necessário para que as receitas mensais paguem o investimento inicial. Para grandes projetos de plantas de biogás, valores aceitáveis de *Payback* ficam entre 5 a 10 anos (MEL et al, 2014).

Deve-se também determinar qual é a forma de aproveitamento do biogás, pois, a depender da escolha, equipamentos distintos são demandados. Para aproveitamento na forma de energia elétrica, são necessários motores geradores que queimem o biogás e convertam sua energia em eletricidade, a qual pode ser vendida para a rede elétrica ou utilizada na própria instalação industrial.

Para o aproveitamento na forma de combustível veicular são necessárias adaptações dos veículos que utilizarão o gás. Tal adaptação consiste em instalação de cilindros propícios para armazenamento do gás e modificação do motor para que eles funcionem à base de combustível gasoso.

Para o aproveitamento na forma de gás natural, é necessário um sistema de

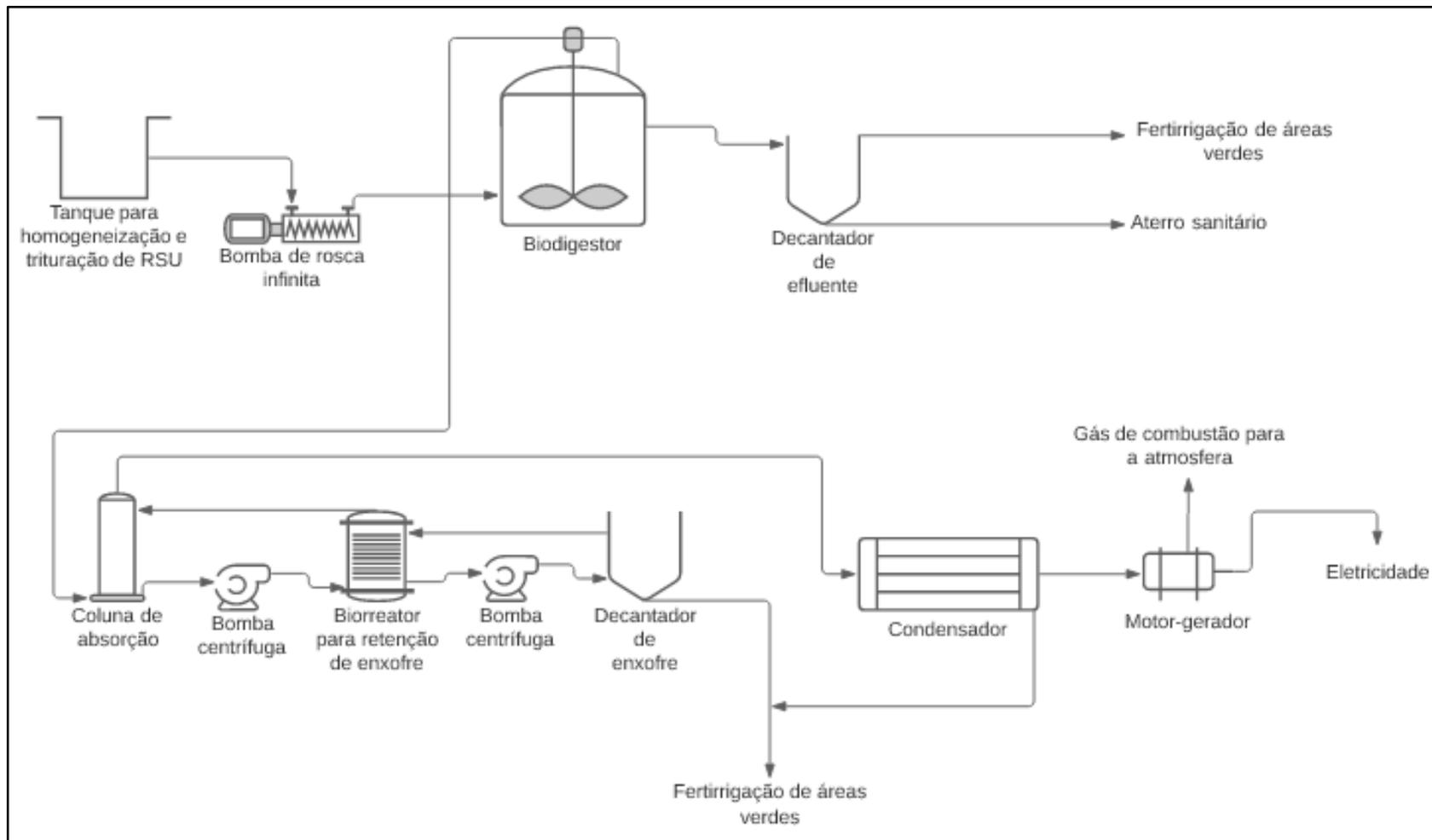
purificação refinado, para que o gás esteja nas mesmas especificações do gás natural encanado, além de precisar de um sistema para injeção do gás. O biogás também pode ser usado nas próprias instalações industriais para aquecimento ou cozimento.

4 MATERIAS E MÉTODOS

4.1 CÁLCULOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA

O sistema avaliado foi um biodigestor de mistura completa, com alimentação intermitente, operando como batelada sequencial, no qual a alimentação ocorre uma vez por semana. Da mesma forma, a retirada de efluente do biodigestor também ocorre semanalmente, em volume igual à alimentação, de forma a manter o volume útil do reator constante. A saída de gás do reator deve ser conectada com uma coluna de absorção de gás sulfídrico, e esta conectada com um condensador de gás, que por sua vez, deve ser conectado a um motor gerador de eletricidade para aproveitamento do biogás. A coluna de absorção deve ser conectada a um biorreator para regeneração do líquido de lavagem do gás, e este conectado a um decantador para captação de enxofre. O efluente do biodigestor, o enxofre captado no decantador e a água coletada no condensador são direcionados para fertirrigação de áreas verdes do condomínio e arredores, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Sistema de produção, tratamento e aproveitamento de biogás a partir de RSU em condomínio.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

O propósito do trabalho é determinar o volume de biogás que o sistema pode produzir, a energia elétrica que pode ser obtida e as informações necessárias para dimensionar o biodigestor e os sistemas de dessulfurização e secagem.

O primeiro passo para determinação da quantidade de biogás e energia que o sistema pode gerar é obter a informação do quanto de RSU é gerado no condomínio por intervalo de tempo. Tal informação foi buscada com a administração sindical do condomínio. É importante destacar que há sazonalidade na geração de RSU, uma vez que em dias úteis a geração é menor que em fins de semana e feriados. Logo, foi considerada a média diária da massa de RSU gerada (simbolizada por $m_{RSU; DIA}$), calculada pela massa de RSU gerada em uma semana, em média, dividido por 7.

Uma vez com essas informações, o próximo passo é encontrar parâmetros experimentais na literatura que permitam calcular o volume de biogás que pode ser produzido, a frequência e o quanto de energia ele pode fornecer. Os parâmetros utilizados são o rendimento de conversão de matéria orgânica adicionada ao sistema em biogás, a porcentagem de metano no biogás, o poder calorífico inferior do metano e a eficiência de conversão da energia química da combustão do metano em energia elétrica.

Os cálculos são feitos de acordo com as Equações 3, 4, 5 e 6 e foram adaptados da metodologia utilizada em Jiménez-Castro et al (2020). A Equação 3 fornece o volume de biogás que pode ser produzido a partir do RSU acumulado em uma semana; a Equação 4 calcula a energia aproveitável obtida máxima por massa de matéria orgânica (MO) adicionada no biodigestor; a Equação 5 fornece a energia máxima que pode ser obtida no período de um ano; e a Equação 6 fornece a potência máxima que pode ser adquirida em uma planta de biogás, considerando seu tempo de operação ao longo de um ano.

$$V_{BIOGAS; DIA} = \frac{m_{RSU; DIA} \times S_{MO; RSU} \times Y_{BIOGAS; MO}}{\rho_{RSU}} \quad \text{(Eq. 3)}$$

Em que:

$V_{BIOGAS; DIA}$: volume de biogás produzido em um dia ($Nm^3 \text{ dia}^{-1}$);

$S_{MO; RSU}$: concentração de matéria orgânica no RSU, de acordo com literatura científica

(kgSV m³RSU⁻¹);

ρ_{RSU} : densidade média do RSU (kg m⁻³)

$m_{RSU; DIA}$: massa de RSU acumulado em um dia (kg dia⁻¹);

Y_{BIOGAS} : rendimento de conversão de matéria orgânica de RSU em biogás, de acordo com a literatura (Nm³ kgSV⁻¹).

$$\frac{E_{max}}{m_{RSU}} = \frac{m_{RSU; DIA} \times S_{MO; RSU} \times Y_{BIOGAS; MO} \times P_{CH_4} \times PCI \times FC \times \eta_{engine}}{\rho_{RSU}} \quad (\text{Eq. 4})$$

Em que:

$\frac{E_{max}}{m_{RSU}}$: energia máxima gerada por unidade de massa de RSU (kWh x kgRSU⁻¹);

P_{CH_4} : porcentagem de metano em biogás derivado de RSU (%);

PCI : poder calorífico inferior do metano (kJ x m⁻³);

FC : fator de conversão de kJ para kWh (2,77778 x 10⁻⁴ kWh x kJ⁻¹);

η_{engine} : eficiência de um motor de combustão a metano na conversão da energia química em energia elétrica (%).

$$E_{max} = \frac{E_{max}}{m_{RSU}} \times m_{RSU; DIA} \quad (\text{Eq. 5})$$

Em que:

E_{max} : energia máxima que pode ser obtida a partir de um substrato ou mistura de substratos durante um dia (kWh)

$$P_{max} = \frac{E_{max}}{t} \quad (\text{Eq. 6})$$

Em que:

P_{max} : potência máxima da planta de biogás (kW)

t : tempo de operação da planta ao longo de um dia (24h)

4.2 DIMENSIONAMENTO DA PLANTA DE BIOGÁS NO CONDOMÍNIO E ECONOMIA DO SISTEMA

O dimensionamento do biodigestor foi feito a partir da vazão de RSU e do TDH estimado para sua operação, de acordo com as Equações 7 a 13. De acordo com a PROBIOGÁS (2010) e EI-MASHAD & ZHANG (2010), um valor adequado de TDH para tratamento de RSU é de 20 ou mais dias, dependendo da temperatura e configuração do reator. Para o cálculo proposto, foi adotado o valor de TDH igual a 30 dias, valor considerado por PROBIOGÁS (2010) como adequado para obter um bom rendimento. Para determinar as dimensões do biodigestor, foi adotada a relação de diâmetro igual à altura do corpo cilíndrico, conforme mostram as equações a seguir. A área total é determinada pela área lateral somada à área da base, partes compostas por material rígido, como aço inoxidável. A parte superior do biodigestor deve ser composta por um material flexível e impermeável a gás, como uma lona de polietileno, que permita expansão quando o gás for produzido e sirva como estrutura para armazenamento do biogás. As proporções das dimensões do biodigestor seguem a recomendação de PROBIOGÁS (2010), em que a altura deve ser o dobro do raio, para que a transferência de massa em seu interior ocorra da forma mais efetiva possível. Além disso, para se obter o volume total do corpo do biodigestor, o produto ($Q \times TDH$), que representa o volume útil no interior, é multiplicado por 1,1, de forma que haja um volume extra não ocupado pela fase líquida, que servirá como headspace e evitará problemas de acúmulo, extravasamento ou entupimento de dutos de gás, gerando maior segurança ao sistema.

$$V_R = 1,1 (Q \times TDH) \quad \text{(Eq. 7)}$$

$$V_R = \left(\frac{4}{3}\right) \times \pi R^3 \quad \text{(Eq. 8)}$$

$$R = \left(\frac{3V}{4\pi}\right)^{1/3} \quad \text{(Eq. 9)}$$

$$R = \left(\frac{3Q \times TDH}{4\pi}\right)^{1/3} \quad \text{(Eq. 10)}$$

$$A_B = \pi R^2 \quad \text{(Eq. 11)}$$

$$A_L = 2\pi R H = 4\pi R^2 \quad \text{(Eq.12)}$$

$$A_T = A_B + A_L \quad (\text{Eq.13})$$

Em que:

V_R : volume do reator;

Q : vazão de RSU no reator, igual à massa de RSU acumulada em um dia, ou seja, igual a $m_{RSU; DIA}$;

TDH: tempo de detenção hidráulica aplicado ao reator;

R : raio do reator;

H : altura do reator;

A_B : área da base do reator;

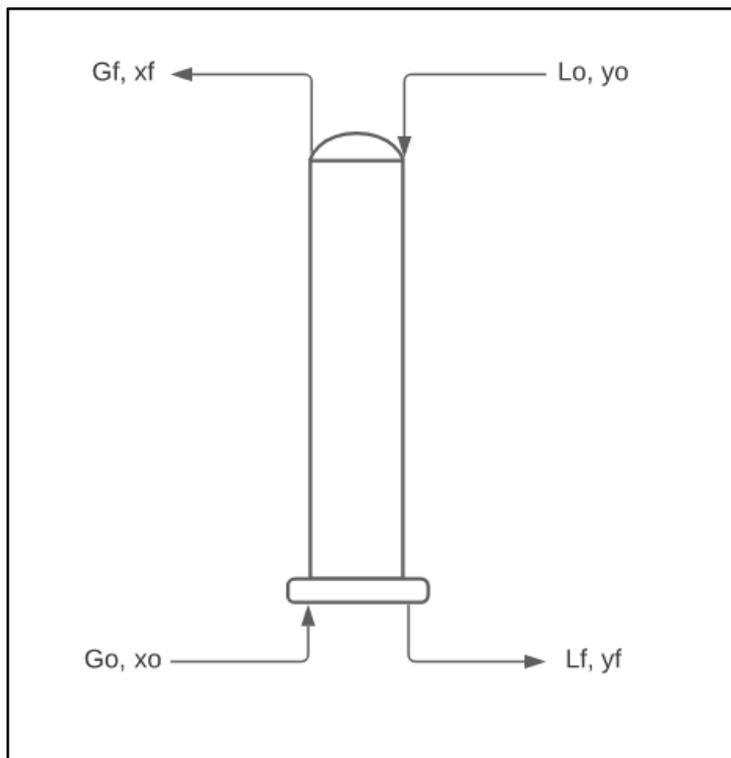
A_L : área lateral do reator;

A_T : área total do reator.

4.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE DESSULFURIZAÇÃO

De acordo com PORTO *et al.* (2016), uma coluna de absorção deve ter o formato cilíndrico, com uma entrada de gás próximo à base e saída de gás próximo ao topo, assim como entrada de líquido próximo ao topo e saída do líquido próximo à base, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – Esquema de uma coluna de absorção e seus fluxos de líquido e gás. G: gás; L: líquido; x: fração do gás; y: fração do líquido; o: entrada; f: saída.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

4.3.1 Cálculo de densidade do biogás

De PROBIOGÁS (2010), obtém-se a composição média do biogás em fração molar ou volumétrica, conforme mostra a Tabela 1. Com base nesses dados, para os cálculos propostos, foram utilizados os valores de concentração molar de 50 % de CH₄, 45 % de CO₂, 4,5% de H₂O e 0,5 % de H₂S.

Tabela 1 – Composição média do biogás. Fonte: PROBIOGÁS (2010).

Molécula	Fração molar (%)
CH ₄	50 – 75
CO ₂	25 - 45
H ₂ S	0,002 - 2
Vapor de água	2 - 7
N ₂	<2
O ₂	<1

Para determinar a massa do biogás, é necessário calcular sua densidade, conforme a Equação 14, deduzida a seguir.

$$\rho_{\text{BIOGAS}} = (\rho_{\text{CH}_4} \times P_{\text{CH}_4}) + (\rho_{\text{CO}_2} \times P_{\text{CO}_2}) + (\rho_{\text{H}_2\text{S}} \times P_{\text{H}_2\text{S}}) + (\rho_{\text{H}_2\text{O}} \times P_{\text{H}_2\text{O}})$$

$$\rho_{\text{BIOGAS}} = \left(\frac{m_{\text{CH}_4}}{V_{\text{CH}_4}} \times P_{\text{CH}_4}\right) + \left(\frac{m_{\text{CO}_2}}{V_{\text{CO}_2}} \times P_{\text{CO}_2}\right) + \left(\frac{m_{\text{H}_2\text{S}}}{V_{\text{H}_2\text{S}}} \times P_{\text{H}_2\text{S}}\right) + \left(\frac{m_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} \times P_{\text{H}_2\text{O}}\right)$$

$$\rho_{\text{BIOGAS}} = \left(\frac{n_{\text{CH}_4} \times M_{\text{CH}_4}}{V_{\text{CH}_4}} \times P_{\text{CH}_4}\right) + \left(\frac{n_{\text{CO}_2} \times M_{\text{CO}_2}}{V_{\text{CO}_2}} \times P_{\text{CO}_2}\right) + \left(\frac{n_{\text{H}_2\text{S}} \times M_{\text{H}_2\text{S}}}{V_{\text{H}_2\text{S}}} \times P_{\text{H}_2\text{S}}\right) + \left(\frac{n_{\text{H}_2\text{O}} \times M_{\text{H}_2\text{O}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} \times P_{\text{H}_2\text{O}}\right)$$

$$\rho_{\text{BIOGAS}} = \left(\frac{M_{\text{CH}_4}}{VM} \times P_{\text{CH}_4}\right) + \left(\frac{M_{\text{CO}_2}}{VM} \times P_{\text{CO}_2}\right) + \left(\frac{M_{\text{H}_2\text{S}}}{VM} \times P_{\text{H}_2\text{S}}\right) + \left(\frac{M_{\text{H}_2\text{O}}}{VM} \times P_{\text{H}_2\text{O}}\right)$$

$$\rho_{\text{BIOGAS}} = \frac{(M_{\text{CH}_4} \times P_{\text{CH}_4}) + (M_{\text{CO}_2} \times P_{\text{CO}_2}) + (M_{\text{H}_2\text{S}} \times P_{\text{H}_2\text{S}}) + (M_{\text{H}_2\text{O}} \times P_{\text{H}_2\text{O}})}{VM}$$

Eq. 14

Em que:

ρ : densidade do gás (kg m⁻³)

P: porcentagem do gás no biogás (%)

m: massa do gás (kg)

V: volume do gás (m³)

M: massa molar do gás (kg mol⁻¹)

VM: volume molar dos gases (22,4 mol L⁻¹)

4.3.2 Cálculo de densidade dos gases que compõem o biogás

O balanço de massa também depende, além da massa total de biogás que entra no sistema, das massas específicas de cada gás que compõe o biogás. Por isso, são necessários os valores de densidade de cada gás, os quais são obtidos a partir das Equações 15 a 17 a seguir.

$$\rho_{\text{CH}_4} = \frac{M_{\text{CH}_4}}{V_M} \quad \text{Eq. 15}$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{M_{\text{CO}_2}}{V_M} \quad \text{Eq. 16}$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{M_{\text{H}_2\text{S}}}{V_M} \quad \text{Eq. 17}$$

4.3.3 Cálculo de vazões mássicas dos gases que compõem o biogás

As vazões volumétricas de biogás e de cada gás são calculadas a partir das Equações 18 a 21, e as vazões mássicas são calculadas a partir das Equações 22 a 25 a seguir.

$$V_{\text{BIOGAS}; \text{DIA}} = V_{\text{CH}_4; \text{DIA}} + V_{\text{CO}_2; \text{DIA}} + V_{\text{H}_2\text{S}; \text{DIA}} \quad \text{Eq. 18}$$

$$V_{\text{CH}_4; \text{DIA}} = V_{\text{BIOGAS}; \text{DIA}} \times P_{\text{CH}_4} \quad \text{Eq. 19}$$

$$V_{\text{CO}_2; \text{DIA}} = V_{\text{BIOGAS}; \text{DIA}} \times P_{\text{CO}_2} \quad \text{Eq. 20}$$

$$V_{\text{H}_2\text{S}; \text{DIA}} = V_{\text{BIOGAS}; \text{DIA}} \times P_{\text{H}_2\text{S}} \quad \text{Eq. 21}$$

$$m_{\text{BIOGAS}; \text{DIA}} = V_{\text{BIOGAS}; \text{DIA}} \times \rho_{\text{BIOGAS}} \quad \text{Eq. 22}$$

$$m_{\text{CH}_4; \text{DIA}} = V_{\text{CH}_4; \text{DIA}} \times \rho_{\text{CH}_4} = V_{\text{BIOGAS}; \text{DIA}} \times P_{\text{CH}_4} \times \rho_{\text{CH}_4} \quad \text{Eq. 23}$$

$$m_{\text{CO}_2; \text{DIA}} = V_{\text{CO}_2; \text{DIA}} \times \rho_{\text{CO}_2} = V_{\text{BIOGAS}; \text{DIA}} \times P_{\text{CO}_2} \times \rho_{\text{CO}_2} \quad \text{Eq. 24}$$

$$m_{\text{H}_2\text{S}; \text{DIA}} = V_{\text{H}_2\text{S}; \text{DIA}} \times \rho_{\text{H}_2\text{S}} = V_{\text{BIOGAS}; \text{DIA}} \times P_{\text{H}_2\text{S}} \times \rho_{\text{H}_2\text{S}} \quad \text{Eq. 25}$$

4.3.4 Balanço massa global e de H₂S

As Equações 26 a 32 a seguir se referem ao balanço de massa dos gases para o interior da coluna de absorção, comparando suas entradas e saídas. As Equações 26 a 28 referem-se ao balanço de massa global do biogás, ao passo que as Equações 29 a 32 referem-se ao balanço de massa específico para H₂S, gás que deve ser removido.

O balanço de massa do CO₂ é posteriormente calculado, pois depende do balanço de massa de H₂S, uma vez que este determina a vazão diária de água na coluna e esta, por sua vez, determina a massa diária de CO₂ que se solubiliza na água.

O balanço de massa de CH₄ não é contabilizado pelo fato de este gás ser considerado inerte no interior da coluna, devido à sua baixa solubilidade (cerca de 40 vezes menor que a do CO₂ e 200 vezes menor que a do H₂S) e pelo fato de ser o gás de interesse, que deve, portanto, ser mantido em sua integridade na saída de gás da coluna. Dessa forma, o balanço de massa específico do CH₄ corresponderia a massa de CH₄ na entrada de gás igual à massa de CH₄ na saída de gás, ambos iguais à massa de CH₄ presente no biogás que entrou na coluna. Além disso, a massa de CH₄ na entrada de líquido seria igual à massa de CH₄ na saída de líquido, ambos iguais a zero.

Em cada balanço de massa, a massa de entrada do gás na fase gasosa refere-se à massa deste gás presente no biogás que entra no sistema por unidade de tempo. A massa de entrada do gás pela fase líquida é considerada como zero. Isso se deve ao fato de a água que entra na coluna ser um líquido que passou pelo processamento biológico do biorreator de algas e, por isso, os gases antes retirados da coluna foram biologicamente retidos e processados na seção do biorreator, liberando uma água limpa para retornar à coluna de absorção.

A massa de saída de cada gás foi específica: para o H₂S, baseou-se no mínimo permitido por uma legislação específica para estar presente no biogás, conforme mostra a Equação 32 e, com base nessa quantidade mínima, os parâmetros operacionais da coluna foram calculados. A legislação considerada foi a Resolução nº 8 da ANP, de 2015, que afirma que o biogás, para ser usado como biometano, deve conter no máximo 10 ppm de H₂S; para o CO₂, se baseia no quanto este gás se solubiliza na água e reage

com NaOH, formando Na₂CO₃. Por esta razão, a quantidade de NaOH adicionada ao sistema deve estar em excesso, de forma que todo o H₂S necessário reaja com a base, uma vez que parte do CO₂ irá reagir com ela.

$$m_{\text{LIQ;ENTRADA}} + m_{\text{GAS;ENTRADA}} = m_{\text{LIQ;SAIDA}} + m_{\text{GAS;SAIDA}} \quad \text{Eq. 26}$$

$$m_{\text{GAS;ENTRADA}} = m_{\text{BIOGAS;DIA}} \quad \text{Eq. 27}$$

$$m_{\text{LIQ;ENTRADA}} + m_{\text{BIOGAS;DIA}} = m_{\text{LIQ;SAIDA}} + m_{\text{GAS;SAIDA}} \quad \text{Eq. 28}$$

$$m_{\text{H}_2\text{S;LIQ;ENTRADA}} + m_{\text{H}_2\text{S;GAS;ENTRADA}} = m_{\text{H}_2\text{S;LIQ;SAIDA}} + m_{\text{H}_2\text{S;GAS;SAIDA}} \quad \text{Eq. 29}$$

$$m_{\text{H}_2\text{S;GAS;ENTRADA}} = m_{\text{H}_2\text{S;DIA}} \quad \text{Eq. 30}$$

$$m_{\text{H}_2\text{S;LIQ;ENTRADA}} + m_{\text{H}_2\text{S;DIA}} = m_{\text{H}_2\text{S;LIQ;SAIDA}} + m_{\text{H}_2\text{S;GAS;SAIDA}} \quad \text{Eq. 31}$$

$$m_{\text{H}_2\text{S;GAS;SAIDA}} = \frac{P_{\text{LEGISLAÇÃO}}}{P_{\text{H}_2\text{S}}} \times m_{\text{H}_2\text{S;DIA}} \quad \text{Eq. 32}$$

Em que:

$m_{\text{LIQ;ENTRADA}}$: massa de gás presente na fase líquida na entrada da coluna (kg dia⁻¹);

$m_{\text{GAS;ENTRADA}}$: massa de gás presente na fase gasosa na entrada da coluna (kg dia⁻¹);

$m_{\text{LIQ;SAIDA}}$: massa de gás presente na fase líquida na saída da coluna (kg dia⁻¹);

$m_{\text{GAS;SAIDA}}$: massa de gás presente na fase gasosa na saída da coluna (kg dia⁻¹).

Na presença dos subscritos H₂S e CO₂, refere-se às massas desses gases; na ausência dessa indicação, refere-se ao biogás.

4.3.5 Cálculo de solubilidade de gases e solutos e quantidade de NaOH e H₂O necessária na coluna de absorção

Para os cálculos de solubilidade, são utilizados os valores de solubilidade em água mostrados na Tabela 2. Para fins práticos, a solubilidade do CH₄ foi assumida como zero neste projeto, por ser muito menor que os valores das demais moléculas.

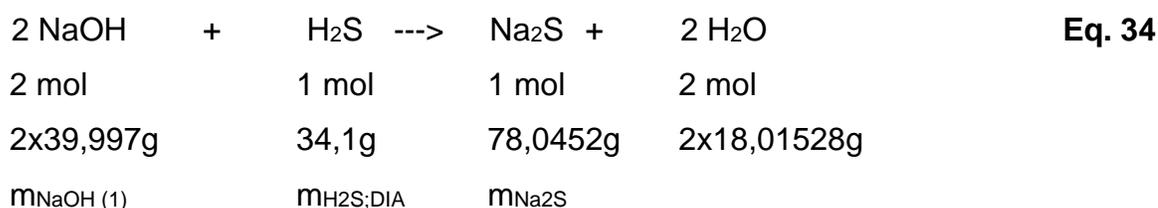
Tabela 2 – Solubilidade em água das moléculas de interesse na coluna de absorção na pressão atmosférica.

Molécula	Solubilidade em água (g L ⁻¹)
H ₂ S	6,72
Na ₂ S	186
CO ₂	1,45
Na ₂ CO ₃	300
NaHCO ₃	78
CH ₄	0,035

4.3.5.1 Solubilidade do gás sulfídrico e volume de água necessário

O volume de água necessário por dia para entrar na coluna de absorção é calculado de acordo com a Equação 33. A massa de NaOH necessária para reagir com o H₂S dissolvido e a massa de Na₂S formado são calculadas a partir das relações estequiométricas da Equação 34 e das Equações 35 e 36.

$$V_{H_2O} = \frac{m_{H_2S}}{SOL_{H_2S}} \quad \text{Eq. 33}$$



$$m_{\text{NaOH}}(1) = \frac{2 \times 39,997 \times m_{\text{H}_2\text{S};\text{DIA}}}{34,1} = 2,3459 \times m_{\text{H}_2\text{S};\text{DIA}} \quad \text{Eq. 35}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{S}} = \frac{78,0452 \times m_{\text{H}_2\text{S};\text{DIA}}}{34,1} = 2,2887 \times m_{\text{H}_2\text{S};\text{DIA}} \quad \text{Eq. 36}$$

Em que:

V_{H₂O}: volume de água que entra na coluna de absorção diariamente (L dia⁻¹);

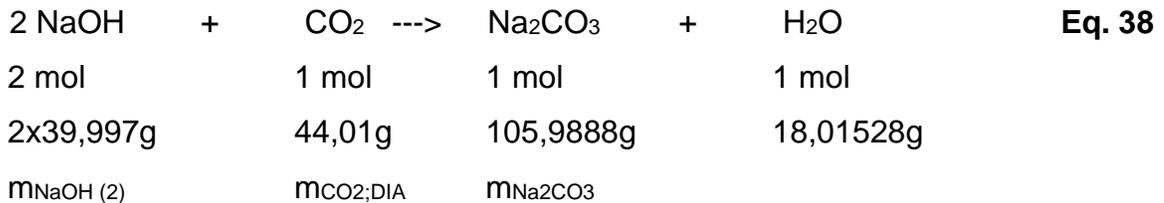
SOL_{H₂S}: solubilidade do H₂S em água (g L⁻¹);

$m_{\text{NaOH (1)}}$: massa de NaOH necessária para neutralizar todo H_2S dissolvido (kg dia^{-1});
 $m_{\text{Na}_2\text{S}}$: massa de Na_2S produzido a partir do H_2S (kg dia^{-1}).

4.3.5.2 Solubilidade do CO_2 , massa extra de NaOH necessária e balanço de massa de CO_2

A massa de CO_2 capaz de se dissolver no volume de água que entra diariamente na coluna de absorção é calculada de acordo com a Equação 37. A massa de NaOH extra necessária para reagir com o CO_2 dissolvido e a massa de Na_2CO_3 formado são calculadas a partir das relações estequiométricas da Equação 38 e das Equações 39 e 40. A massa total de NaOH necessária para entrar na coluna diariamente é dada pela soma das massas necessárias para reagir com H_2S e CO_2 , de acordo com a Equação 41.

$$m_{\text{CO}_2;\text{SOLUVEL}} = V_{\text{H}_2\text{O}} \times \text{SOL}_{\text{CO}_2} = m_{\text{CO}_2;\text{LIQ};\text{SAIDA}} \quad \text{Eq. 37}$$



$$m_{\text{NaOH (2)}} = \frac{2 \times 39,997 \times m_{\text{CO}_2;\text{SOLUVEL}}}{44,01} = 1,8176 m_{\text{CO}_2;\text{SOLUVEL}} \quad \text{Eq. 39}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = \frac{105,9888 \times m_{\text{CO}_2;\text{SOLUVEL}}}{44,01} = 2,4083 m_{\text{H}_2\text{S};\text{DIA}} \quad \text{Eq. 40}$$

$$m_{\text{NaOH}} = m_{\text{NaOH (1)}} + m_{\text{NaOH (2)}} \quad \text{Eq. 41}$$

Em que:

SOL_{CO_2} : solubilidade do CO_2 em água (g L^{-1});

$m_{\text{NaOH (2)}}$: massa de NaOH necessária para neutralizar todo CO_2 dissolvido (kg dia^{-1});

m_{NaOH} : massa de NaOH necessária para neutralizar todo H_2S e CO_2 dissolvidos (kg dia^{-1});

$m_{\text{CO}_2;\text{SOLUVEL}}$: massa de CO_2 que se solubiliza em água (kg dia^{-1});

$m_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$: massa de Na_2CO_3 produzido a partir do CO_2 (kg dia^{-1}).

A partir do valor de $m_{\text{CO}_2;\text{LIQ};\text{SAIDA}}$, calculado a partir do volume diário de água e da solubilidade do CO_2 em água (Equação 37), e de $m_{\text{CO}_2;\text{GAS};\text{ENTRADA}}$, equivalente a $m_{\text{CO}_2;\text{DIA}}$ (Equação 43) e assumindo $m_{\text{CO}_2;\text{LIQ};\text{ENTRADA}}$ igual a zero, é possível desenvolver o balanço de massa do CO_2 , para obter o valor de $m_{\text{CO}_2;\text{GAS};\text{SAIDA}}$, que fará parte da composição final do biogás tratado. As Equações 42 a 44 mostram o balanço de massa do CO_2 .

$$m_{\text{CO}_2;\text{LIQ};\text{ENTRADA}} + m_{\text{CO}_2;\text{GAS};\text{ENTRADA}} = m_{\text{CO}_2;\text{LIQ};\text{SAIDA}} + m_{\text{CO}_2;\text{GAS};\text{SAIDA}} \quad \text{Eq. 42}$$

$$m_{\text{CO}_2;\text{GAS};\text{ENTRADA}} = m_{\text{CO}_2;\text{DIA}} \quad \text{Eq. 43}$$

$$m_{\text{CO}_2;\text{LIQ};\text{ENTRADA}} + m_{\text{CO}_2;\text{DIA}} = m_{\text{CO}_2;\text{LIQ};\text{SAIDA}} + m_{\text{CO}_2;\text{GAS};\text{SAIDA}} \quad \text{Eq. 44}$$

4.3.5.3 Conferência dos valores de solubilidade

Para confirmar que a coluna de absorção terá funcionamento adequado e não sofrerá com entupimento, é necessário garantir que os reagentes e produtos não sofrerão precipitação, ou seja, serão totalmente solubilizados na água. Para isso, as concentrações de Na_2S , Na_2CO_3 e NaOH em água, obtidas das Equações 36, 40 e 41, respectivamente, e do volume de água calculado na Equação 33, devem ser menores que a solubilidade em água de cada uma dessas substâncias. Para isso, verificou-se se de fato isso acontece, a partir das Equações 45, 46 e 47.

$$\frac{m_{\text{Na}_2\text{S}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} < \text{SOL}_{\text{Na}_2\text{S}} \quad \text{Eq. 45}$$

$$\frac{m_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} < \text{SOL}_{\text{Na}_2\text{CO}_3} \quad \text{Eq. 46}$$

$$\frac{m_{\text{NaOH}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} < \text{SOL}_{\text{NaOH}}$$

Eq. 47

Em que:

$\text{SOL}_{\text{Na}_2\text{S}}$: solubilidade do Na_2S em água (g L^{-1});

$\text{SOL}_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$: solubilidade do Na_2CO_3 em água (g L^{-1});

SOL_{NaOH} : solubilidade do NaOH em água (g L^{-1}).

5.3.6 Vazão da solução de NaOH na coluna de absorção

A vazão da solução de NaOH na coluna de absorção é a mesma que o volume diário de água calculado em 4.3.5.1. Para fins práticos, o valor de $V_{\text{H}_2\text{O}}$ pode ser dividido por 24 para se obter a vazão em horas, por (24×60) para se obter a vazão em minutos e por $(24 \times 60 \times 60)$ para se obter a vazão em segundos. A vazão é simbolizada por Q_{NaOH} . Tal valor é importante para determinar o tipo e potência de bomba hidráulica e válvulas a serem adotadas para o sistema.

5 RESULTADOS

5.1 CÁLCULOS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA

O condomínio Rubi Ville tem 7 blocos, sendo 6 com 5 andares e um com 4 andares, totalizando 34 andares. Cada andar tem 8 apartamentos, totalizando 272 apartamentos. De acordo com a administração do condomínio, há uma média de 4 pessoas por apartamento, totalizando 1088 moradores do condomínio. A média de geração de RSU é de 1 kg por morador por dia, e a média de matéria orgânica biodegradável no RSU é de 0,200 kg por kg de RSU, totalizando 1088 kg de RSU por dia e 544 kg de matéria orgânica biodegradável por dia.

De acordo com dados da literatura, o rendimento de conversão de matéria orgânica adicionada ao sistema em biogás é de 0,750 m³ por kg de SV; a porcentagem de metano no biogás é de 50%; a densidade de RSU é de 1 kg por m³; o poder calorífico inferior do metano é de 35780 kJ x m⁻³ (FUELS); e a eficiência de conversão da energia química da combustão do metano em energia elétrica é de 30% (JEONG *et al*, 2009).

De acordo com a Equação 3, o volume de biogás produzido por semana é:

$$V_{\text{BIOGAS; DIA}} = \frac{1088 \text{ kg RSU}}{\text{dia}} \times \frac{200 \text{ kg SV}}{\text{m}^3 \text{RSU}} \times \frac{\text{m}^3 \text{RSU}}{1000 \text{ kg RSU}} \times \frac{0,75 \text{ Nm}^3}{\text{kg SV}}$$

$$V_{\text{BIOGAS; DIA}} = 163,20 \text{ Nm}^3 \text{ biogás dia}^{-1}$$

De acordo com a Equação 4, a energia máxima que pode ser obtida por massa de RSU é:

$$\frac{E_{\text{max}}}{m_{\text{RSU}}} = \frac{200 \text{ kg SV}}{\text{m}^3 \text{RSU}} \times \frac{\text{m}^3 \text{RSU}}{1000 \text{ kg RSU}} \times \frac{0,75 \text{ Nm}^3}{\text{kg SV}} \times 0,5 \times 35780 \text{ kJ x Nm}^{-3} \times 2,77778 \times 10^{-4} \text{ kWh x kJ}^{-1} \times 0,3$$

$$\frac{E_{\text{max}}}{m_{\text{RSU}}} = 223,625 \frac{\text{kWh}}{\text{ton RSU}}$$

De acordo com a Equação 5, a energia máxima que pode ser gerada em um dia é:

$$E_{\max} = 223,625 \frac{\text{kWh}}{\text{ton RSU}} \times 1,088 \frac{\text{ton RSU}}{\text{dia}}$$
$$E_{\max} = 243,3 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}}$$

De acordo com a Equação 6, a potência máxima que pode ser gerada na planta de biogás é de:

$$P_{\max} = 243,3 \frac{\text{kWh}}{\text{dia}} \times \frac{24 \text{ h}}{\text{dia}}$$
$$P_{\max} = 10,1 \text{ kW}$$

5.2 DIMENSIONAMENTO DA PLANTA DE BIOGÁS NO CONDOMÍNIO

Conforme expresso no item 5.1, $Q = m_{\text{RSU};\text{DIA}} = 1088 \text{ kg dia}^{-1}$. De acordo com as Equações 7 a 12, as dimensões do reator são as seguintes:

$$V_R = 35,904 \text{ m}^3$$

$$R = 2,047 \text{ m}$$

$$D = 4,093 \text{ m}$$

$$H = 4,093 \text{ m}$$

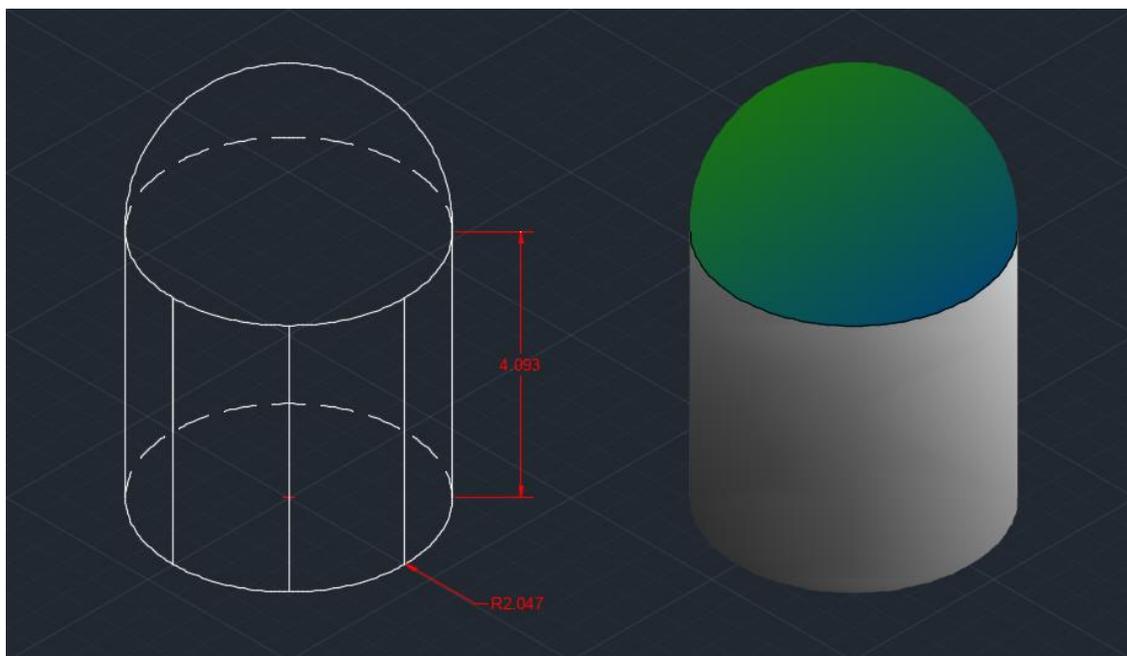
$$A_B = 13,158 \text{ m}^2$$

$$A_L = 52,632 \text{ m}^2$$

$$A_T = 65,789 \text{ m}^2$$

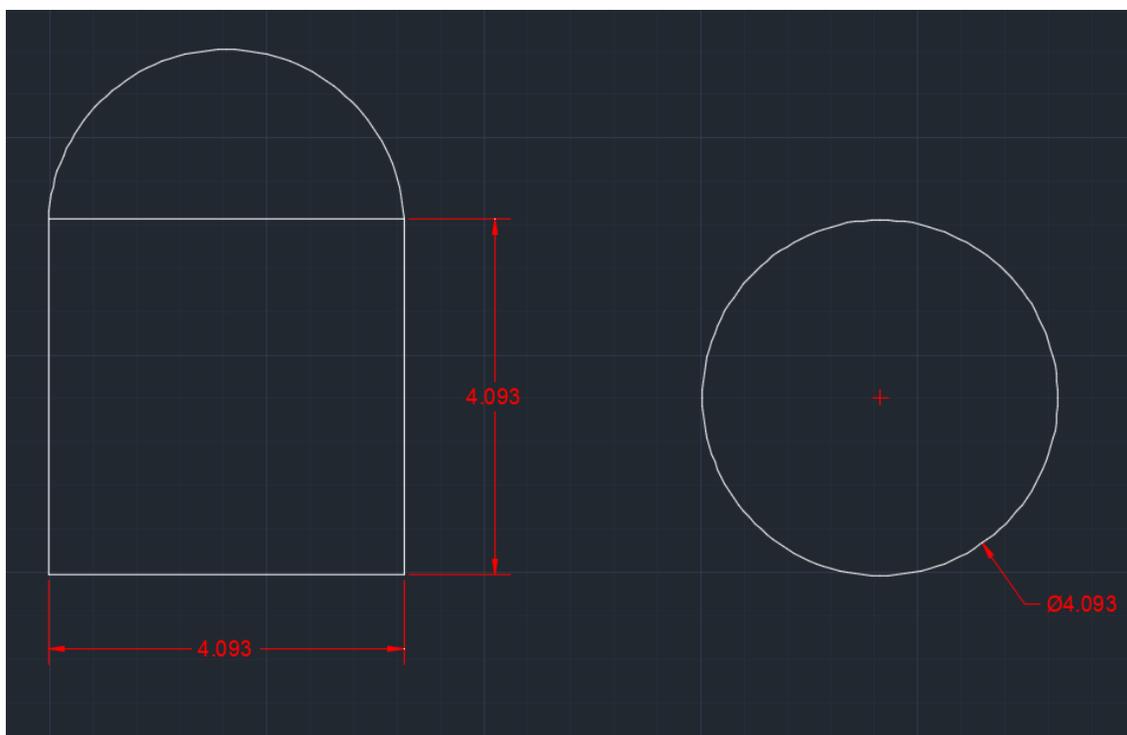
O corpo do biodigestor apresenta, portanto, o seguinte formato e dimensões, conforme as Figuras 5 e 6:

Figura 5 – Formato e dimensões do biodigestor em vista tridimensional.



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

Figura 6 – Formato e dimensões do biodigestor em vista frontal (esquerda) e superior (direita).



Fonte: AUTORIA PRÓPRIA.

5.3 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE DESSULFURIZAÇÃO

5.3.1 Cálculo de densidade do biogás

Conforme a Equação 14, a densidade do biogás é:

$$\rho_{\text{BIOGAS}} = \frac{(M_{\text{CH}_4} \times P_{\text{CH}_4}) + (M_{\text{CO}_2} \times P_{\text{CO}_2}) + (M_{\text{H}_2\text{S}} \times P_{\text{H}_2\text{S}}) + (M_{\text{H}_2\text{O}} \times P_{\text{H}_2\text{O}})}{\text{VM}}$$

$$\rho_{\text{BIOGAS}} = \frac{(16,04 \times 0,500) + (44,01 \times 0,45) + (34,1 \times 0,005) + (18,02 \times 0,045)}{22,4}$$

$$\rho_{\text{BIOGAS}} = \frac{(8,02) + (19,8045) + (0,1705) + (0,8109)}{22,4}$$

$$\rho_{\text{BIOGAS}} = \frac{28,8059}{22,4}$$

$$\rho_{\text{BIOGAS}} = 1,286 \text{ kg m}^{-3}$$

5.3.2 Cálculo de densidade dos gases que compõem o biogás

De acordo com as Equações 15, 16 e 17, as densidades individuais dos gases são:

$$\rho_{\text{CH}_4} = \frac{16,04}{22,4} = 0,7161 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_{\text{CO}_2} = \frac{44,01}{22,4} = 1,9647 \text{ kg m}^{-3}$$

$$\rho_{\text{H}_2\text{S}} = \frac{34,10}{22,4} = 1,5223 \text{ kg m}^{-3}$$

5.3.3 Cálculo de vazões mássicas dos gases que compõem o biogás

Da seção 5.1 (Cálculos de produção de biogás e energia), foi calculado que a produção de biogás diária é de 163,20 Nm³ por dia, ou 6,8 Nm³ por hora. De acordo com as Equações 18 a 25, as vazões mássicas de biogás e de cada gás que o compõem são:

$$m_{\text{BIOGAS;DIA}} = V_{\text{BIOGAS; DIA}} \times \rho_{\text{BIOGAS}} = 163,20 \times 1,286 = 209,87 \text{ kg dia}^{-1}$$

$$m_{\text{CH}_4;\text{DIA}} = V_{\text{BIOGAS; DIA}} \times P_{\text{CH}_4} \times \rho_{\text{CH}_4} = 163,20 \times 0,500 \times 0,7161 = 58,4315 \text{ kg dia}^{-1}$$

$$m_{\text{CO}_2;\text{DIA}} = V_{\text{BIOGAS; DIA}} \times P_{\text{CO}_2} \times \rho_{\text{CO}_2} = 163,20 \times 0,45 \times 1,9647 = 144,2899 \text{ kg dia}^{-1}$$

$$m_{\text{H}_2\text{S;DIA}} = V_{\text{BIOGAS; DIA}} \times P_{\text{H}_2\text{S}} \times \rho_{\text{H}_2\text{S}} = 163,20 \times 0,005 \times 1,5223 = 1,2422 \text{ kg dia}^{-1}$$

5.3.4 Balanço massa global e de H₂S

Os resultados obtido sobre biogás no item 5.3.3 são utilizados para o balanço de massa global e específico na coluna de absorção, como mostram os cálculos a seguir, baseados nas Equações 26 a 32.

Balanço global de massa (por dia):

$$m_{\text{LIQ;ENTRADA}} + 209,87 = m_{\text{LIQ;SAIDA}} + m_{\text{GAS;SAIDA}}$$

$$m_{\text{LIQ;ENTRADA}} = 0$$

$$m_{\text{LIQ;SAIDA}} = m_{\text{H}_2\text{S;LIQ;SAIDA}} + m_{\text{CO}_2;\text{LIQ;SAIDA}}$$

$$m_{\text{GAS;SAIDA}} = 209,87 - (m_{\text{H}_2\text{S;LIQ;SAIDA}} + m_{\text{CO}_2;\text{LIQ;SAIDA}})$$

Balanço de massa do H₂S (por dia):

$$0 + 1,2422 = m_{\text{H}_2\text{S;LIQ;SAIDA}} + m_{\text{H}_2\text{S;GAS;SAIDA}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{S;GAS;SAIDA}} = \frac{P_{\text{LEGISLAÇÃO}}}{P_{\text{H}_2\text{S}}} \times m_{\text{H}_2\text{S;DIA}} = \frac{10 \text{ ppm}}{5000 \text{ ppm}} \times 1,2422 = 0,2 \% \times 1,2422 =$$

$$0,00248 \text{ kg dia}^{-1} = 2,48 \text{ g dia}^{-1}$$

$$0 + 1,2422 = 0,00248 + m_{\text{H}_2\text{S;LIQ;SAIDA}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{S};\text{LIQ};\text{SAIDA}} = 1,2422 - 0,00248 = 1,2397 \text{ kg dia}^{-1}$$

De acordo com as Equações acima, foi calculado que a massa de H₂S que entra na coluna diariamente é de 1,2422 kg. Uma vez que a eficiência desejada da coluna é de 98% de remoção de H₂S, ou seja, partindo de um gás com 5000 ppm deve-se obter um gás com 10 ppm, a saída de H₂S resultante na fase gasosa foi de 0,00248 kg por dia. Já na fase líquida, a massa de saída foi equivalente a 1,2397 kg por dia. No entanto, o H₂S é neutralizado na fase líquida, formando sulfeto de sódio, que permanece dissociado. O íon sulfeto, ao atingir o biorreator de algas, é convertido biologicamente em enxofre elementar.

5.3.5 Cálculo de solubilidade de gases e solutos e quantidade de NaOH e H₂O necessária na coluna de absorção

5.3.5.1 Solubilidade do gás sulfídrico e volume de água necessário

Com base no balanço de massa do H₂S, determina-se o volume de água que deve passar diariamente pela coluna, como mostram os cálculos a seguir.

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{S};\text{LIQ};\text{SAIDA}}}{\text{SOL}_{\text{H}_2\text{S}}} = \frac{1,2397}{6,72} = 184,484 \text{ L dia}^{-1}$$

$$m_{\text{NaOH (1)}} = 2,3459 \times m_{\text{H}_2\text{S};\text{LIQ};\text{SAIDA}} = 2,908 \text{ kg dia}^{-1}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{S}} = 2,2887 \times m_{\text{H}_2\text{S};\text{LIQ};\text{SAIDA}} = 2,837 \text{ kg dia}^{-1}$$

Logo, verifica-se que a vazão de água na coluna deve ser de 184,484 L dia⁻¹, a massa de NaOH necessária para reagir com o H₂S é de 2,908 kg dia⁻¹ e a massa de Na₂S formado é de 2,837 kg dia⁻¹.

5.3.5.2 Solubilidade do CO₂, massa extra de NaOH necessária e balanço de massa de CO₂

Os cálculos para determinar a massa de CO₂ que se solubiliza no volume de água que passa diariamente pela coluna e que reage com o NaOH formando Na₂CO₃, assim como a massa de NaOH necessária e a massa de Na₂CO₃ formado, são baseados nas Equações 37 a 41 e mostrados a seguir.

$$m_{\text{CO}_2;\text{SOLUVEL}} = V_{\text{H}_2\text{O}} \times \text{SOL}_{\text{CO}_2} = 267,501 \text{ g dia}^{-1}$$

$$m_{\text{NaOH (2)}} = 1,8176 \times m_{\text{CO}_2;\text{SOLUVEL}} = 486,219 \text{ g dia}^{-1}$$

$$m_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 2,4083 \times m_{\text{H}_2\text{S};\text{DIA}} = 644,22 \text{ g dia}^{-1}$$

$$m_{\text{NaOH}} = m_{\text{NaOH (1)}} + m_{\text{NaOH (2)}} = 2,908 \text{ kg dia}^{-1} + 486,219 \text{ g dia}^{-1} = 3,394 \text{ kg dia}^{-1}$$

Com base nos resultados anteriores, desenvolve-se o balanço de massa do CO₂, de acordo com as Equações 42 a 44, e obtém-se a massa de CO₂ que deixa a coluna na fase gasosa, compondo o biogás tratado.

$$0 + 144,2899 = m_{\text{CO}_2;\text{LIQ};\text{SAIDA}} + m_{\text{CO}_2;\text{GAS};\text{SAIDA}}$$

$$m_{\text{CO}_2;\text{LIQ};\text{SAIDA}} = m_{\text{CO}_2;\text{SOLUVEL}} = 267,501 \text{ g dia}^{-1} = 0,2675 \text{ kg dia}^{-1}$$

$$m_{\text{CO}_2;\text{GAS};\text{SAIDA}} = 144,2899 - 0,2675 = 144,0224 \text{ kg dia}^{-1}$$

A partir dos resultados, é possível observar que a remoção de gás carbônico não ocorre de forma eficiente na coluna, ao contrário do que ocorre com o H₂S, em que a eficiência de remoção é de 99,8%.

5.3.5.3 Conferência dos valores de solubilidade

Com base nos resultados obtidos de massa de NaOH necessário e Na₂S e Na₂CO₃ formados, verifica-se se a concentração é menor que sua solubilidade, de forma que não haja formação de suspensão ou precipitado. Espera-se que os três compostos sejam facilmente solubilizados, uma vez que apresentam solubilidade em água maior em algumas ordens de grandeza em relação aos gases que os originam. As Equações a seguir evidenciam o enunciado.

$$\frac{m_{\text{NaOH}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} = 18,40 \text{ g L}^{-1} < \text{SOL}_{\text{NaOH}} = 1090 \text{ g L}^{-1}$$

$$\frac{m_{\text{Na}_2\text{S}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} = 15,38 \text{ g L}^{-1} < \text{SOL}_{\text{Na}_2\text{S}} = 186 \text{ g L}^{-1}$$

$$\frac{m_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} = 3,49 \text{ g L}^{-1} < \text{SOL}_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = 300 \text{ g L}^{-1}$$

Logo, vê-se que todas as concentrações dos solutos utilizados e formados são abaixo de seus valores de solubilidade máxima em água. Portanto, não há problemas quanto à solubilização diante das massas e volumes abordados.

5.3.6 Vazão da solução de NaOH na coluna de absorção

Os cálculos a seguir convertem a vazão da solução de NaOH em base diária para base de horas, minutos e segundos. Tais valores são importantes para escolha do equipamento hidráulico que alimentará a coluna.

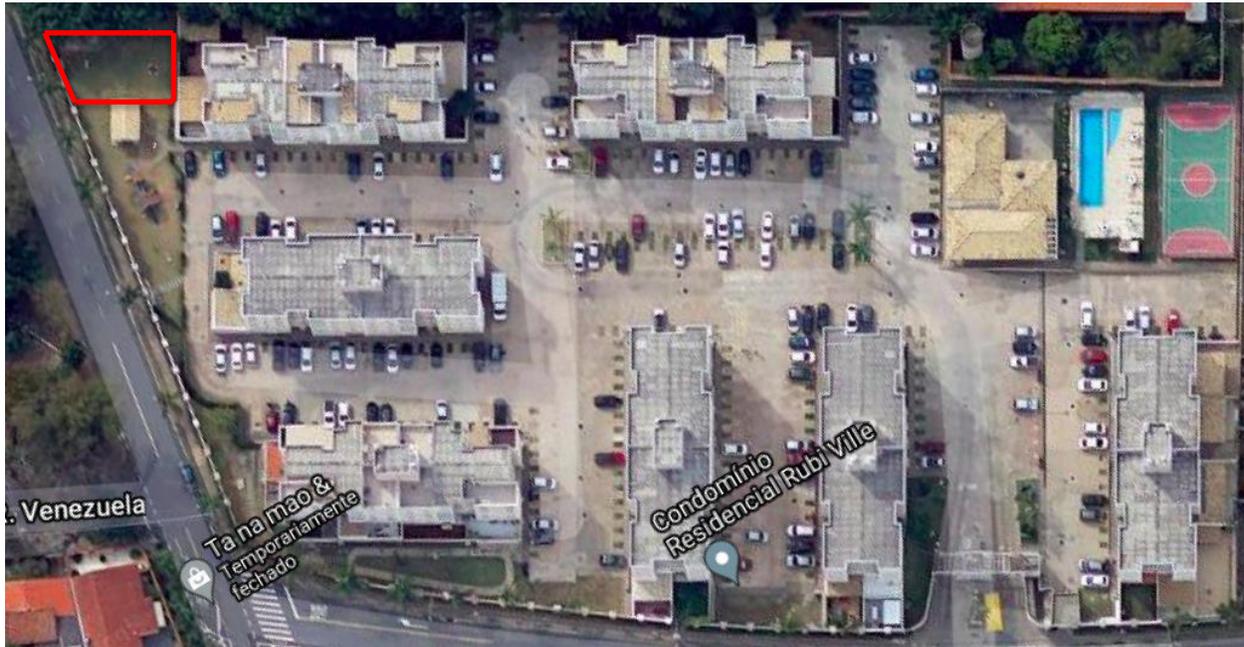
$$Q_{\text{NaOH}} = 184,484 \text{ L dia}^{-1} = 7,687 \text{ L h}^{-1} = 128,114 \text{ mL min}^{-1} = 2,135 \text{ mL s}^{-1}.$$

Com base no resultado acima, vê-se que a vazão da bomba, em segundos, é baixa e, por isso, a coluna demanda uma bomba de baixa potência para alimentá-la. É possível que uma bomba de aquário cumpra o papel demandado.

Portanto, a partir de todos os cálculos desenvolvidos, é possível verificar o porte da planta de biogás que seria necessária para tratar todo o resíduo orgânico gerado no condomínio Rubi Ville. Partindo de uma massa diária de 1088 kg de RSU, gerados por 1088 moradores, é possível alcançar uma produção de 163,2 m³ de biogás por dia, volume que, caso aplicado em um motor gerador de eletricidade, seria capaz de gerar uma potência de 10 kW e gerar 7300 kWh por mês, quantidade suficiente para suprir as necessidades de energia elétrica de 73 pessoas.

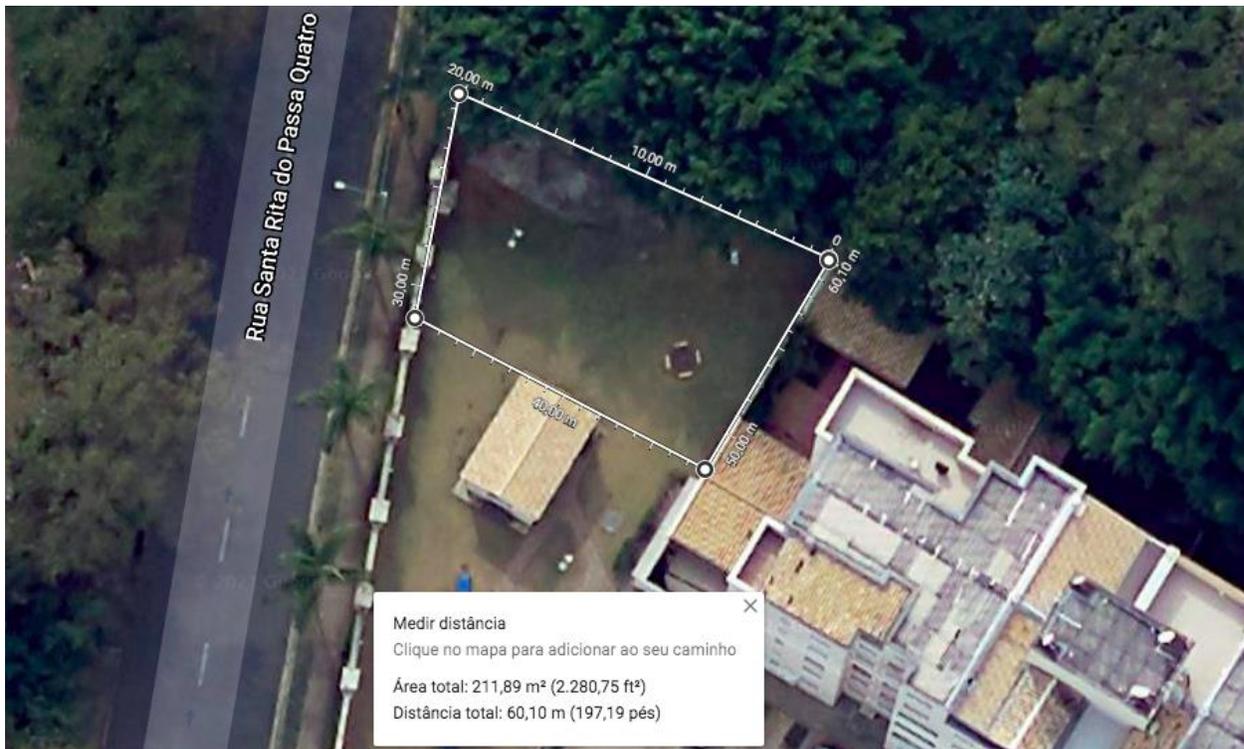
Para tal quantidade de RSU e biogás, o sistema foi dimensionado e deve ser composto de um biodigestor cilíndrico, com base plana de aço inoxidável ou polímero não corrosível e topo coberto por um material flexível e impermeável a gás, como polietileno. Recomenda-se duas camadas deste material, de forma a evitar a perda de gás e efeitos do intemperismo. As dimensões do reator devem ser de 4,1 m de diâmetro da base e 4,1 m de altura. Considerando tais dimensões, é possível que a planta seja construída na área do fundo do condomínio, onde há um espaço aberto pouco utilizado, que permitiria uma distância adequada até o espaço residencial. As Figuras 7 e 8 a seguir ilustra essa área e o espaço que seria ocupado pelo biodigestor.

Figura 7 – Vista superior do condomínio Rubi Ville, com a área proposta para construção da planta de biogás em destaque.



Fonte: GOOGLE MAPS (adaptado).

Figura 8 – Vista superior da área proposta para construção da planta de biogás em destaque com dimensões.



Fonte: GOOGLE MAPS (adaptado).

Como pode ser observado das Figuras 7 e 8, a área disponível proposta para a construção da planta conta com dimensões de cerca de 20 m x 10 m, contabilizando uma área de mais de 200 m². Uma vez que o biodigestor tem diâmetro de 4,1 m e área da base de 13 m², a área consegue abrigar o biodigestor e contar com uma distância de segurança de pelo menos 15 m para o espaço residencial. Além disso, ao lado dessa área há uma pequena construção, que atualmente encontra-se inutilizada, e poderia ser aproveitada para manter todos materiais e ferramentas necessárias para operação e manutenção da planta.

O sistema de purificação do biogás seria mais um elemento a compor a planta. Conforme os cálculos desenvolvidos, para o tratamento do biogás produzido, seriam necessários 185 L de água por dia, que poderiam ser reaproveitados todos os dias, apenas com adição diária de NaOH. O alcalinizante, por sua vez, seria necessário em quantidade de 3,4 kg por dia, formando uma solução 1,84 % NaOH, ou seja, uma solução diluída. O sistema pode reter 99,8% do H₂S presente no biogás, passando de uma porcentagem molar de 0,5% (5000 ppm) para 0,001% (10 ppm). Também há retenção de CO₂ na coluna, embora essa seja irrisória. Dessa forma, o biogás de entrada, com 0,5 % H₂S, torna-se, após a saída da coluna um gás com 0,001 % H₂S. O teor de CO₂ ainda permanece elevado e, por essa razão, a coluna de absorção não seria o meio mais adequado para retirar o CO₂ em quantidades mais expressivas. Uma opção, caso for de interesse a remoção desse gás, seria uma coluna de adsorção, com carvão ativado ou outros materiais com alta afinidade por CO₂ e baixa afinidade por CH₄. Além do tratamento do gás, o sistema composto pela coluna, biorreator de algas e decantador é capaz de recuperar cerca de 1,2 kg de enxofre elementar por dia, que pode ser vendido ou aplicado em plantações.

6 CONCLUSÕES

O raciocínio e os cálculos desenvolvidos indicam que é possível, tecnicamente, realizar a operação de um biodigestor em uma área residencial para aproveitamento energético dos resíduos orgânicos nela gerados. O condomínio Rubi Ville conta com uma área disponível com dimensões suficientes para a construção da planta, composta por um biodigestor com cerca de 4 metros de altura e diâmetro e uma coluna de absorção de pequeno porte, acompanhada de um biorreator de algas e um decantador, ambos também de pequeno porte. Com o aproveitamento integral dos RSU do condomínio, é possível alcançar uma produção de 163,2 m³ de biogás por dia, equivalente a cerca de 81 m³ de metano diários. Para promover o tratamento adequado do biogás, com o intuito de remover o H₂S em níveis aceitos por legislação, são necessários 3,394 kg de NaOH dissolvidos em 184 L de água, formando uma solução 1,84% da base.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADEKUNLE, K. F. et al. A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, v. 6, p. 205-212, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução ANP nº 8 de 30/01/2015**. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=280722>>. Acesso em: 18 de julho de 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Marco regulatório do biometano no Brasil**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/documents/1355242/1529323/Biog%C3%A1sFert+10.pdf/0fe9f149-86be-4ec9-85b7-eea07dd83628>>. Acesso em: 18 de julho de 2021.

APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater, 21st edn. **American Public Health Association**, Washington, DC, 2005. VDI 4630. Fermentation of organic materials: Characterization of the substrate, sampling collection of material data, fermentation tests. 92p. Germany: Verein Deutscher Ingenieure - VDI, 2006.

BABEL, S. et al. Anaerobic co-digestion of sewage and brewery sludge for biogas production and land application. **International Journal of Environmental Science & Technology**, v. 6, p 131–140, 2009.

BUDYCH-GORZNA, M. et al. Enhancement of biogas production at the municipal wastewater treatment plant by co-digestion with poultry industry waste. **Applied Energy**, v. 161, p. 387–394, 2016.

BUDIYONO, B. et al, Biogas Production Kinetic from Vinasse Waste in Batch Mode Anaerobic Digestion. **World Applied Sciences Journal**, v. 26 n. 11, p. 1464-1472, 2013.

COLLINS, A. R. et al. Optimal loading rates and economic analyses for anaerobic digestion of poultry waste. **J Air Waste Manag Assoc**, v. 50, p.1037–1044, 2000.

COSTA, C. et al. Proposta para automação de biodigestores rurais visando maior segurança e eficiência energética em sua implantação. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC)**. 2016.

EL-MASHAD, H. M., ZHANG, R. Biogas production from co-digestion of dairy manure and food waste. **Bioresource Technology**. V. 101, p. 4021–4028. 2010.

FOUNTOULAKIS, M. S. et al. Co-digestion of sewage sludge with glycerol to boost biogas production. **Waste Management**, v. 30, p. 1849–1853, 2010.

FUELS - Higher and Lower Calorific Values. **The Engineering Toolbox**. Disponível em: <https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html>. Acesso

em 11 de junho de 2020.

GARBOSSA, L. H. P. et al . Development and evaluation of a radial anaerobic/aerobic reactor treating organic matter and nitrogen in sewage. **Braz. J. Chem. Eng.**, v. 22 (4), p. 511-519, 2005.

GOMES, C. E. P. S. Resíduo Sólido Urbano é energia jogada no lixo. Caderno Opinião. **FGV Energia**. 2018.

GONZÁLEZ, L. M. G. et al, Integrated biodiesel and biogas production from microalgae: Towards a sustainable closed loop through nutrient recycling. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1137–1148, 2018.

GOOGLE MAPS. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-22.9322625,-47.0606061,53m/data=!3m1!1e3>>. Acesso em: 18 de julho de 2021.

HOLM-NIELSEN, J. B. et al. The future of anaerobic digestion and biogas utilization. **Bioresource Technology**, v. 100, p. 5478–5484, 2009.

IPEA. **Resíduos sólidos urbanos no Brasil: desafios tecnológicos, políticos e econômicos**. Disponível em: <<https://www.ipea.gov.br/cts/pt/central-de-conteudo/artigos/artigos/217-residuos-solidos-urbanos-no-brasil-desafios-tecnologicos-politicos-e-economicos>>. Acesso em 10 de outubro de 2020.

JENICEK, P. et al. Potentials and limits of anaerobic digestion of sewage sludge: Energy self-sufficient municipal wastewater treatment plant? **Water Science & Technology**, v. 66(6), p. 1277-1281, 2012.

JEONG, C. et al. Generating efficiency and emissions of a spark-ignition gas engine generator fuelled with biogas–hydrogen blends. **International Journal of Hydrogen Energy**. v. 34 p. 9620–9627, 2009

JIMÉNEZ-CASTRO, M. P. et al. Two-stage anaerobic digestion of orange peel without pre-treatment: Experimental evaluation and application to São Paulo state. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. V. 8 (4), p. , 2020.

KANDYLIS, P. et al. Acidogenesis of cellulosic hydrolysates for new generation biofuels. **Biomass and Bioenergy**, v. 91, p. 210-216, 2016.

MEL, M. et al. Simulation Study for Economic Analysis of Biogas Production from Agricultural Biomass. **Energy Procedia**, v. 65, p. 204 - 214, 2015.

MORAES et al, Anaerobic digestion of vinasse from sugarcane biorefineries in Brazil from energy, environmental, and economic perspectives: Profit or expense? **Applied Energy**, v. 113, p. 825–835, 2014.

PARK, J. B. et al. Biogas production from anaerobic waste stabilisation ponds treating dairy and piggery wastewater in New Zealand. **Water Sci Technol** v. 55, p.257–264, 2007.

PASQUAL, J. C. et al. Biogas Perspectives in Livestock Sector in Brazil and the United States: Electric, Thermal and Vehicular Energy Use. **Journal of Agricultural Science and Technology**, v. A7, p. 258-273, 2017.

PAQUES. **Tratamento de gás e geração de biogás**. Disponível em: <<https://br.paques.nl/produtos/featured/thiopaq-tratamento-de-gas-biogas>>. Acesso em 18 de julho de 2021

PROBIOGÁS. **Guia Prático do Biogás: Geração e Utilização**. 5. ed. Gülzow, 2010.

SAMER, M. et al. Chapter 17: Biogas Plant Constructions. In: Kumar, S., **Biogas**, Ed. InTech. P. 343-368 (2012).

SANTOS, I. F. et al. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. **Journal of Cleaner Production** v. 126, p. 504-514, 2016.

SHEN, Y. et al. An overview of biogas production and utilization at full-scale wastewater treatment plants (WWTPs) in the United States: Challenges and opportunities towards energy-neutral WWTPs. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 50, p. 346-362, 2015.

SILVA, J. C., Yada, M. M. Viabilidade Econômica De Implantação De Biodigestores. **V SIMTEC – Simpósio de Tecnologia** - Faculdade de Tecnologia de Taquaritinga – 2018.

SINGH, S. P. et al. Review of recent advances in anaerobic packed-bed biogas reactors. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 13 (6–7), p. 1569-1575, 2009.

WOJCIECH M. et al. Economic analysis of biomethane and bioelectricity generation from biogas using different support schemes and plant configurations. **Energy**, v. 88, p. 658-666, 2015.

YADVIKA, S. S. et al. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. **Bioresource Technology** v. 95 (1), p 1-10, 2004.

YU, Z. et al. Production of Methane Biogas as Fuel Through Anaerobic Digestion. **Sustainable Biotechnology**. 2010.

ZANIN, A; Bagatini, F. M; Pessatto, C. B. Viabilidade econômico-financeira de implantação de biodigestor: uma alternativa para reduzir os impactos ambientais causados pela suinocultura; **XVI Congresso Brasileiro de Custos**. v. 6 (1), 2010.