

PERSPECTIVAS TÉCNICAS DO USO DO BIOGÁS COMO MATRIZ ENERGÉTICA INDUSTRIAL

Eduarda Duarte da Silva (Centro Universitário Padre Anchieta)

Vitor Raphael de Carvalho Moraes (Centro Universitário Padre Anchieta)

Tatiana Lança (Centro Universitário Padre Anchieta)

RESUMO

A biodigestão anaeróbica apresenta um potencial alternativo para aplicação de um tratamento econômico-ambiental na liberação do gás metano a partir da decomposição da matéria orgânica, que em excesso se torna um agente participativo, contribuindo para o efeito estufa (GEE). Neste contexto, o presente artigo modela condições operacionais para um modelo eficaz e de menor custo, discorrendo uma opção para viabilizar a implementação de um biodigestor, com o objetivo de gerar energia mediante o uso do biogás produzido pelo mesmo, promovendo a possibilidade de investimento com retorno em médio prazo, devido à dispensa do uso da companhia de rede elétrica, passando a utilizar energia gerada pelo gás, a mesma é convertida mediante ao processo de combustão por um motor de ciclo Otto. Desta forma foram estipuladas informações para o estudo e os resultados apresentados tem a intenção de mostrar que o processo de combustão do biogás contribui tanto para a indústria quanto para o meio ambiente. **PALAVRAS-CHAVES: biodigestor, biogerador, ambiental, economia e viabilização do biogás.**

ABSTRACT

Anaerobic digestion presents an alternative potential for the application of an economic-environmental treatment in the release of methane gas from the decomposition of organic matter, which in excess becomes a participatory agent, contributing to the greenhouse effect (GHG). In this context, this article models operational conditions for an effective and lower cost model, discussing an option to enable the implementation of a biodigester, with the objective of generating energy through the use of biogas produced by it, promoting the possibility of investment with return in the medium term, due to the company's dispensing with the electricity grid, starting to use energy generated by gas, which is converted through the combustion process by an Otto cycle engine. Thus, information was stipulated for the study and the results presented are intended to show that the biogas combustion process contributes both to the industry and to the environment.

KEYWORDS: biodigester, biogenerator, environmental, economy and feasibility of biogas.

1. INTRODUÇÃO

O processo de urbanização é uma das mais agressivas formas de relacionamento entre o homem e o meio ambiente, a partir da revolução industrial o modo de crescimento das cidades acelerou devido à migração da população, fenômeno nomeado de êxodo rural, devido a esses fatores dois problemas foram gerados: o excesso de insumos e a utilização de energias não renováveis como matriz energética.

O aumento na taxa de produção de resíduos sólidos no Brasil e no mundo ocasionado pelo aumento populacional e as atividades industriais, têm se tornado um problema gravíssimo de saneamento básico e até mesmo de saúde pública. Atualmente, a maioria das cidades brasileiras gera quantidades de resíduos que vão além da capacidade de coletar e acondicionar racionalmente. (SILVA, 2009, p.2)

A respeito dos dois problemas relatados, há um método que pode solucionar ambos, sendo esse, o preparo e direcionamento dos resíduos a um processo de biodigestão com biodigestores. O método reutiliza a matéria que seria descartada, transformando a sua maior parte em metano, uma fonte energética gasosa que utilizada como alimento para processos de combustão térmica ou transformação elétrica, contribui para a revitalização do solo e a independência de fontes não renováveis, proporcionando benefícios econômicos e ambientais.

A digestão anaeróbia consiste na degradação dos materiais orgânicos por microrganismos capazes de utilizar moléculas diferentes do oxigênio como aceptores de hidrogênio, isto é, as bactérias devem estar em um ambiente anóxico. Este processo de digestão envolve um consórcio de diferentes tipos de bactérias e algas competidoras, transformando material orgânico em metano, dióxido de carbono, hidrogênio e ácido sulfídrico (OLIVERA, *et AL*, 2012,p.10, *apud* NOVAES, 1986; PRICE; CHEREMISINOFF, 1981).

Nesse contexto foi analisada a alternativa da troca da matriz energética de indústrias alimentícias por geradores a biogás, desenvolvendo no decorrer do estudo um manual de delimitações e modelagens para a adaptação de sistemas a essa fonte energética. A proposta não se restringe apenas a empresas do seguimento alimentício, podendo ser aplicada em outras áreas, entretanto utiliza-se essa área como referência uma vez que o subproduto gerado tem composição orgânica adequada ao processo de biodigestão.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1. Origem e Descarte dos Resíduos

Os resíduos têm características próprias como: aspectos físicos, químicos e biológicos. A análise destes facilita a classificação macro dos mesmos. As características analisadas são: estado físico, cor, odor, processo de origem e grau de heterogeneidade. A partir dessas informações é possível classificar de acordo com os riscos potenciais ao meio ambiente e a saúde pública, conforme especificado na NBR 10.004/04 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2004, p.2).

Os resíduos são classificados primordialmente em classes:

Classe I: os perigosos que contém características específicas de corrosão, reatividade, inflamabilidade, toxicidade e patogenicidade.

Classe II: os não perigosos divididos em: não inertes e inertes, são resíduos que quando em contato com a água não a contaminam, não apresentam em nenhum dos seus compostos concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água, exceto por modificação de aspecto, turbidez, cor, sabor ou dureza.

É importante destacar que os resíduos nucleares não são objeto da NBR 10.004/04, pois são de competência exclusiva da Comissão Nacional de Energia Nuclear.

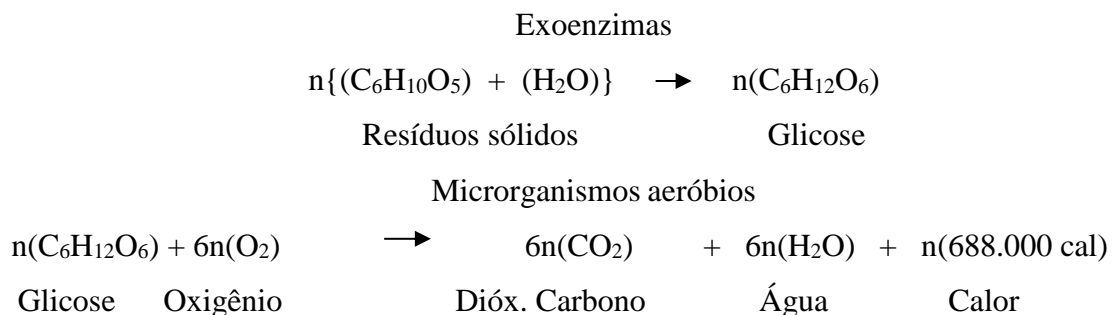
2.2. Processos anaeróbios de decomposição dos insumos sólidos

De acordo com Fleck (2003, p.9, apud CHERNICHARO, 1997), a digestão anaeróbia é um processo biológico no qual substratos são, em diversas etapas metabólicas, convertidos em compostos termodinamicamente mais estáveis através da ação de um sistema ecologicamente balanceado de microrganismos em uma relação comensal. O produto final desse processo acaba sendo em sua maioria o metano, um gás que possui elevada energia química. Esse processo ocorre também com alguns outros animais que utilizam o oxigênio como fonte de energia, tendo como produto ou subproduto o CH₄, por exemplo, a pecuária. Outros produtos finais decorrentes da digestão dos resíduos podem ser quantificados como: o gás carbônico, a água, o gás sulfídrico e a amônia (nitrogênio amoniacal). Por se tratar de um ecossistema com pouca ou nenhuma presença de oxigênio, os compostos inorgânicos, nitratos, sulfatos e dióxido de carbono, assumem o papel de aceptores de elétrons.

O processo de decomposição dos resíduos sólidos pode ser dividido em progressivas etapas metabólicas, porém de maneira geral o processo final de conversão dos compostos carbonáceos aos produtos finais pode ser considerado a soma de cinco fases metabólicas:

Fase I – Hidrólise enzimática

Essa é a primeira fase do processo da decomposição, e por isso ocorre em condições onde há presença de oxigênio (condições aeróbias), segundo Fleck (2003, p.10, apud LIMA, 1995), tal fase é viabilizada pela habilidade das cepas aeróbias presentes nos resíduos sólidos em aproveitar rapidamente o oxigênio dissolvido na massa de resíduos antes de sua extinção. Devido a isso, a temperatura do meio eleva-se ao estágio mesófilo ou mesmo termófilo, podendo alcançar 68°C. O pH do meio encontra-se na faixa 4,0-5,0. Papel fundamental nesta fase é exercido pelas exoenzimas disponibilizadas pelas bactérias, que, externamente às células, catalisam as reações de hidrólise das macromoléculas, produzindo compostos solúveis de menores cadeias, os quais podem atravessar as paredes celulares e serem metabolizados. Expressando matematicamente as reações básicas que ocorrem em tal fase:



Fase II - Acidogênese

Nessa etapa o oxigênio molecular é reduzido à zero, têm como formação: açúcares simples, aminoácidos e ácidos carboxílicos de cadeia longa, bactérias acidogênicas são as principais responsáveis por uma espécie natural de pirólise, fragmentando as longas cadeias e produzindo ácidos de cadeias curtas, álcoois, gás carbônico, hidrogênio, amônia e sulfeto de hidrogênio. Os principais ácidos produzidos nesta fase são acéticos, propiônico, butírico, isobutírico, valérico e isovalérico. Nesta fase a temperatura cai ao estado mesofílico (29-45°C) e o pH do meio situa-se entre 5,2 e 6,8 (FLECK, 2003, p.12, apud LIMA, 1995).

Fase III – Acetogênes

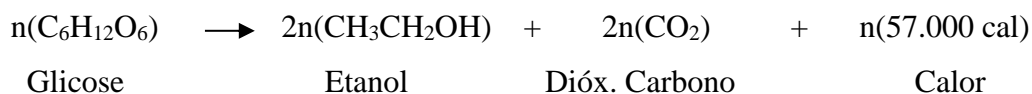
Nessa parte do processo, os produtos gerados na fase anterior são convertidos a acetato, hidrogênio e dióxido de carbono por bactérias acetogênicas. Nesse período, o meio aquoso se acidifica devido à grande formação de hidrogênio com a redução do pH, porém a utilização do hidrogênio pelas bactérias metanogênicas, sulforredutoras e demais presentes, caracterizam-se

por mecanismos que proporcionam uma queda sutil do pH e promovem o deslocamento das reações de acetato no seu sentido direto, liberando energia para o meio.

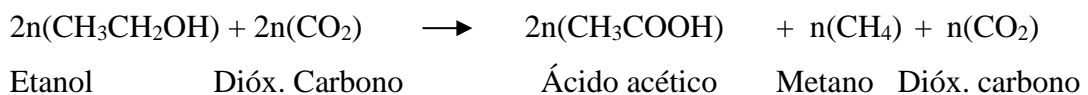
Fase IV – Metanogênese

Nesse período, as bactérias anaeróbias estritas transformadoras dos produtos das demais fases em metano (bactérias metanogênicas) predominam todo o meio, o pH é alterado à faixa de 6,8 – 7,2 com temperatura na faixa mesofílica, as mesmas são divididas em dois grupos de acordo com a fonte de alimento utilizada: as acetoclásticas e as hidrogenotróficas. O primeiro grupo, onde se destacam os gêneros *Methanosarcina* e *Methanothrix*, é responsável por 60-70% da produção de metano, utilizando o grupo metil do acetato (FLECK, 2003, p.13, apud CHERNICHARO, 1997). O segundo conjunto produz o metano a partir do dióxido de carbono e hidrogênio, o consumo de hidrogênio é vital para esse processo, uma vez que é essencial para o rebaixamento da pressão parcial presente no meio, tornando viável a continuidade dos processos metabólicos das fases anteriores. Fleck (2003, p.13, apud LIMA, 1995) expressou matematicamente as reações básicas das fases II, III e IV conforme segue:

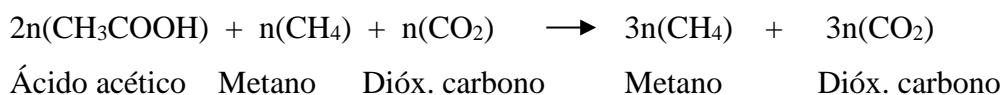
Microrg. hidrolisantes e fermentativos



Microorg. acetogênicos e metanogênicos



Microrg. metanogênicos



Fase V – Oxidação metânica

Por fim de todo o processo de decomposição, é obtido como produto final: o metano, dióxido de carbono e traços de gás sulfídrico; podendo gerar na forma gasosa: nitrogênio, oxigênio e hidrogênio.

2.3. TDH

O tempo de detenção hídrica é o período que o resíduo permanece no interior do biodigestor, em função do tipo de biomassa (materiais passíveis de decomposição), granulometria da biomassa, temperatura do digestor, pH da biomassa, etc., determina-se o tempo de retenção, podendo variar de 4 a 60 dias (FILHO, 1981, p.16).

2.4. Biodigestores

O biodigestor é composto de uma estrutura física conhecida como câmara, onde se tem o processo de degradação da matéria orgânica. Esta estrutura pode ser cilíndrica, vertical e superficial, ou seja, acima do solo, acompanhada de uma campânula onde se acumula o gás que é despreendido da digestão da biomassa chamado de gasômetro (FRIGO, 2015, p.58, apud PINTO, 2008).

Podemos definir os biodigestores anaeróbios como sendo uma câmara fechada, onde são colocados os substratos orgânicos para serem degradados na ausência de oxigênio molecular, tendo como produto a formação do biogás e um efluente rico em nutrientes (FRIGO, 2015, p.58, apud FILHO, 2014).

2.4.1. Modelo indiano

Este tipo de modelo é caracterizado possuir uma campânula que é uma espécie de tampa conhecida como gasômetro, a qual pode estar mergulhada sobre a biomassa em fermentação ou pode estar em um selo d'água externo. Sua estrutura é composta de uma parede central que serve para dividir o tanque de fermentação de duas câmaras, para assim permitir que o material possa circular pelo interior da câmara de fermentação (FRIGO, 2015, p.59, apud TARRENTO, 2006). O biodigestor indiano é característico por possuir pressão de operação constante, isso significa que o volume de gás produzido não é consumido de imediato e faz com que o gasômetro tende a se deslocar verticalmente aumentando o volume do mesmo mantendo a pressão no interior (FRIGO, 2015, p.59, apud DEGANUTTI et al., 2002).

2.4.2. Modelo Chinês

Este tipo de biodigestor é formado por uma câmara cilíndrica em alvenaria onde ocorre a fermentação, apresenta um teto impermeável e abobado que é destinado ao armazenamento do biogás. O seu funcionamento é com base no princípio de prensa hidráulica, ocorrendo então aumentos de pressão em seu interior devido ao acúmulo de biogás resultando em deslocamento do efluente da câmara de fermentação para a caixa de saída em sentido contrário quando ocorre descompressão (FRIGO, 2015, p.60, apud JORGE & OMENA, 2012). Por este modelo ser

constituído quase todo de alvenaria é dispensado o uso de gasômetro em chapa de aço, reduzindo assim os custos. Porém com este tipo de construção pode ocorrer problemas como o vazamento de biogás, caso não seja realizada uma vedação e impermeabilização boa (FRIGO, 2015, p.60, apud ANDRADE et al., 2012).

2.4.3. Modelo Canadense (Marinha)

O modelo canadense se diferencia pelo fato de ser do tipo horizontal, apresentando uma caixa de carga feita em alvenaria e com largura maior que a profundidade, possuindo, então, uma maior área de exposição ao sol, possibilitando em uma grande produção de biogás e também evitando o entupimento (FRIGO, 2015, p.62, apud CASTANHO & HARRUDA, 2008).

Possui uma câmara de fermentação subterrânea que é revestida com lona plástica, manta superior para reter o biogás produzido de modo a formar uma campânula de armazenamento, e por fim de uma caixa de saída onde o efluente é liberado (FRIGO, 2015, p.62, apud PEREIRA et al., 2009).

Ainda segundo Frigo (2015), o local da instalação do biodigestor deve proporcionar o menor risco de ocorrer furos na manta superior que venham a causar vazamento de gás. Pois durante o processo de produção de gás, a cúpula do biodigestor infla, para que possa ser retirada quando necessário. Esta cúpula, em PVC, é responsável pelo aumento do custo final do biodigestor (FRIGO, 2015, p.62, apud CASTANHO & HARRUDA, 2008).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Fatores relacionados à operação do biodigestor

O processo de digestão orgânica deve ser previamente controlado e analisado, seguindo alguns parâmetros estabelecidos para um processo eficiente com mínimas interferências. O controle feito no *startup* do processo evita subseqüentes empecilhos.

É adequado que o reator seja abastecido com a maior quantidade possível de insumos orgânicos que já estejam submetidos às fases de decomposição anaeróbicas (metanogênese). Após o início do processo, deve-se evitar condições que desestabilizem e sobrecarreguem organicamente o ambiente anaeróbio proporcionado pelo digestor, como: excesso de gases tóxicos, vazamentos e surgimento de algas.

Segundo Araújo (2017, p.17), monitorar as variáveis de controle é o método mais indicado para essas prevenções, sendo elas: a aferição da vazão, concentração de matéria

orgânica, compostos tóxicos, temperatura, pH, ácidos voláteis, alcalinidade, nitrogênio total, volume, composição dos gases resultantes, inibição da presença de luz e vazamentos. Garantindo assim, a produção efetiva do biogás e fertilizantes ricos em nutrientes.

A formação de ácidos decorrentes do processo de biodigestão é um dos maiores empecilhos para a manutenção de um biodigestor, pois conforme a estrutura do biogás é perceptível a geração de compostos sulfídricos decorrentes do enxofre encontrado nos resíduos. Para evitar esse processo é indicado a utilização de um tamponamento com um sal triprótico que dificulta a formação dos compostos nocivos ao sistema, além de auxiliar na manutenção do pH da mistura. Outra opção para a precaução e manutenção é a adoção de um filtro de carvão mineral na corrente de saída do biogás a fim de reter os compostos sulfídricos e nitrogenados.

3.1.1. Inóculo

Como em todos os processos, quanto menor o tempo de retorno melhor se consolida o procedimento. No caso dos biodigestores é necessário um período para a produção de biogás, que pode ser determinante em sistemas onde o gás é fator primordial, como a produção de energia, onde a alimentação do motor gerador é fundamental para a transformação.

Alguns procedimentos e estudos são realizados a fim de melhorar esse tempo de retenção natural da reação, um desses, consiste na inclusão do inóculo, resíduo do material que passou por um processo anterior de fermentação anaeróbia, capaz de fornecer um sítio de microrganismos típicos, diminuindo a curva de tempo para a obtenção do biogás.

Vale ressaltar que o sistema anaeróbio não é verificado imediatamente após a inserção do material no reator. É necessário um tempo de detenção, para que haja um crescimento dos microrganismos presentes e conseqüente equilíbrio do sistema. O uso de inóculo pode ser importante tanto nos estudos sobre fermentação anaeróbica quanto no ponto de partida de reatores (ARAÚJO, 2017, p.18, *apud* Souto, 2005).

Para processos contínuos o inóculo também se mostra eficiente, porém, à inserção pode ser realizada apenas no primeiro resíduo, potencializando o início da reação e estabilizando os demais resíduos a ser alimentado no reator, a utilização posterior não se mostra obrigatória, uma vez que a colônia de bactérias já está formada.

Considerando que no início do processo de degradação a quantidade de ácidos e hidrogênio é maior em função da taxa de geração das bactérias formadoras de ácido, a adição de uma quantidade suficiente de organismos metanogênicos pode prevenir o desequilíbrio.

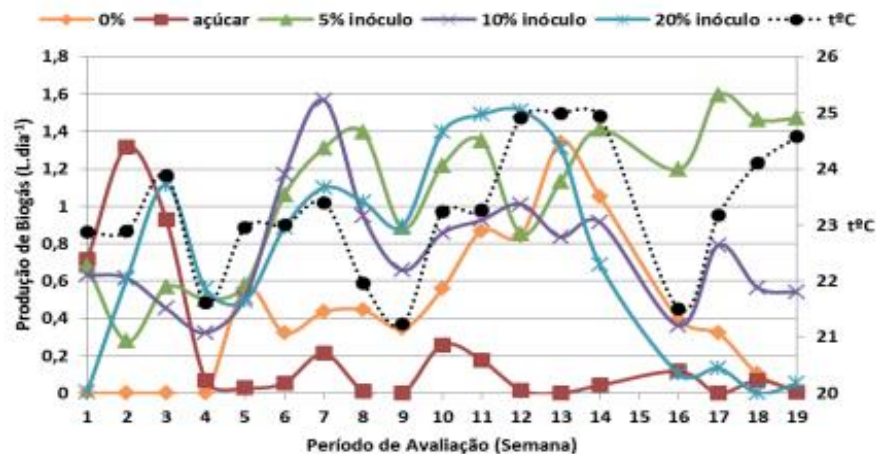
Normalmente são usados como inóculos lodo de esgoto digerido, lodo de UASB, estrume, resíduo digerido e lixiviado (ARAÚJO, 2017, p.18, *apud* Pinto, 2000).

O estudo de Oliveira *et al.* (2012, p.15) que abordou a análise de eficiência empírica das diferentes concentrações de inóculo, em reator de batelada alimentado com água residuária de suinocultura, obteve interessantes conclusões:

- O açúcar não é indicado como ativador de reação metanofílica, pois perde a eficiência ao longo do tempo e aumenta a quantidade de sólidos.
- O inóculo com 5% é tão eficiente quanto às demais composições: 10 e 20%. Por isso é desnecessário composições maiores que 5% evitando gastos e disponibilizando maior volume para subseqüentes alimentações.

A adição de efluente estabilizado de biodigestor alimentado com dejetos de bovinos (inóculo) na concentração de 5% (v/v) pode ser recomendada para a partida de biodigestor de batelada no tratamento de águas residuárias de suinocultura. A adição de açúcar cristal, na concentração de 5%, não deve ser utilizada para partida de biodigestores[...] (OLIVEIRA *et al.*, 2012, p.18-19). Na Figura 1 temos a taxa média de produção de biogás em biodigestor de batelada alimentado com água de suinocultura, com diferentes concentrações de inóculo.

Figura 1: Taxa média de produção de biogás. Valores médios quinzenais de dois reatores.



Fonte: OLIVEIRA, *et al.*, 2012, p.14.

Há também como realizar o cálculo específico da concentração ideal do inóculo, para cada tipo de resíduo adicionado no biodigestor, dependendo da sua atividade metanogênica e da taxa de produção do substrato. Para realizar o cálculo é utilizada a equação 1:

$$Fi = \frac{STi}{STi+STr} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

Fi= Fator inóculo; STi= Sólidos totais do inóculo; STr= Sólidos totais do resíduo

Tabela 1: Dados de alguns estudos sobre digestão anaeróbia de resíduos sólidos

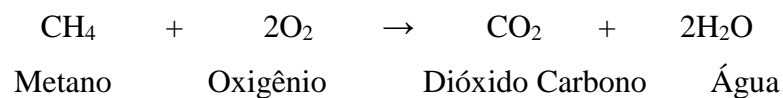
Referência	Resíduo	Inóculo	ST (%)	Temperatura (°C)	Td (dias)	Eficiência (%)
Del Borghi et al. (1999)	Resíduos de cozinha triturado	Lodo primário e secundário	1-4	55	12	56-63 (STV)
Pavan et al. (1999a)	Frutas e verduras	-	8	35,56	11-12	67-84 (STV)
Xu et al. (2002)	Alimentos	Lodo de digestor e reator UASB	10	35	16	60 (SVT)
Wang et al. (2003)	Alimentos	Lodo de digestor e reator UASB	10	35	36	78 (SVT)
Bouallagui et al. (2004)	Frutas e verduras	Lodo de digestor	4,6 e 10	20, 35, 55	20	54-87 (SVT)
Mtz. Viturtua et al. (1995)	Frutas e verduras	Esterco bovino e suíno	6	35	4,5-18	27-72 (STV)

Fonte: ARAÚJO, 2017, p. 19, *apud* BARCELOS, 2009.

3.2. Transformação de gás em energia

A geração de energia ocorre de diversas formas, sendo pelo processo de transformação de uma fonte energética em outra mais eficiente, ou a que melhor se adéqua ao processo, como por exemplo: transformar a energia calorífica em energia elétrica, ou a energia cinética em eletricidade; desde que ocorra a agitação molecular há a possibilidade de transformação energética, permanecendo equivalente ao processo.

No biogás transformação da matriz gasosa em poder calorífico ocorre mediante ao procedimento de combustão, com a seguinte estequiometria:



Mediante a essas informações é dedutível que um volume de metano exige dois volumes de oxigênio para produzir um volume de dióxido de carbono e dois de água na transição de vapor, assumindo, por exemplo, que há 60% de metano no biogás gerado do reator em estudo e 21% de oxigênio no ar, logo, 1 volume de biogás necessita de 5,71 de ar. Em condições onde os ambientes contém excesso de ar e ausência de biogás a mistura é chamada pobre, já o oposto, quando há o excesso de biogás é chamada rica.

Para quantificar se uma mistura é rica ou pobre define-se o fator lambda (λ) que é a razão entre o ar combustível real (A/C real) e a mistura ar combustível estequiométrica (A/C estequiométrica). Dessa forma é obtida a equação 02:

$$\lambda = \frac{A/C_{\text{real}}}{A/C_{\text{estequiométrica}}} \quad (\text{Equação 2})$$

Obtendo por definição:

$\lambda = 1 \rightarrow$ mistura ideal, $\lambda > 1 \rightarrow$ excesso de biogás, $\lambda < 1 \rightarrow$ ausência de biogás

Nos geradores de eletricidade por combustão há a chamada sonda lambda, que tem por função fazer com que a mistura permaneça próximo ou igual à faixa estequiométrica, aumentando a eficiência do processo e do gerador por evitar o consumo de combustível (mistura rica) ou a perda de potência no motor (mistura pobre).

A porcentagem mínima e máxima de um combustível numa mistura ar e combustível, para que essa mistura entre em combustão, é chamada de limite de inflamabilidade. A velocidade da chama é a velocidade de uma frente de chama da mistura ar e combustível, efetuada sob determinadas condições. É uma propriedade importante no dimensionamento e modificação de queimadores, pois ajuda a estabelecer a estabilidade da combustão. Também é utilizada na determinação do avanço de ignição nos motores de combustão interna (SOUZA, 2016, p.8, *apud* BIOGASBURNER, 2011).

3.3. Poder calorífico inferior (PCI)

O PCI tem a função de determinar o potencial teórico de energia contido nos combustíveis, quanto maior a razão de metano sobre o biogás mais energia por unidade de massa será obtido, em resumo maior poder calorífico inferior do biogás, além de interferir na capacidade energética a proporção de metano no biogás, influencia na densidade e peso específico da mistura. Conforme demonstrando na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Peso específico e poder calorífico inferior do biogás em função da composição química

Composição química do biogás	Peso específico (kg/m ³)	PCI (Kcal/Kg)
10% CH ₄ e 90% CO ₂	1,8393	465,43
40% CH ₄ e 60% CO ₂	1,4600	2333,85
60% CH ₄ e 40% CO ₂	1,2143	4229,98

65% CH ₄ e 35% CO ₂	1,1518	4831,14
75% CH ₄ e 25% CO ₂	1,0268	6253,01
95% CH ₄ e 05% CO ₂	0,7768	10469,60
99% CH ₄ e 01% CO ₂	0,7268	11661,02

Fonte: SOUZA, 2016, p.7, *apud* IANNICELLI, 2008.

Tabela 3: Comparativo entre 1m³ de Biogás com as demais fontes energéticas de combustão

Combustível	Quantidade Equivalente
Gasolina	0,61 a 0,70 Litros
Álcool	0,80 Litros
Óleo Diesel	0,55 Litros
GLP	0,40 kg
Lenha	1,60 a 3,50 kg
Eletricidade	1,25 a 1,43 kWh

Fonte: Fundação Ecológica Natural (FEN) 2013.

3.4. Projeto e equações para o Biodigestor

3.4.1. Alimentação

Para a construção e determinação de parâmetros de um biodigestor o primeiro passo é a análise para a determinação da quantidade e qualidade de resíduos que serão introduzidos como fonte de alimentação no reator biológico, resíduos com maior composição orgânica tem melhor eficiência no processo de decomposição e geração de gás metano no interior do reator, com isso a alimentação será nomeada como: $A_{\text{resíduos}}$.

$$A_{\text{resíduos}} = \frac{\text{Quantidade de resíduos (anuais)}}{365 \text{ (dias)}}$$

3.4.2. Dimensionamento

Mediante as modelagens equacionais de Araújo (2017, p.20, *apud* Pinto, 2000) para a projeção do biodigestor são necessários os seguintes parâmetros: Inoculante (Si); Tamponamento e Teor de Umidade. Assim os métodos de cálculo para os seguintes parâmetros são:

a. Inóculo:

Utilizar-se a equação 01 para determinar a massa de inóculo a ser utilizada.

b. Tamponamento:

A quantidade de CaCO₃ utilizada foi calculada através da equação 02:

$$\text{Tamponamento} = 0,06 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right) * STi$$

No qual o valor de 0,06 = fator que relaciona o tamponamento com o inoculante.

c. H₂O:

Para ser determinada a quantidade de água na mistura é definida pela equação 03:

$$H_2O = 0,58 \left(\frac{L}{Kg} \right) * STi$$

No qual o valor de 0,58 = fator que relaciona o percentual de H₂O com o teor de umidade encontrado na matéria orgânica.

d. Peso total da mistura diária:

Para ser determinado peso total da mistura é definida pela equação 04:

$$PTMd = STs (Kg) + STi (Kg) + \text{Tamponamento} + H_2O (l)$$

e. Volume da mistura:

Para ser determinado o volume da mistura é definida pela equação 05:

$$Vd = PTMd / \rho_a$$

Onde: Vd = Volume do biodigestor; PTMd = Massa total da mistura diária; ρ_a : densidade da água.

f. Volume total do Biodigestor:

Para ser determinado o volume total do biodigestor é definido pela equação 06:

$$\text{Volume do Tanque} = (Vd * TDH) * (1 + f)$$

Onde:

Vd= Volume do biodigestor.

TDH= Tempo de detenção hidráulica (dias).

f= fator do volume que o gás da mistura ocupa mediante ao processo de digestão.

3.5. Controle de Temperatura e Condições iniciais de estudo

O controle de temperatura é fundamental no processo, dificultar a troca térmica do digestor com a vizinhança, é indispensável para direcionar as bactérias e o sistema para a produção do biogás, uma vez que quando não há um isolante térmico eficiente as bactérias utilizam parte da energia delas para alcançarem a temperatura ideal, somente após essa etapa elas podem iniciar o processo de digestão

Para o estudo da viabilização, o processo de geração elétrica por biodigestor será direcionado a uma indústria que gera resíduos alimentícios, de acordo com os dados fornecidos

pelo site da PREFEITURA DE JUNDIAÍ (2018, *on-line*), contemplando as 100 maiores empresas da cidade, esse setor está entre as maiores indústrias do perfil regional, há diversas indústrias do segmento alimentício que geram resíduos que são descartados como lixo.

O inóculo utilizado será o lodo de digestor anaeróbio (UASB) presente nas estações de tratamento de esgoto da região, devido ao fato de serem ótimos sítios de bactérias já disponíveis no estado de metanogênese, o que acelera o processo diminuindo os custos operacionais, uma vez que, as Estações de Tratamento de Esgoto (E.T.E.) fornecem de forma gratuita o lodo, além disso, para fins de cálculos será considerada uma demanda energética de 100000 kW por ano ou aproximadamente 274 kW por dia.

De acordo com ARAÚJO (2017, p. 19, *apud* BARCELOS, 2009) Tabela 1, a eficiência da relação resíduo-inóculo apresentada varia de 60% a 78% de sólidos totais voláteis, ou seja, biogás. Será admitida a composição mínima para evitar erros no processo, sendo assim é considerada a geração de 60% de biogás por resíduo.

Baseado no estudo realizado por LINS, L.P.; MITO, J.Y.L.; FERNANDES, D. M. (2015, p.3), o biogás tem uma composição média de 60% de metano e 40% de gás carbônico com alguns traços de gás sulfídrico, considerando um resíduo com maior proporção em compostos orgânicos.

Indicam que o biogás apresenta uma faixa de 50-70% de metano, 25-45% de gás carbônico e outros gases como nitrogênio e ácido sulfúrico (H_2S), podemos afirmar que os valores obtidos e apresentados estão dentro de um espaço aceitável para seu uso.” (LINS, L.P.; MITO, J.Y.L.; FERNANDES, D. M., 2015, p.3).

3.5.1. Biodigestor

O biodigestor escolhido para o estudo da viabilização é o Marinha, o protótipo foi desenvolvido pela Marinha do Brasil, possui paredes de alvenaria revestidas por lona e uma cúpula de lona preta, ambos impermeáveis. Por ser um modelo rasteiro e longo, a grande produção de gás por massa fermentada é garantida, porém necessita de uma longa área superficial para o armazenamento de uma grande quantidade de resíduo.

Devido ao fato de ser um modelo versátil no uso de diferentes resíduos orgânicos, grande armazenamento e produção de biogás, ainda passível de dejetos serem utilizados como biofertilizantes é o protótipo mais indicado para projetos industriais e de agronegócios.

Conforme OLIVEIRA (2009, p.33-34), recentemente, vem sendo aplicado devido ao uso da manta impermeável que passou a ser confeccionada em Policloreto de vinila (PVC), o que resulta em um menor custo, praticidade na instalação, resistência a corrosão provocada pela água e pelo enxofre, por possuir um reservatório sem paredes divisórias, depois da edificação do reservatório em alvenaria, o mesmo é impermeabilizado utilizando-se uma manta de vinil preta de espessura de 0,8mm, sendo o depósito do biogás também coberto por uma manta de vinil preta de espessura de 1,0mm. É recomendado que a construção seja abaixo do nível do solo para evitar bruscas variações de temperatura, além de aproveitar o calor da terra e o calor gerado pela manta preta exposta aos raios solares, o que acaba garantindo uma melhor temperatura, assim uma maior produção de biogás com maior concentração de metano.

O investimento para a construção de um reator canadense (marinha) varia de acordo com os preços e tributações do local de aquisição, mas independentemente dessa condição, o modelo marinha é o de menor custo, conforme encontrado na Tabela 4.

Tabela 4: Custo de construção e de implantação de biodigestores modelos Indiano, Chinês e Canadense para diferentes capacidades

Capacidade do Biodigestor (m ³)	Custo total por modelo de biodigestor (R\$)		
	Indiano	Chinês	Canadense
20	5.065,70	4.052,50	2.104,00
40	7.099,30	5.679,40	3.162,00
60	9.440,20	7.552,10	4.188,00
80	11.470,90	9.176,70	5.214,00
100	12.486,30	10.801,40	6.240,00
120	14.178,60	12.426,00	7.266,00

Fonte: Revista engenharia agrícola, 2015¹.

3.5.2. Geração de energia por gerador do ciclo Otto

De acordo com as opções e funções dos geradores de energia elétrica, o que melhor se adapta ao processo de transformação do biogás é o gerador com motor ciclo Otto, segundo o manual básico de biogás (KARLSSON, et al., 2014, p. 14):

Geralmente, as plantas de biogás visam à produção de eletricidade e calor a partir de um motor tipo Otto ou similar. Ao operar um motor de combustão interna, cerca de 30% do biogás são convertidos em eletricidade e os restantes 70% representam o calor.

¹ Disponível em: < <https://www.scielo.br/pdf/eagri/v35n6/1809-4430-eagri-35-6-0990.pdf>>. Acesso em: 18 mar. 2020.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Cálculos da quantidade de resíduos necessários para a demanda energética

De acordo com a Tabela 3, 1 m³ de biogás com composição de 60% CH₄ e 40% CO₂ equivale de 1,25 a 1,43 kWh, visando a otimização de resultados será adotado o valor mínimo de capacidade elétrica sendo 1,25 kWh.

Como o motor de ciclo Otto tem a eficiência de 30% para a geração de eletricidade será admitida a seguinte equação:

$$Ern = \frac{DE}{(GE * ef)}$$

Sendo: Ern: Energia real necessária; DE: Demanda Energética; Ge: Geração de eletricidade; ef: eficiência.

Para a demanda em estudo de 100000 kW por ano, é obtido:

$$Ern = \frac{1000000}{(1,25*0,3)} \Rightarrow Ern = 266666,7 \text{ kW}$$

Considerando a relação de correspondência do biogás de 1m³ = 1,25 kW, então 266666,7 kW são equivalentes a 213333,4 m³ de biogás.

A Tabela 2 demonstra o peso específico do biogás em relação a sua composição, como foi admitida uma composição de 60% de metano e 40% de dióxido de carbono, o valor correspondente é de 1,2143 kg/m³, obtendo assim uma relação de volume e massa:

$$Mb = Vb * p$$

Sendo:

Mb: Massa do biogás; Vb: Volume de biogás; p: Peso específico

O volume de biogás é obtido pela equação acima:

$$Mb = 213333,4 \text{ m}^3 * \frac{1,2143 \text{ kg}}{\text{m}^3} \Rightarrow Mb = 259050,7 \text{ kg}$$

De acordo com a tabela 1, a quantidade de biogás representa 60% dos sólidos voláteis totais, os sólidos totais ou a massa total dos resíduos será de:

$$Aresíduos = \frac{Mb * 1}{0,6}$$

Sendo:

Aresíduos: Quantidade anual de resíduos; Mb: Massa do biogás

A massa total de resíduos necessária para atender a demanda e produção do volume de biogás é:

$$\text{Aresíduos} = \frac{259050,7 \text{ kg} \cdot 1}{0,6} \Rightarrow \text{Aresíduos} = 431751,2 \text{ kg}$$

A periodicidade em que o reator será alimentado varia de acordo com cada indústria e a sua geração de resíduo, porém para o estudo será considerado uma alimentação diária sendo assim:

$$\text{Alimentação diária} = \frac{431751,2 \text{ kg(Anual)}}{365(\text{Dias})} \Rightarrow \text{Alimentação diária} = 1182,88 \text{ kg}$$

4.2. Calculo do Volume do biodigestor

a. Inóculo

Utilizando a equação 1 a fim de determinar a massa de inoculo utilizada:

$$0,05 = \frac{ST_i}{ST_i + 1182,88 \text{ kg}} \Rightarrow ST_i = 62,25684 \text{ kg}$$

O valor de 5% foi utilizado como fator de inóculo devido à comprovação de eficiência já apresentada sobre o estudo de OLIVEIRA, *et al* (2012, p.6).

b. Tamponamento:

Utilizando a equação 2 a fim de determinar a quantidade de CaCO_3 a ser utilizada:

$$\text{Tamponamento} = 0,06 \left(\frac{\text{kg}}{\text{kg}} \right) * 62,25684 \text{ kg} \Rightarrow \text{Tamponamento} = 3,73541 \text{ kg}$$

c. H_2O :

Utilizando a equação 3 a fim de determinar a quantidade de água na mistura:

$$\text{H}_2\text{O} = 0,58 \left(\frac{\text{L}}{\text{Kg}} \right) * 62,25684 \text{ kg} \Rightarrow \text{H}_2\text{O} = 36,10897 \text{ L ou } 36,10897 \text{ Kg}$$

d. Peso total da mistura diária:

$$\text{PTMd} = 1182,88 \text{ kg} + 62,25694 \text{ kg} + 3,73541 \text{ kg} + 36,10897 \text{ kg} \Rightarrow \text{PTMd} = 1284,981 \text{ kg}$$

e. Volume da mistura:

$$V_d = \frac{2007,783 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} \Rightarrow V_d = 1,285 \text{ m}^3$$

f. Volume total do Biodigestor:

O resíduo alimentício segundo a tabela 1 tem o tempo de detenção hídrica de 16 dias, e o fator do volume que o gás ocupa será de 0,3.

$$\text{Volume do Tanque} = (1,285 \text{ m}^3 * 16) * (1 + 0,3) \Rightarrow \text{Volume do Tanque} = 26,728 \text{ m}^3$$

4.3. Acessórios incorporados ao sistema de geração de energia por biogás

A decomposição dos resíduos tende a gerar compostos sulfídricos, o que pode ocasionar a corrosão dos canos e sistemas de comunicação do projeto. Para prevenir esse problema existe o método de tamponamento da mistura dentro do digester, dificultando a geração dos compostos corrosivos. Após essa análise é possível observar que o tamponamento eficiente como descrito na etapa de projeto e equação para o biodigestor é necessário para um excelente funcionamento aumentando da vida útil do sistema. Segundo (KARLSSON, et al., 2014, p. 28), se alguma condição demonstra um crescimento nos compostos corrosivos ou odor, o filtro deve ser adicionado junto ao sistema do biogás, essa condição não elimina a necessidade do tamponamento.

4.4. Custos do projeto

Para a aquisição do biodigestor será considerado o preço fornecido pela Tabela 4. Conforme os cálculos apresentados no item 4.2 o volume do tanque é de $26,728\text{m}^3$, esse volume está entre 20 a 40m^3 , dessa maneira será utilizado o biorreator com a capacidade de 40m^3 que possui o custo de R\$ 3.162,00, o valor fornecido é referente ao ano de 2015 para a atualização monetária será admitido à inflação dos anos subseqüente até o presente ano.

Tabela 5: IPCA acumulado de cada ano

Ano	Taxa IPCA (%)
2016	6,29
2017	2,95
2018	3,75
2019	4,31
Total	17,3

Fonte: IBGE 2020.

O valor base do biodigestor acrescido o IPCA acumulado dos anos resulta em um montante final de R\$ 3.709,03, este será o valor considerado para viabilização.

De acordo com site NGSolar o preço por kWh na CPFL Paulista a tarifa comercial é de R\$0,80, assim o mesmo será admitido para o cálculo. Dentre os motores geradores de ciclo Otto, o com melhor eficiência para o processo é o gerador a gás natural adaptado para biogás, porém com a difusão da técnica existem empresas que produzem geradores específicos, como a CHP Brasil que projeta e desenvolve todo sistema elétrico voltado ao aproveitamento de resíduo, com as condições e parâmetros fornecidos pelo presente trabalho foi orçado o gerador CHP60 com geração de 35kW/h e 36% de eficiência com o valor de R\$18000,00, R\$3000,00

de manutenção mensal e 3115,86 de equipamentos para o processo, como: tubulações, válvulas e medidores.

Para exemplificar os custos do processo em comparativo com a tarifa padrão cobrado pela CPFL segue Tabela 6 de viabilização:

Tabela 6: Custos para a aquisição do processo de geração elétrica por biogás.

Processo biogerador	Quantidade Utilizada	Custos unitários	Vida útil	Custo total
Biodigestor	1 unidade	R\$ 3.709,03	10 anos	R\$ 3.709,03
Gerador	1 unidade	R\$ 18.000,00	10 anos	R\$ 18.000,00
Calcita	1363,42 kg	R\$ 0,22	1 ano	R\$ 299,95
Manutenção do Gerador	12 vezes	R\$ 3.000,00	1 ano	R\$ 36.000,00
Equipamentos da Operação	1 vez	R\$ 3115,86	10 anos	R\$ 3115,86
Análises	2 vezes	R\$ 2.000,00	1 ano	R\$ 4.000,00
			Total	R\$ 65.124,84

Fonte: Dos autores

Tabela 7: Comparativo entre os processos energéticos

Valores para 20000 kw/2 anos			
Período (biênio)	Biogerador	CPFL	(CPFL)- (Biogerador)
1º	R\$ 130.249,68	R\$ 160.000,00	R\$ 29.750,32
2º	R\$ 80.599,90	R\$ 160.000,00	R\$ 79.400,10
3º	R\$ 80.599,90	R\$ 160.000,00	R\$ 79.400,10
4º	R\$ 80.599,90	R\$ 160.000,00	R\$ 79.400,10
5º	R\$ 80.599,90	R\$ 160.000,00	R\$ 79.400,10
Total	R\$ 452.649,28	R\$ 800.000,00	R\$ 347.350,72

Fonte: Dos autores

O período de 10 anos foi utilizado por ser o tempo de vida útil dos equipamentos, a partir desta condição o valor de custo dos demais anos na coluna de biogerador é correspondente aos processos que ocorrem anualmente conforme especificado na Tabela 6. Analisando as tabelas, é notável o menor custo do processo de biogeração elétrica uma vez que no período de 10 anos a empresa que adotar esse processo mediante as condições especificadas, teria economizado R\$ 372.175,61, ou seja, com a aquisição de um biodigestor e gerador a biogás ocorre uma economia média de 47 % em relação à conta de energia tradicional.

5. CONCLUSÃO

Mediante as análises de tabelas, gráficos e contextualização discorrida, é possível identificar o potencial econômico da aquisição de um sistema de geração elétrica a partir de um processo biodigestivo, entretanto existem empecilhos que são determinantes na decisão de sua instalação, sendo: grande volume de resíduos, segmento de resíduos orgânicos, área de construção extensa para o modelo do biodigestor marinha, investimento que retorna em médio prazo e geração de compostos corrosivos. Dentre os parâmetros abordados o com maior potencial de inviabilizar a construção do processo é a geração de compostos corrosivos, todavia conforme já citado existem métodos para dificultar e impedir essa geração.

Acerca do retorno em médio prazo do investimento há pontos que necessitam de reflexões e estudos de caso, sendo esses:

- A cotação da capacidade elétrica do biogás utilizada foi de 1,25 kWh conforme demonstrado na Tabela 3, mas ao consultá-la é possível observar que esse é o mínimo apresentado, parâmetro que pode chegar a 1,43 kWh, com uma geração elétrica maior todo o processo se beneficiaria, diminuindo consideravelmente os custos, devido ao fato da correlação entre a capacidade elétrica e: o volume do biodigestor, a corrente do gerador e a quantidade de insumos na alimentação, conforme apresentando nos itens 3.4; 4.1; e 4.2 deste presente artigo.
- A eficiência do gerador considerada foi de 30% para transformação da energia térmica em elétrica, baseado pelas pesquisas a respeito dos motores geradores, entretanto o motor gerador orçado para o estudo tem capacidade de transformação de 36%, uma maior eficiência proporciona maior geração elétrica ou a possibilidade de aquisição de um gerador com menor custo.

Visto os demais pontos, o estudo só reforça o potencial econômico e ambiental do biogás que se demonstra amplamente viável. Se considerado a comercialização do biofertilizante e a utilização da política de créditos de carbono como amortecimento do custo, o biogás contém todos os parâmetros para se tornar a matriz energética do futuro.

6. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.004: Resíduos sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ARAÚJO, Ana Paula C. A. **Produção de biogás a partir de resíduos orgânicos utilizando biodigestor anaeróbico**. 2017. Disponível em: <[https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20292/3/Produ%
c3%a7%c3%a3oBiog%c3%a1sRes%c3%adduos.pdf](https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20292/3/Produ%c3%a7%c3%a3oBiog%c3%a1sRes%c3%adduos.pdf)>. Acesso em: 12 mar. 2020.

CHP Brasil. Disponível em: <<https://chpbrasil.com.br/produtos/chp60>>. Acesso em: 20 out. 2020.

FILHO, J. A. C. **Biogás, independência energética do Pantanal Mato-grossense. 1981.** Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/787706/1/CT09.pdf>>. Acesso em: 19 mai. 2020.

FLECK, Eduardo. **Sistema integrado por filtro anaeróbio, filtro biológico de baixa taxa e banhado construído aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário.** 2003. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/handle/10183/4258>>. Acesso em: 21 fev. 2020.

FRIGO, Késia, D., A., *et al.* **Biodigestores: seus modelos e aplicações.** 2015. Disponível em: <<http://saber.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/viewFile/12528/8708>>. Acesso em: 05 out. 2020.

FUNDAÇÃO ECOLOGICA NACIONAL (FEN). **Biogás.** 2013. Disponível em: <<http://fen.org.br/wp-content/uploads/2013/05/Fontes-Alternativas-de-Energia.pdf>>. Acesso em: 07 mar. 2020.

IBGE. Inflação. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/inflacao.php>>. Acesso em: 07 mar. 2020.

KARLSSON, Tommy, *et al.* **Manual básico de biogás.** 2014. Disponível em: <https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2020.

LINS, L.P.; MITO, J.Y.L.; FERNANDES, D. M. **Composição média do biogás de diferentes tipos de biomassa.** 2015. Disponível em: <http://www.sbera.org.br/4sigera/files/4.28_JessicaYukiLimaMito.pdf>. Acesso em: 07 mar. 2020.

NGSolar. Disponível em: <<https://www.ngsolar.com.br/single-post/preco-kwh-cpfl#:~:text=J%C3%A1%20a%20tarifa%20para%20consumidores,80%20kWh%20para%20tarifa%20comercial>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

OLIVEIRA, Márcia Cristina R. O. *et al.*,. **Concentração de Inóculo e Produção de Biogás em Reator de Batelada Alimentado com Água Residuária de Suinocultura.** 2012. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/939024/1/bol48.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2020.

OLIVEIRA, Rafael Deléo. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono.** 2009. Disponível em: <http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce-26042010-091847/publico/Oliveira_Rafael_Deleo_e.pdf>. Acesso em: 06 out. 2020.

PREFEITURA DE JUNDIAÍ. **100 maiores empresas por valor adicionado.** 2018. Disponível em: <<https://jundiai.sp.gov.br/desenvolvimento-economico/maiores-empresas/>>. Acesso em: 07 mar. 2020.

SILVA, W. R. **Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais.** 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/tede/7187?locale=pt_BR>. Acesso em: 10 mai. 2020.

SOUZA, Samuel Nelson M. de S. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural.** 2016. Disponível em: <http://portalpos.unioeste.br/media/File/vanderleia.schmidt/Manual_Geracao_Energia_Eletrica_Biogas.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2020.