

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SÃO PAULO

UNIDADE PROPONENTE

Campus: GRU

IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO

Título do Projeto: Biodigestor de Baixo Custo para Aplicação em Residências ou Escolas

Autores: Victor Cerqueira Florentino da Silva, Ryan Bernardo da Silva, Bianca Rodrigues Fernandes de Oliveira, Bruno Rodrigues Fernandes de Oliveira.

Orientador 1: André de Oliveira Guerrero, professor de Química do ensino médio e superior de engenharia de controle e automação pelo IFSP - campus Guarulhos.

Orientador 2: Carlos Otavio Schocair Mendes, professor de curso superior de engenharia de controle e automação na disciplina “Projeto Integrador III” pelo IFSP - campus Guarulhos.

RESUMO

Dada a crescente preocupação com o aquecimento global e suas consequências para a sociedade humana e a vida na Terra, torna-se imprescindível a busca por formas alternativas de obtenção de energia em substituição ao uso dos combustíveis fósseis, principais responsáveis por este problema ambiental. A presente proposta de trabalho visa o estudo dos parâmetros envolvidos no desenvolvimento de um biodigestor de baixo custo para utilização doméstica ou escolar, com o fim de substituir parcialmente o uso do gás liquefeito de petróleo por gás metano originado por decomposição anaeróbia de resíduos alimentícios.

ABSTRACT

Given the growing concern about global warming and its consequences for human society and life on Earth, the search for alternative energy sources to replace fossil fuels, the main contributors to this environmental problem, is becoming increasingly necessary. This work proposal aims to study the parameters involved in developing a low-cost biodigester, suitable for domestic or school use, with the aim of partially replacing the use of liquefied petroleum gas with methane gas generated by the anaerobic replacement of fed waste.

INTRODUÇÃO

A decomposição anaeróbica em reatores de biodigestão constitui uma promissora fonte de energia limpa e renovável. Além disso, o emprego dessa tecnologia lida diretamente com os impactos ambientais gerados pelo descarte convencional de resíduos orgânicos. Os gases CO₂ e CH₄, agentes do efeito estufa, que seriam despejados na atmosfera passam a ser captados e, particularmente no caso do segundo, reaproveitados na produção de energia elétrica ou diretamente utilizados para se obter calor através da queima. O princípio da biodigestão se baseia em diferentes variáveis e organismos, tornando essa área um amplo escopo de estudo, investigação científica e desenvolvimento tecnológico.

OBJETIVOS

Objetivo Geral

Contribuir para a compreensão geral sobre a técnica da biodigestão como uma possível forma de obtenção de energia alternativa aos combustíveis fósseis em domicílios (pequena escala), ou em instituições públicas de ensino (em média escala), visando a uma redução da emissão de gases de efeito estufa.

Objetivo Específicos

- Familiarizar os estudantes com a pesquisa bibliográfica de trabalhos acadêmicos e com a busca em bases de periódicos;
- Realizar levantamento bibliográfico sobre as reações metanogênicas e modelos de biodigestores;
- Introduzir os estudantes a práticas de isolamento e comparação de variáveis em experimentos científicos;
- Preparar protótipos de biodigestores e testar sua eficiência na produção de metano;
- Otimizar parâmetros experimentais na operação do biodigestor: pressão, temperatura e pH; Otimizar os parâmetros de aplicabilidade prática do projeto: tamanho, custo e capacidade de armazenamento;
 - Relacionar o tema dos biodigestores com termoquímica, equilíbrio químico e engenharia de controle e automação;
- Difundir os resultados do levantamento bibliográfico e dos experimentos realizados.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O aquecimento global se tornou uma preocupação comum no debate público há poucas décadas [1], mas a discussão científica remonta a 1824 quando Fourier propôs a hipótese de que a atmosfera cumpriria papel na temperatura do planeta [2,3] abrindo o debate sobre a existência do efeito estufa. A primeira evidência experimental sobre gases capazes de absorver calor apareceria em 1856, quando Eunice Foote [4] verificou que ar seco comparado com ar úmido, ou ar comum comparado com CO₂ atingiam temperaturas diferentes quando expostos ao sol. Em 1873 Tyndall apresentou um estudo mais sistemático sobre a absorção de calor por gases [5].

Em 1896 Arrhenius [6] quantificou a contribuição do CO₂ para o efeito estufa relacionando este às mudanças climáticas do passado, suas explicações foram contrapostas por Angström [7], argumentando que a atmosfera teria capacidade de absorção de calor saturada, e por Milankovitch [8], propondo uma explicação baseada nos ciclos solares. O debate só se encerrou em favor de Arrhenius em 1931, quando Hulburt [9], calculou que ao dobrar a concentração de CO₂ na atmosfera seria provocado um aumento médio na temperatura de 4 Kelvin, ao triplicar ou reduzir a zero, o aumento ou diminuição seria de 7 Kelvin.

Em 1938 Callendar demonstrou com dados de estações meteorológicas o aquecimento do planeta, e estabeleceu sua relação com o CO₂ [10], já em 1955 Suess percebeu o crescimento relativo das quantidades de ¹²C em madeira, se comparado com ¹⁴C, a depender do período de crescimento de árvores, atribuindo o aumento das concentrações de CO₂ aos combustíveis fósseis [11], sendo que estes possuem uma abundância relativa entre os isótopos mais concentrada em ¹²C. Não apenas o aquecimento global foi verificado experimentalmente, mas sua principal causa estava atribuída.

Plass atualizou em 1956 [12] os cálculos de Arrhenius e Hulburt sobre a sensibilidade climática de equilíbrio (aumento da temperatura associado à duplicação da concentração de CO₂) para 3,6°C e concluiu que as emissões de CO₂ por atividades humanas (6x10⁹ton/ano) são muito mais significativas que fontes não-biológicas, como emissões por fontes termais, vulcões, dentre outros (0,1x10⁹ton/ano). Revelle em 1957 [13] apresentou estudos sobre o limite da capacidade dos oceanos em absorver CO₂ da atmosfera e, em 1958, Keeling [14]

apresentou dados de monitoramento da concentração de CO₂ atmosférico que indicavam que a concentração aumentava e diminuía ao longo do ano, com um aumento acumulado de um ano para o outro, a chamada curva de Kelling, para a qual uma versão atualizada foi apresentada em 2005 pelo próprio autor [15], evidenciando o aumento significativo das concentrações, especialmente a partir da década de 1950.

Um importante marco na história das ciências do clima foi o estabelecimento em 1988 do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) que reúne pesquisadores de diversos países para compilar as informações científicas mais atualizadas sobre o tema. Até o presente momento foram produzidos seis grandes relatórios: FAR (*First Assessment Report*) em 1990 [16], SAR (*Second Assessment Report*) em 1995 [17], TAR (*Third Assessment Report*) em 2001 [18], AR4 (*Fourth Assessment Report*) em 2007 [19], AR5 (*Fifth Assessment Report*) em 2013 [20] e AR6 (*Sixth Assessment Report*) em 2023 [21].

Por outro lado, embora o aquecimento global antropogênico seja um consenso científico, com as raras publicações que fogem ao consenso apresentando erros e imprecisões [22], perante a opinião popular posições negacionistas e teorias da conspiração ainda são comuns [23], eventualmente tendo suas origens rastreáveis para conspirações muito mais realistas contra a ciência e contra o clima [24].

Gases de Efeito Estufa e seus Impactos

O clima da Terra depende do balanço entre entrada de radiação solar na atmosfera e a saída de energia como radiação infravermelha, que por sua vez é influenciada pela abundância de gases traço capazes de absorver esta radiação, chamados gases de efeito estufa, GEE. O aumento das concentrações destes amplifica o forçamento radiativo, interferindo no balanço entre os fluxos de energia na atmosfera e causando o aumento de temperatura. Dentre os GEE, além do CO₂, estão os CFCs, o CH₄, O₃ troposférico e o N₂O, sendo o vapor de água troposférico o gás mais importante, mas cujas concentrações não são diretamente afetadas pelas emissões humanas [16].

De acordo com o relatório do grupo de trabalho 1 do IPCC [25] as eficiências radiativas do CO₂ e do CH₄ são respectivamente $1,33 \pm 0,16 \times 10^{-5} \text{ W m}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$ e $5,7 \pm 1,4 \times 10^{-4} \text{ W m}^{-2} \text{ ppb}^{-1}$, o CH₄ absorve mais energia que o CO₂, porém, enquanto o primeiro apresenta um longo tempo de vida, o último tem $11,8 \pm 1,8$ anos. Os potenciais de aquecimento global

(GWP) num horizonte de 100 anos para CH₄-fóssil e CH₄-não fóssil são respectivamente 29,8±11 e 27,0±11 vezes o do CO₂.

Os GWP poderiam levar à interpretação de que outros gases sejam mais impactantes no clima do que o CO₂, porém, dada a enorme disparidade das emissões, estima-se que a contribuição do CO₂ para a forçante radiativa global da era pré-industrial até 2021 seja 66%, comparada a 16% para o CH₄ [26].

A combustão completa de cada mol de CH₄ tem como produtos 1mol de CO₂ e 2mol de H₂O e tem uma entalpia padrão a 25°C de -891kJ [27], a ser avaliada neste trabalho como uma possível alternativa para a substituição parcial do GLP pelo metano, produzido em condições mais controladas do que as encontradas em descartes inadequados de resíduos sólidos, convertendo este gás, após a queima, em produtos com um menor potencial de impacto climático.

Processos e Organismos Envolvidos na Metanogênese

A biossíntese de metano (metanogênese) tem sido amplamente estudada dado o elevado GWP desse gás, produzido pela digestão entérica de animais ruminantes, em áreas alagadas, em aterros sanitários, em águas residuais, ou em qualquer ambiente onde sejam favorecidas as condições para degradação anaeróbia de matéria orgânica. Estas se somam às contribuições não-biológicas como a extração, transporte e armazenagem de combustíveis fósseis.

Na revisão publicada em 2014 Serrano-Silva et.al. [28] discutem condições e rotas para a produção metanogênica por arqueias, em associação com outros organismos, assim como para a decomposição do metano (metanotrofia), ressaltando que, no solo, o CH₄ é fonte tanto de carbono como de energia para organismos metanotróficos. Ressaltam ainda que as arqueias foram divididas em 5 grupos de acordo com o substrato utilizado: hidrogenotróficas, que usam H₂ e CO₂ como substrato, formatotróficas, que usam ácido fórmico, acetotróficas, que usam ácido acético, metilotróficas, que usam metanol ou metilamina e alcoolotróficas, que usam álcoois mais longos, como o propan-2-ol como substrato.

A disponibilidade destes substratos está diretamente relacionada à associação das arqueias com outros microorganismos, o que abre a possibilidade de análise de variáveis que possam propiciar ou inibir a metanogênese, como pressão, temperatura e pH no biodigestor.

Produtos de um Biodigestor

Algumas propostas para a construção de biodigestores podem ser encontradas na revista Química Nova na Escola [29-33]. Dentre os produtos esperados da biodigestão de esterco e cascas de frutas espera-se um biogás com teor em volume entre 55-75% de CH_4 , 25-45% de CO_2 , 0-3% de N_2 , 0-2% H_2 , 0-0,1% de O_2 e 0-1% de H_2S [31], além de um lodo composto principalmente de água, dos organismos envolvidos no processo e de resíduo não completamente processado. A presença de substâncias com Carbono, Hidrogênio e Oxigênio é esperada pela digestão dos carboidratos e lipídios, já o Enxofre e o Nitrogênio provém da digestão de aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos, porém os teores e mesmo a diversidade de substâncias presentes dependem da composição dos resíduos, dos microrganismos envolvidos e das condições específicas nas quais ocorrerá digestão.

Dentre os subprodutos presentes no biogás que merecem atenção especial estão o CO_2 e o H_2S . O primeiro reduz a eficiência da combustão, além de diluir o CH_4 . O H_2S , com odor desagradável e considerável toxicidade, também deve ser controlado devido à corrosão de estruturas metálicas, como o aço dos fogões, e à possibilidade de que, ao passar pelos queimadores, produza substâncias com impactos ambientais consideráveis, como o SO_2 e o SO_3 . Sendo assim, o projeto deve levar em consideração a utilização de filtros para esses gases.

O filtro para CO_2 normalmente envolve a passagem do gás por uma solução básica. Ao reagir com uma base formará sais dos íons carbonato, ou bicarbonato, sendo retirado da mistura gasosa.

O filtro para H_2S costuma ser um tubo de PVC recheado com palha de aço. A passagem do gás resulta na oxidação do aço e formação de sulfeto de ferro, retirando portanto o H_2S do biogás. Mas, como a própria produção do aço apresenta alta produção de GEE, a busca de alternativas para filtrar o H_2S também deve ser objeto de pesquisa. A avaliação do uso das soluções de base é uma possibilidade [33].

Outros Aspectos Físico-químico Considerados

Outros aspectos da físico-química ainda devem ser levados em conta no presente

projeto, como a Lei dos gases ideais, a equação de van der Waals e princípios elementares de termoquímica. Para estes temas qualquer livro que trate de termodinâmica química em abordagem para o ensino superior pode ser usado como base [34-36]

METODOLOGIA DE EXECUÇÃO DO PROJETO

1. LEVANTAMENTOS BIBLIOGRÁFICOS

A realização de levantamentos bibliográficos foi distribuída ao longo do projeto, com uma maior concentração nos meses iniciais, por meio de ferramentas como o Web of Science, com acesso disponível pela Plataforma de periódicos da CAPES, e o Google Acadêmico.

2. CONSTRUÇÃO DO SISTEMA

1. MATERIAIS NECESSÁRIOS

Para uma primeira proposta de protótipo foram necessários os seguintes materiais:

- Câmara de ar aro 13/14;
- 2 bicos de pneu
- bombona de 180 L;
- 2 m de mangueira de 10 mm;
- 2 m de mangueira de 8 mm;
- Registro macho/fêmea 1/4";
- conexão reta fêmea 8 mm 1/4";
- conexão reta fêmea 8 mm 1/8";
- conexão reta macho 10 mm 1/4";
- conexão união cruz 8 mm;
- manômetro;
- chave saca núcleo;
- Registro PVC 20 mm;
- 0,1 m de cano PVC 20 mm;
- Registro PVC 25 mm;
- 0,1 m de cano PVC 25 mm
- 1,5 m de Cano PVC 50 mm;
- 1 garrafa pet de 200 mL;

- soda cáustica;
- água de cal;
- flange 25 mm;
- flange 20 mm;
- flange 50 mm;
- massa epóxi.
- motor dc de 80W, 15A.
- barra de alumínio de seção quadrada com 12,7mm de largura e 50 cm de comprimento
- 5 rolamentos do tipo esfera;
- 2 rolamentos do tipo agulha
- 4 engrenagens helicoidais impressas em impressora 3d;
- Peças que constituem o corpo externo da caixa de redução impressas em impressora 3d;
- 3 peças de suporte para os rolamentos impressas em impressora 3d;
- Barra de aço parcialmente roscada com 1m de comprimento;
- Fonte chaveada 12V, 15A;
- Pressostato de baixa pressão LF20;
- Pressostato RC 200 021;
- Resistores;
- STM32F103C8T6;
- Mosfet - IRF640;
- Parafusos e afins.

2. REATOR

Uma abertura circular com pouco mais de 50 mm de diâmetro foi feita no centro da tampa da bombona. Então, através desta, duas partes de um tubo de PVC com diâmetro 50 mm foram conectadas por meio de uma flange apropriada. O tubo PVC foi previamente

cortado de forma que uma parte tenha 0,5 m de comprimento e a outra, 1 m com um segundo corte na extremidade oposta da parte maior realizado numa angulação de aproximadamente 45° apenas para que sua seção transversal se tornasse uma elipse de área maior do que a do círculo inicial, garantindo, portanto, menores chances de entupimentos. O cano também foi inserido na abertura da bombona com a extremidade elíptica para dentro.

Dois novos furos foram feitos na lateral, um com pouco mais de 25 mm de diâmetro, a 60 mm da base da bombona, e outro com pouco mais de 20 mm, no meio; então, dois canos de PVC com 100 mm de comprimento, um de 25 mm e outro de 20 mm de diâmetro, ambos ligados aos seus respectivos registros, form acoplados às suas correspondentes aberturas e fixados com flanges.

A Figura 1 apresenta um desenho esquemático inicial da proposta. Como é possível ver, inicialmente idealizou-se um sistema em que foram destinadas duas garrafas para os filtros e uma terceira que funcionasse como uma válvula de anti queima, mas a ideia foi abandonada quando inferiu-se que queimas internas seriam improváveis por conta da ausência de oxigênio. O sistema também era muito mais simples: a bomba era, a princípio, manual.

Já a imagem 2 mostra o biodigestor em sua primeira versão de protótipo ainda sem o sistema automatizado de compressão.

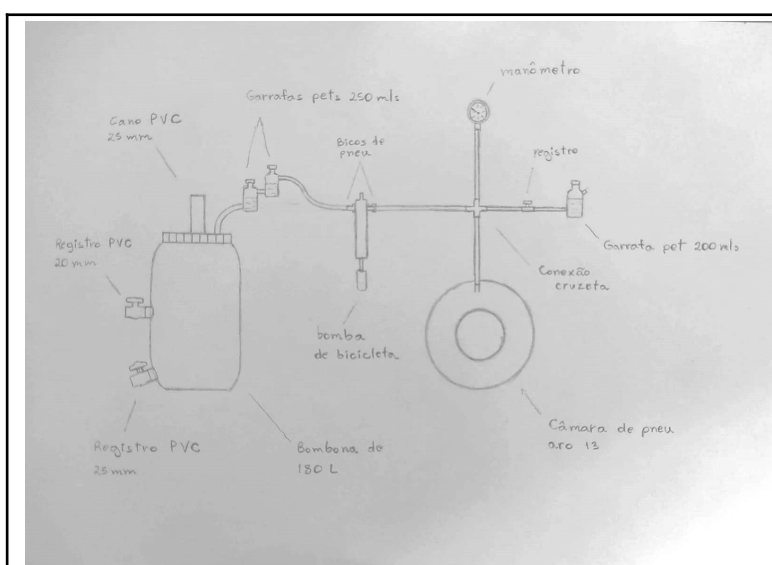


Figura 1: Desenho esquemático da proposta inicial de construção do biodigestor.



3. SISTEMA DE COMPRESSÃO E ARMAZENAMENTO DO GÁS

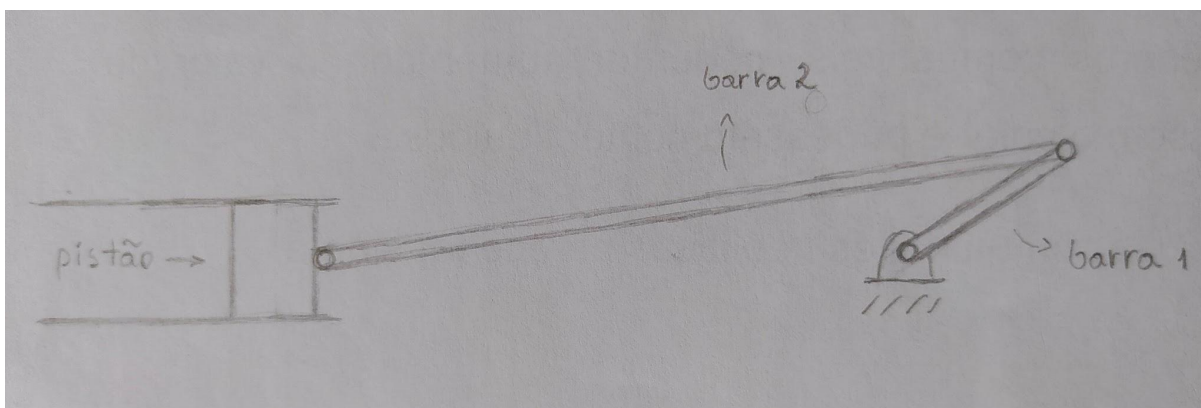
Com o intuito de comprimir o gás, uma bomba utilizando mecanismo biela manivela foi projetada. Nesta, duas válvulas foram criadas a partir de dois bicos de pneu: uma específica para a entrada de gás, e outra para a saída.

Um furo com diâmetro 10 mm foi feito na tampa da bombona, e a este último foi fixada uma conexão reta macho com fita veda rosca para evitar vazamentos. Desta emenda, uma mangueira de mesmo diâmetro externo foi ligada e teve sua outra extremidade conectada ao filtro. Deste, uma outra mangueira também com 10 mm de diâmetro foi acoplada. Sua extremidade oposta foi conectada, por intermédio de um bico de câmara, a válvula de entrada da bomba. Uma terceira mangueira, com diâmetro 8 mm, teve uma de suas extremidades ligada à válvula de saída da bomba, enquanto sua extremidade oposta foi ligada a uma conexão de união cruz. Ambas as fixações das mangueiras aos bicos foram feitas por meio de abraçadeiras. Cada uma das outras três extremidades restantes da emenda em cruz foi ligada, respectivamente, a um manômetro, a uma câmara de pneu e a um registro macho/fêmea de $\frac{1}{4}$ ".

1. Dimencionamento do Compressor

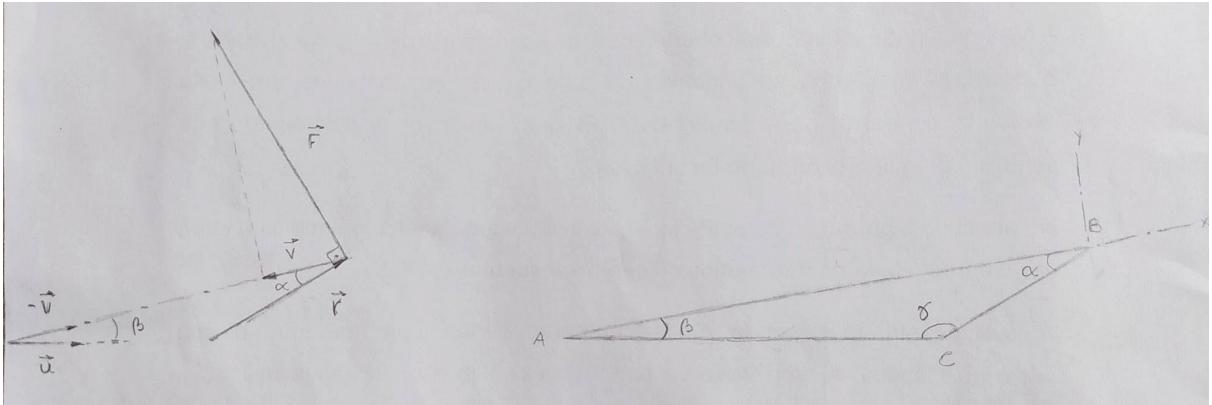
Torque e Potência Máximos

Como dito anteriormente, apenas a potência média é insuficiente para o dimensionamento correto do motor. Recorre-se, então, a uma análise mais aprofundada do mecanismo biela manivela. O desenho a seguir ilustra tal mecanismo:



Conforme o motor impele a barra 1 a se movimentar em torno da junta fixa (o eixo de saída da caixa de redução) o pistão alterna seu movimento entre avanço e recuo, transformando movimento circular em linear.

A análise do mecanismo será por meio de dois diagramas vetoriais, um descrevendo a posição das barras e o outro descrevendo as forças envolvidas, ambos irão se complementar ao fornecer as relações matemáticas necessárias para que se estime o torque máximo ao qual o motor estará sujeito.



O desenho à esquerda representa cada uma das forças a que o mecanismo está sujeito. O vetor $\vec{F}$ é a força perpendicular ao vetor $\vec{r}$, este último, por sua vez, trata-se do vetor que representa a barra 1. $\vec{v}$ é a projeção de $\vec{F}$ no eixo x (que no desenho não foi representado na horizontal) e $\vec{u}$ trata-se da força de reação do pistão.

Já no desenho da direita, temos três segmentos de reta cada qual ilustrando um elo diferente do mecanismo.

Obs: devido às limitações dos recursos do google docs, as setas próprias da simbologia de vetores foram substituídas por segmentos de retas.

Do diagrama de forças da esquerda, abstrai-se duas equações trigonométricas. São elas:

$$I) |\vec{F}| \cdot \cos(90 - \alpha) = |\vec{v}|$$

$$II) |\vec{u}| \cdot \cos \beta = |\vec{v}|$$

No diagrama da direita, uma soma vetorial relaciona cada uma das arestas do triângulo (lembrando que $\vec{AB}$, $\vec{BC}$ e $\vec{AC}$ são vetores):

$$III) \vec{AB} + \vec{BC} = \vec{AC}$$

Esta última equação pode ser desmembrada num sistema. Logo:

$$|\vec{AB}| - |\vec{BC}| \cdot \cos \alpha = |\vec{AC}| \cdot \cos \beta$$

$$|\vec{BC}| \cdot \sin \alpha = |\vec{AC}| \cdot \sin \beta$$

Visando diminuir o número de variáveis, a ideia é colocar β em função de α . Para tanto:

$$\frac{|\vec{AB}| - |\vec{BC}| \cdot \cos \alpha}{|\vec{BC}| \cdot \sin \alpha} = \frac{\cos \beta}{\sin \beta}$$

$$\frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{|\overline{BC}| \cdot \sin \alpha}{|\overline{AB}| - |\overline{BC}| \cdot \cos \alpha}$$

$$\tan \beta = \frac{|\overline{BC}| \cdot \sin \alpha}{|\overline{AB}| - |\overline{BC}| \cdot \cos \alpha}$$

Por fim:

$$IV) \quad \beta = \arctg\left(\frac{|\overline{BC}| \cdot \sin \alpha}{|\overline{AB}| - |\overline{BC}| \cdot \cos \alpha}\right)$$

Tendo β em função de α , a próxima etapa é manipular as equações do diagrama de forças. É evidente que I e II são iguais, logo:

$$|\overline{F}| \cdot \cos(90 - \alpha) = |\overline{u}| \cdot \cos \beta$$

Isolando-se $|\overline{F}|$, tem-se:

$$|\overline{F}| = \frac{|\overline{u}| \cdot \cos \beta}{\cos(90 - \alpha)}$$

Mas como a variável de interesse é o torque, multiplica-se ambos os lados da igualdade por $\overline{r}$, o braço. Logo:

$$T = \frac{|\overline{u}| \cdot \cos \beta}{\cos(90 - \alpha)} \cdot |\overline{r}|$$

E como $|\overline{r}| = |\overline{BC}|$ (ver desenho), logo:

$$V) \quad T = \frac{|\overline{u}| \cdot \cos \beta}{\cos(90 - \alpha)} \cdot |\overline{BC}|$$

Como já foi dito, o vetor $\overline{u}$ é a força de reação do pistão, ou seja, é a força que se opõe ao movimento durante a fase de compressão. Tal força provém da pressão interna da câmara, que resiste à entrada de mais gás.

Na fase de compressão, a válvula de retenção entre a bomba e a câmara se abre, garantindo que a pressão nos dois meios seja igual; assim a pressão interna da câmara exerce uma força no pistão que é oposta ao sentido de movimento deste. Como é evidente, tal força pode ser calculada como:

$$|\overline{u}| = P \cdot A$$

Sendo P a pressão da câmara e A a área do êmbolo. Como este último tem seção transversal circular, tem-se que:

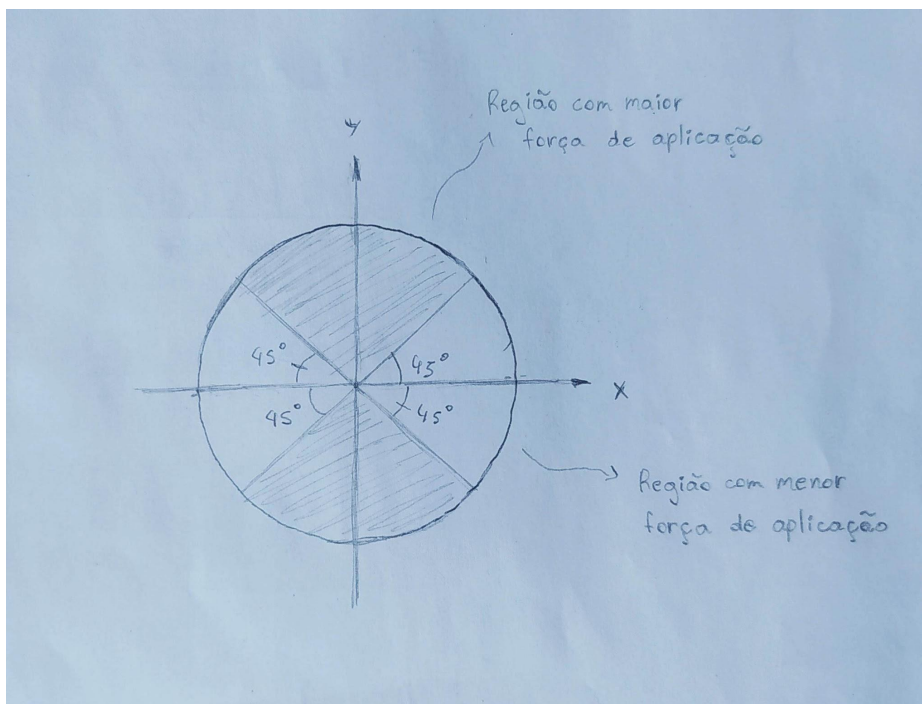
$$VI) \quad |\overline{u}| = \frac{P \cdot \pi \cdot d^2}{4}$$

Substituindo VI e IV em V, obtém-se:

$$T = \frac{P \cdot \pi \cdot d^2 \cdot \cos\left[\arctg\left(\frac{|\overline{BC}| \cdot \sin \alpha}{|\overline{AB}| - |\overline{BC}| \cdot \cos \alpha}\right)\right]}{4 \cdot \cos(90 - \alpha)} \cdot |\overline{BC}|$$

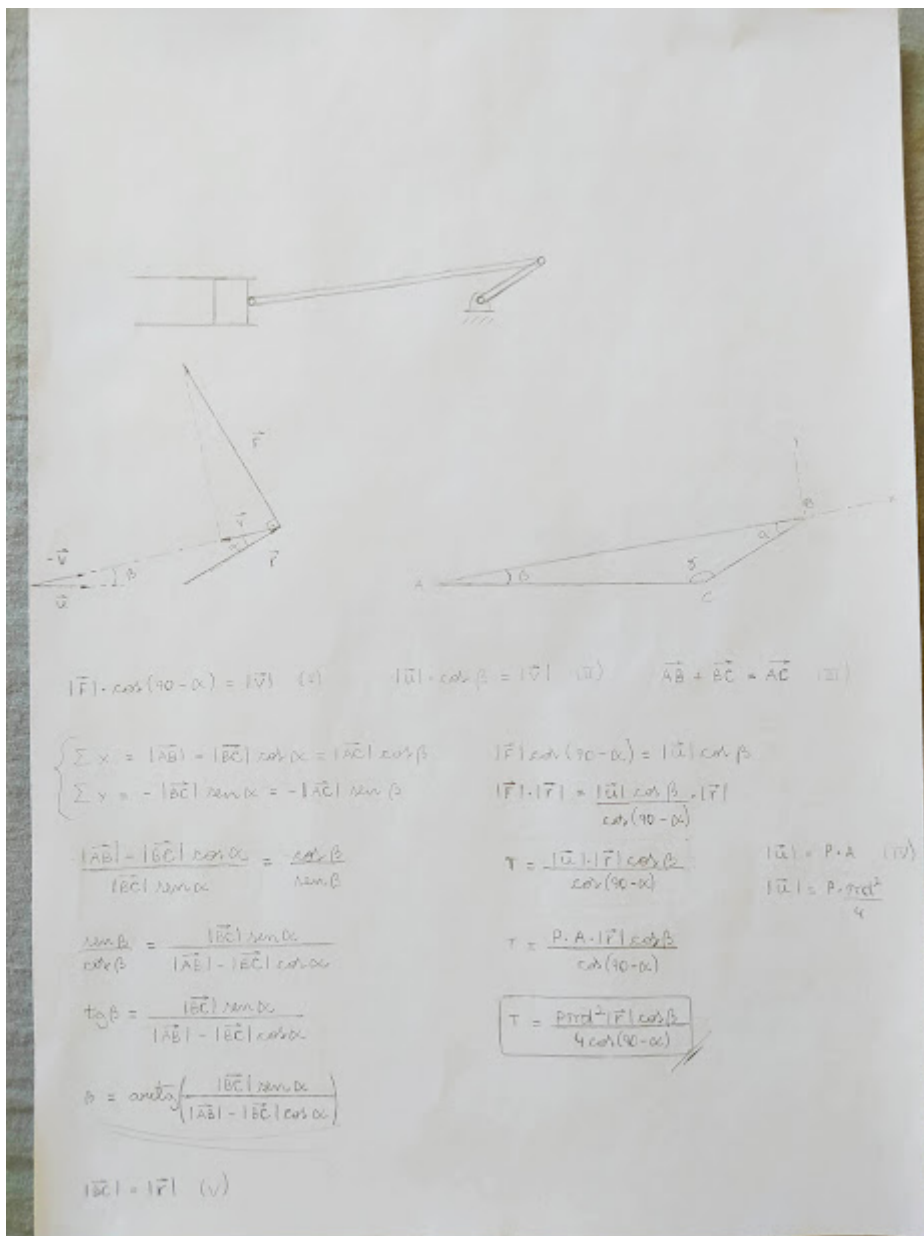
E finalmente consegue-se uma relação útil para o torque. É evidente que $|\overline{AB}|$ e $|\overline{BC}|$ são constantes já que equivalem aos comprimentos das barras; o mesmo pode ser dito do diâmetro d do êmbolo e de P , que é a pressão da câmara em sua máxima capacidade (lembrar que o torque calculado foi o torque máximo ao qual o mecanismo estará sujeito). Aquela que é a única variável e, portanto, aquilo que determina o domínio da função é α , logo, para determinar um valor apropriado para T precisa-se antes atribuir um valor adequado para α ; para tanto, partirá-se-ei da premissa de que idealmente o módulo da projeção de $\overline{F}$ no eixo x deve ser maior do que o módulo da projeção de $\overline{u}$, também em x , em ao menos metade do período de um ciclo. Isso garante que (desprezando-se as perdas por atrito) o mecanismo se mantenha em movimento por inércia. Também é sabido que conforme a barra 1 se aproxima da vertical, a componente de sua força tangencial na direção do movimento do pistão aumenta, logo, para ângulos γ (ver figura j, desenho da direita) próximos de 180° ou 0° , a força aplicada sobre o pistão é menor.

Imaginado-se o movimento da barra 1 em torno do elo fixo dentro de um círculo trigonométrico para um γ variando continuamente, e dividindo simetricamente este círculo em dois tipos de regiões distintas, cada qual de mesma área, tem-se que o limiar entre a região onde a força sobre o pistão tende a ser maior e a força tende a ser menor caracteriza uma $\gamma = 45^\circ$. A figura a seguir ilustra o que foi descrito.



As regiões hachuradas indicam a faixa de posição em que o vetor $\vec{F}$ tem sua maior projeção em $\vec{u}$, ou seja, são as regiões em que mecanismo possui maior eficiência; em contrapartida, as regiões em branco indicam a faixa de posição em que $\vec{F}$ tem sua menor projeção em $\vec{u}$. Respeitando-se a premissa pré-estabelecida e distribuindo-se as duas regiões simetricamente, tem-se que $\gamma = 45^\circ$.

Imaginando-se o comportamento de α durante o funcionamento do mecanismo, observa-se que este se comporta de maneira idêntica a γ no que tange a sua relação com a projeção de $\vec{F}$ em $\vec{u}$; sendo mais claro, também quanto mais próximo do valor de 0° ou 180° α estiver, menor é a força aplicada sobre o pistão, portanto 45° é um valor razoável para se assumir para α . A imagem a seguir compila todos os cálculos da etapa de dimensionamento.



The image shows handwritten engineering calculations and diagrams. At the top, there is a small schematic of a mechanism with a piston and a connecting rod. Below it, two vector diagrams illustrate the projection of force $\vec{F}$ onto the connecting rod axis $\vec{u}$. The first diagram shows the force $\vec{F}$ at an angle β to the axis $\vec{u}$, with its projection $\vec{F}_u$ and the perpendicular component $\vec{F}_\perp$. The second diagram shows the same setup with angles α and γ indicated.

The derivations are as follows:

$$|\vec{F}| \cdot \cos(90^\circ - \alpha) = |\vec{F}_u| \quad (i)$$

$$|\vec{u}| \cdot \cos \beta = |\vec{F}_u| \quad (ii)$$

$$\vec{AB} + \vec{BC} = \vec{AC} \quad (iii)$$

$$\begin{cases} \sum x = |\vec{AB}| = |\vec{BC}| \cos \alpha = |\vec{AC}| \cos \beta \\ \sum y = -|\vec{BC}| \sin \alpha = -|\vec{AC}| \sin \beta \end{cases}$$

$$\frac{|\vec{AB}| - |\vec{BC}| \cos \alpha}{|\vec{BC}| \sin \alpha} = \frac{\cos \beta}{\sin \beta}$$

$$\tan \beta = \frac{|\vec{BC}| \sin \alpha}{|\vec{AB}| - |\vec{BC}| \cos \alpha}$$

$$\beta = \arctan \left(\frac{|\vec{BC}| \sin \alpha}{|\vec{AB}| - |\vec{BC}| \cos \alpha} \right)$$

$$|\vec{BC}| = |\vec{F}| \quad (v)$$

$$|\vec{F}| \sin(90^\circ - \alpha) = |\vec{u}| \cos \beta$$

$$|\vec{F}| \cdot |\vec{r}| = \frac{|\vec{u}| \cos \beta \cdot |\vec{r}|}{\cos(90^\circ - \alpha)}$$

$$T = \frac{|\vec{u}| \cdot |\vec{r}| \cos \beta}{\cos(90^\circ - \alpha)}$$

$$|\vec{u}| = P \cdot A \quad (iv)$$

$$|\vec{u}| = \frac{P \cdot \pi r^2}{4}$$

$$T = \frac{P \pi r^2 |\vec{r}| \cos \beta}{4 \cos(90^\circ - \alpha)}$$

DESCRIÇÃO DO FUNCIONAMENTO DO COMPRESSOR

A proposta deste projeto inclui o desenvolvimento de um compressor, que faz parte do sistema integrado do biodigestor, com a finalidade de comprimir e armazenar o biogás produzido durante o processo de digestão anaeróbica. O compressor é acionado por um motor DC de 80W, acoplado a um mecanismo biela-manivela, que converte movimento rotativo em movimento alternado necessário para o funcionamento do pistão compressivo. As barras do mecanismo são feitas de alumínio, material escolhido pela sua leveza e resistência à flexão, com seções dimensionadas para suportar as cargas mecânicas envolvidas, sem comprometer a eficiência do sistema.

Para garantir o controle da pressão do biogás, foi integrado um pressostato de baixo custo, com o objetivo de manter a pressão do reservatório e, consequentemente, evitar estresse osmótico nos microrganismos anaeróbicos, assegurando que o processo de digestão e produção de biogás não seja comprometido.

Além disso, o compressor conta com um circuito eletrônico, baseado em um microcontrolador STM32F103C8T6, que aciona o motor do compressor sempre que um sinal do pressostato for recebido. O circuito inclui um foto acoplador, garantindo isolamento elétrico entre os componentes de controle e os de potência, e um MOSFET, responsável pelo acionamento do motor, já que as tensões e correntes entre microcontrolador e pressostato não são compatíveis. Essa configuração permitiu um controle preciso e seguro do funcionamento do compressor, com foco na eficiência e na utilização de materiais acessíveis.

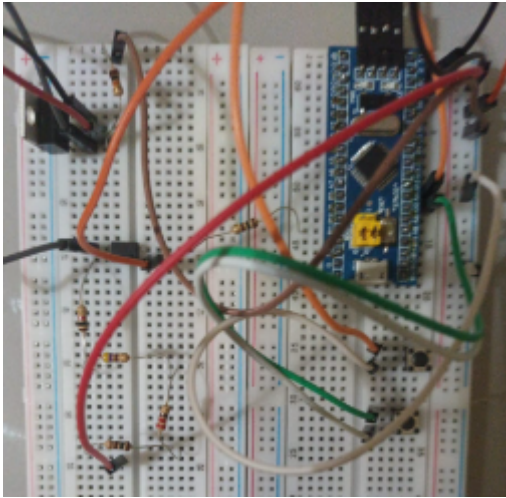
CIRCUITO ELETRÔNICO PARA ACIONAMENTO DO MOTOR

Para o sistema de controle de acionamento do motor, utilizou-se o microcontrolador STM32F103C8T6. A partir do fechamento do circuito nos dois pinos de entrada do STM32, a saída deste mandará um sinal elétrico que se manterá em um tempo determinado pelo delay colocado na programação.

Com a lógica “E” programada no STM, um sinal será mandado para o mosfet IRF640 que fechará o contato entre a fonte e o motor.

Para assegurar que não haja ruídos atrapalhando o sinal, foi utilizado um foto acoplador entre o pino de saída do microcontrolador e o gate do mosfet. Ademais, há alguns resistores para que não passe uma tensão além do necessário pelos componentes eletrônicos.

A imagem abaixo mostra o circuito eletrônico utilizado:



STM32F103C8T6: Controla o acionamento com uma lógica E programada em C dos pressostatos

Foto acoplador PC817: Protege contra ruídos.

Mosfet IRF640: Utilizado como um interruptor eletrônico, em que fecha contato com uma tensão de saturação do gás e fecha contato do motor. Sua principal função é acionar aparelhos de alta tensão com componentes de baixa tensão.

PROGRAMAÇÃO DO STM32F103C8T6

Define

```
#Define P1  GPIO_C,GPIO_PIN_9 //Define o pino de entrada do P1 como C9
#Define P2  GPIO_C,GPIO_PIN_10 //Define o pino de entrada do P2 como C10
#Define M1  GPIO_C,GPIO_PIN_11 //Define o pino de saída do M1 como C11
```

int main(void)

```
while(1) {

    if((HALL_GPIO_ReadPin(P1) == 1) & (HALL_GPIORead(P2) == 1)) {
        HALL_GPIOWrite(M1,1);
        HALL_Delay(600000);
    }
}
```

}

}

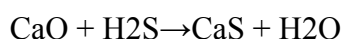
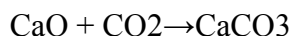
4. FUNCIONAMENTO DO SISTEMA

Depois de coletados, os resíduos de alimentos são misturados com água e batidos em um liquidificador. A mistura é despejada na bombona através do cano de PVC. Uma vez que a bombona esteja cheia da mistura, o registro PVC de 20 mm é aberto para permitir que os níveis da mistura reduzam a níveis satisfatórios. Ao longo dos dias, os microrganismos se reproduzirão no biodigestor e suas digestões gerarão principalmente gás metano e dióxido de carbono. Estes fluirão em direção à bomba, passando antes pelo filtro, onde serão separados. No filtro, o CO₂ e H₂S ficarão retidos, e o gás metano com presença reduzida de outros gases seguirá. Uma vez puxado o êmbolo da bomba, o metano fluirá para dentro do cilindro e depois, com o êmbolo pressionado, será pressurizado na câmara de pneu onde ficará armazenado. Sempre que se desejar utilizar o gás armazenado, basta que se abra o registro.

5. FILTROS PARA CO₂ E H₂S

Para aumentar o potencial energético do biogás gás, bem como o ecológico com a captação de CO₂, é essencial que se separe este último do metano. Para tal, conta-se com uma solução de cal (CaO) pela qual o gás passará. A reação do CO₂ com o óxido de cálcio tem carbonato de cálcio como produto (CaCO₃), um sólido insolúvel que decantaria dentro do filtro.

Já com relação ao sulfeto de hidrogênio (H₂S), é importante separá-lo da mistura por conta de sua propriedade corrosiva e por seu mau odor, pois este gás é produzido por matéria orgânica em putrefação e bastam poucas partes por milhão numa mistura gasosa para que possa ser percebido. Ao passar pela mesma solução, o produto da reação seria água e sulfeto de cálcio, um sólido branco. Seguem abaixo respectivamente as duas reações químicas.



Considerações Finais

O projeto e desenvolvimento do protótipo envolveu diferentes etapas que se iniciaram na pesquisa bibliográfica, seguindo respectivamente em seguida por fases como idealização, diagramatização, modelagem matemática, revisão e, por fim, prototipagem. Espera-se que sua conclusão possa contribuir com a literatura acadêmica e seu emprego em domicílios visando a minimização de impactos ambientais possa ser estudado como uma possibilidade real. Particularmente, uma vez que sua utilização se torne economicamente viável, ao menos três impactos ambientais seriam evitados: uso de gás GLP, descarte de lixo orgânico em aterros e uso de sacolas plásticas. Somado a isso tem-se a vantagem econômica ao se dispensar o uso de botijões de gás.

Referências Bibliográficas

- [1] CORFEE-MORLOT, Jan; MASLIN, Mark; BURGESS, Jacquelin. Global warming in the public sphere. **Philosophical Transactions of The Royal Society A**, Saint Andrews, Reino Unido, v. 365, ed. 1860, p. 2741-2776, 2007.
- [2] FOURIER, Jean-Baptiste Joseph. Remarques Générales sur les Temperatures du globe terrestre et des espaces planétaires. **Annales de Chimie et de Physique**, Paris, França, v. 27, p. 136-167, 1824.
- [3] BURGESS, Ebenesser. General Remarks on the Temperature of the Terrestrial Globe and the Planetary Spaces. **The American Journal of Science and Arts**, New Haven, EUA, v. 32, p. 1-20, 1837.
- [4] FOOTE, Eunice. Circumstances affecting the Heat of the Sun's Rays. **The American Journal of Science and Arts**, Nova York, EUA, v. 22, p. 382-383, 1856.

- [5] TYNDALL, John. **Contributions to Molecular Physics in the Domain of Radiant Heat**. 3. ed. Nova York, EUA: D. Appleton and Company, 1873
- [6] ARRHENIUS, Svante. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v.41, n°251, p. 237-276, 1896.
- [7] KNUT ANGSTROM ON ATMOSPHERIC ABSORPTION. **Monthly Weather Review**, v. 29, n. 6, p. 268–268, jun. 1901.
- [8] MILANKOVITCH, Milutin. **Mathematische Klimalehre und astronomische Theorie der Klimaschwankungen**. Berlin, Alemanha: Gebrüder Borntraeger, 1930.
- [9] HULBURT, Edward Olson. The Temperature of the Lower Atmosphere of the Earth. **Physical Review**, v. 38, n. 10, p. 1876–1890, 15 nov. 1931.
- [10] CALLENDAR, Guy Stewart. The artificial production of carbon dioxide and its influence on temperature. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 64, n. 275, p. 223–240, abr. 1938.
- [11] SUESS, Hans Eduard. Radiocarbon Concentration in Modern Wood. **Science**, v. 122, n. 3166, p. 415–417, 2 set. 1955.
- [12] PLASS, Gilbert Norman. The Carbon Dioxide Theory of Climatic Change. **Tellus**, v. 8, n. 2, p. 140–154, maio 1956.
- [13] REVELLE, Roger; SUESS, Hans Eduard. Carbon Dioxide Exchange Between Atmosphere and Ocean and the Question of an Increase of Atmospheric CO₂ during the Past Decades. **Tellus**, v. 9, n. 1, p. 18–27, fev. 1957.
- [14] KEELING, Charles David. The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere. **Tellus**, v. 12, n. 2, p. 200–203, jan. 1960.
- [15] KEELING, Charles David et al. Atmospheric CO₂ and ¹³CO₂ Exchange with the Terrestrial Biosphere and Oceans from 1978 to 2000: Observations and Carbon Cycle Implications. Em: BALDWIN, I. T. et al. (Eds.). **A History of Atmospheric CO₂ and Its Effects on Plants, Animals, and Ecosystems**. New York: Springer-Verlag, 2005. v. 177p. 83–113.
- [16] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE et al. (EDS.). **Climate change: the IPCC scientific assessment**. Cambridge ; New York: Cambridge University Press, 1990.
- [17] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE et al. (EDS.). **Climate**

Change 1995: A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 1996.

- [18] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE et al. (EDS.). **Climate Change 2001: Synthesis Report. A Contribution of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, and New York, NY, USA. 2001.
- [19] PACHAURI, R. K.; IPCC (EDS.). **Climate change 2007: contribution of Working Groups I, II and III to the fourth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 4: Synthesis report: [a report of the Intergovernmental Panel on Climate Change]** / ed. by Rajendra K. Pachauri. Geneva: IPCC, 2008.
- [20] PACHAURI, R. K.; MAYER, L.; INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (EDS.). **Climate change 2014: synthesis report**. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change, 2015.
- [21] CALVIN, K. et al. IPCC. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. (P. Arias et al., Eds.). [s.l.] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 25 jul. 2023.
- [22] BENESTAD, R. E. et al. Learning from mistakes in climate research. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 126, n. 3–4, p. 699–703, nov. 2016.
- [23] TAM, K.-P.; CHAN, H.-W. Conspiracy theories and climate change: A systematic review. **Journal of Environmental Psychology**, v. 91, p. 102129, nov. 2023
- [24] SUPRAN, G.; ORESKES, N. Assessing ExxonMobil's climate change communications (1977– 2014). **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 8, p. 084019, 1 ago. 2017.
- [25] INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. 1. ed. [s.l.] Cambridge University Press, 2023.
- [26] World Meteorological Organization. **WMO Greenhouse Gas Bulletin No. 18: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2021**, 2022, ISSN 2078-0796.
- [27] HAYNES, W. M.; LIDE, D. R.; BRUNO, T. J. (EDS.). **CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data**.

2016–2017, 97th edition /. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2017.

[28] SERRANO-SILVA, N.; SARRIA-GUZMÁN, Y.; DENDOOVEN, L.; LUNA-GUIDO, M. Methanogenesis and Methanotrophy in Soil: A Review. **Pedosphere**, v. 24, n. 3, p. 291–307, jun. 2014.

[29] KONDO, Márcia M.; ROSA, Vinícius, A. M. Protótipo de reator anaeróbio: Tratamento de esgoto doméstico nas escolas. **Química Nova na Escola**, v. 26, p. 33-36, nov. 2007.

[30] REIS, André L. Q.; FIGUEIREDO, Gesivaldo J. A.; SANTOS, M. L. B.; SANTOS, S. R. B. Uso de Um Digestor Anaeróbio Construído com Materiais Alternativos para Contextualização do Ensino de Química. **Química Nova na Escola**, v.33, n.1, p. 19-24, nov. 2009.

[31] SOUZA, Fábio L.; Martins, P. Ciência e Tecnologia na Escola: Desenvolvendo Cidadania por meio do Projeto “Biogás – Energia Renovável para o Futuro”. **Química Nova na Escola**, v.31, n.4, p. 265-267, fev. 2011.

[32] OLIVEIRA, Haroldo G.; ANTONELLO, Ricardo; FIDELIS, A. J.; RINALDI, Bruno J. D. Energia, Sociedade e Meio Ambiente no Desenvolvimento de Um Biodigestor: a Interdisciplinaridade e a Tecnologia Arduino para Atividades Investigativas. **Química Nova na Escola**, v. 40, n. 3, p. 144- 152, ago. 2018.

[33] PAIXÃO, Valéria V. M. P.; BATISTA, Carlos H.; CRUZ, Maria C. P. Construção de um biodigestor na escola: um estudo de caso fundamentado numa perspectiva Ciência, de caso fundamentado numa perspectiva Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS). **Química Nova na Escola**, v.41, n. 4, p. 351-359, nov. 2019.

[34] LEVINE, Ira N. **Físico-Química**. 6, ed. Rio de Janeiro: Ltc-Livros Tecnicos E Cientificos Editora Lda, 2014.

[35] MCQUARRIE, D. A.; SIMON, J. D. **Physical chemistry: a molecular approach**. Sausalito, Calif: University Science Books, 1997.

[36] ATKINS, P.; DE PAULA, J. **Físico química: volume 1**. 10. ed. Rio de Janeiro: Ltc-Livros Tecnicos E Cientificos Editora Lda, 2018.

Declaração de Originalidade: “Declaro, para os devidos fins, que este trabalho é original e que todas as fontes utilizadas foram devidamente referenciadas.”

