



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E  
SUSTENTABILIDADE**

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE  
RESÍDUOS DE TILÁPIA NA REGIÃO DE FOZ DO IGUAÇU - PR**

**DENIS PORFIRIO VIVEROS RODAS**

Foz do Iguaçu-PR  
2022



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE  
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E  
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
INTERDISCIPLINAR EM ENERGIA E  
SUSTENTABILIDADE**

## **ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DE TILÁPIA NA REGIÃO DE FOZ DO IGUAÇU - PR**

**DENIS PORFIRIO VIVEROS RODAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia E Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dra. Andréia Cristina Furtado

Co-Orientadora: Prof.<sup>a</sup>. Dra. Janine Padilha Botton

Foz do Iguaçu - PR  
2022

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação  
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

R685a

Rodas, Denis Porfírio Viveros.

Análise do potencial de produção de biogás a partir de resíduos de tilápia na região de Foz do Iguaçu - PR /  
Denis Porfírio Viveros Rodas. - Foz do Iguaçu, 2022.  
57 fls.: il.

Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Instituto Latino-Americano de Tecnologia,  
Infraestrutura e Território (ILATIT), Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade.  
Orientador: Andreia Cristina Furtado.

1. Digestão anaeróbia. 2. Biogás. 3. Biocombustíveis. 4. Aquicultura - Eliminação de resíduos. I. Furtado,  
Andreia Cristina. II. Título.

CDU 620.952

DENIS PORFIRIO VIVEROS RODAS

**ANÁLISE DO POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE  
RESÍDUOS DE TILÁPIA NA REGIÃO DE FOZ DO IGUAÇU - PR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interdisciplinar em Energia E Sustentabilidade da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Energia e Sustentabilidade.

**BANCA EXAMINADORA**



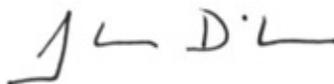
---

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Andréia Cristina Furtado  
(UNILA)



---

Co-Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dra. Janine Padilha Botton  
(UNILA)



---

Prof. Dr. Jonathan Dieter  
(UFPR)



---

Dr. Ricardo Müller  
(CIBiogás)

Foz do Iguaçu, 2022.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Porfirio e Elsa pelo apoio incondicional, incentivo e educação.

À minha companheira Gabriela Fernandes pela ajuda e apoio para a realização do trabalho.

Às minhas orientadoras Andréia por acreditar no trabalho, pelo seu apoio constante e pelo norteamento do projeto, e Janine pelas sugestões para o trabalho e correções importantes.

À empresa Alquimia Pescados e sua equipe pela disponibilização das amostras de tilápia do trabalho.

À empresa CIBiogás, e sua equipe, Franciele Natividade Luiz e Juliana Gao Somer pela participação no projeto.

Ao colega graduando de Engenharia Química Marcos Konopka pela ajuda nos ensaios laboratoriais.

*A ciência é, portanto, uma perversão de si mesma, a  
menos que tenha como fim último,  
melhorar a humanidade.*  
**Nikola Tesla.**

## RESUMO

A contaminação dos corpos hídricos é um dos maiores problemas ambientais no Brasil e no mundo, e grande parte dessa contaminação tem origem da indústria alimentícia. No Paraná, maior produtor de peixes de cultivo do país, este problema está ligado também aos resíduos de abate da indústria do pescado. Nesse contexto e com o intuito de fomentar um destino correto a parte dos resíduos da aquicultura, este trabalho avalia o potencial de geração de biogás a partir de resíduos da aquicultura familiar na cidade de Foz do Iguaçu. Para isto foi realizada a caracterização da biomassa conformada por resíduos de abate de tilápia, e a determinação de seu potencial metanogênico. Foi realizada uma síntese de processos envolvidos, através do método de árvore de estados baseados em regras heurísticas para a determinação da estratégia mais adequada para concretizar a aplicação da geração de biogás na empresa de aquicultura familiar. Esta síntese de processos considera para sua formulação, o contexto da empresa para o estudo de caso, a literatura, o baixo custo e os resultados obtidos nos ensaios laboratoriais da biomassa. As amostras para biodigestão anaeróbia foram separadas em vísceras *in natura* (VIS) e carcaça (CAR) de tilápia, uma mistura de vísceras e carcaça (MIX), e uma fração de vísceras sem óleo (VSO) a fim de verificar o efeito dos lipídios no potencial de produção de biogás deste resíduo. Foram obtidos uma produção de metano de 864 e 683  $L_{NCH_4}.kg_{SV}^{-1}$  para as frações VIS e VSO respectivamente, e 605 e 553  $L_{NCH_4}.kg_{SV}^{-1}$  para as frações CAR e MIX respectivamente. Conclui-se a partir disto a viabilidade de geração de biogás a partir deste tipo de resíduos de tilápia, e verifica-se um maior rendimento da fração de vísceras desse pescado *in natura*, mesmo o óleo sendo um inibidor na fase inicial do processo de biodigestão, a produção acumulada de biogás é maior para tempos de retenção hidráulica maiores.

**Palavras-chave:** Digestão anaeróbia, Resíduos de aquicultura, Síntese de processos.

## ABSTRACT

The contamination of water bodies is one of the biggest environmental problems in Brazil and the world, and a large part of this contamination originates from the food industry. In Paraná, the largest producer of fish in the country, this problem is also linked to slaughter residues from the fish industry. In this context and with the aim of promoting a correct destination for part of aquaculture waste, this work evaluates the potential for generating biogas from family aquaculture waste in the city of Foz do Iguaçu. For this, the characterization of the biomass formed by tilapia slaughter residues was carried out, and the determination of its methanogenic potential. A synthesis of the processes involved was carried out, using the state tree method based on heuristic rules to determine the most appropriate strategy to implement the application of biogas generation in the family aquaculture company. This process synthesis considers, for its formulation, the context of the company for the case study, the literature, the low cost and the results obtained in the laboratory tests of biomass. Samples for anaerobic digestion were separated into *in natura* viscera (VIS) and carcass (CAR) of tilapia, a mixture of viscera and carcass (MIX), and a fraction of viscera without oil (VSO) in order to verify the effect of lipids on the biogas production potential of this waste. A methane production of 864 and 683  $\text{LNCH}_4.\text{kgSV}^{-1}$  were obtained for the VIS and VSO fractions respectively, and 605 and 553  $\text{LNCH}_4.\text{kgSV}^{-1}$  for the CAR and MIX fractions respectively. It is concluded from this the possibility of generating biogas from this type of tilapia waste, and there is a higher yield of the viscera fraction of this fish *in natura*, even the oil being an inhibitor in the initial phase of the biodigestion process, the cumulative biogas production is higher for longer hydraulic retention times.

**Keywords:** Anaerobic digestion, Aquaculture waste, Process synthesis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Produção mundial de pescados .....	14
Figura 2: Maiores produtores de peixe de cultivo no Brasil .....	16
Figura 3: Sequências metabólicas envolvidas na digestão anaeróbia .....	21
Figura 4: Representação por árvore de estados .....	27
Figura 5: Tanques rede da empresa Alquimia Pescados.....	29
Figura 6: Fluxograma de produção da Tilápia e resíduos .....	30
Figura 7: Resíduos de Tilápia.....	31
Figura 8: Cocção das vísceras e óleo extraído via metodologia da empresa .....	32
Figura 9: Triturador Trapp TR200 .....	32
Figura 10: Sistema reator, eudiômetro e frasco de nível .....	34
Figura 11: Fluxograma embrião do processo de biodigestão anaeróbia .....	35
Figura 12: Árvore de estados geral .....	36
Figura 13: Subsistemas de classificação de resíduos.....	40
Figura 14: Subsistema de pré-tratamento .....	42
Figura 15: Subsistema de geração de biogás .....	44
Figura 16: Tratamento do biogás .....	46
Figura 17: Síntese final dos processos .....	46
Figura 18: Produção acumulada de biogás do inóculo.....	47
Figura 19: Produção acumulada de biogás da celulose microcristalina .....	48
Figura 20: Cinética de produção acumulada de biogás de acordo com o tipo de amostra .....	49
Figura 21: Produção de metano de acordo com o tipo de amostra.....	50
Figura 22: Fluxo de caixa do projeto .....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Maiores produtores de peixes de cultivo do Brasil.....	16
Tabela 2: Estabelecimentos de criação de Tilápia por estados .....	17
Tabela 3: Tamanho dos estabelecimentos de criação de peixe de cultivo e Tilápia .....	18
Tabela 4: Composição média dos efluentes de abatedouro de peixes.....	19
Tabela 5: Composição de gases presentes no biogás .....	23
Tabela 6: Equivalências energéticas por m <sup>3</sup> de biogás .....	23
Tabela 7: Tempo de retenção hidráulica para regiões distintas .....	25
Tabela 8: Parâmetros da caracterização dos substratos .....	33
Tabela 9: Parâmetros iniciais das amostras .....	34
Tabela 10: Resultados da caracterização das amostras .....	37
Tabela 11: Potencial de geração de biogás das amostras .....	48
Tabela 12: Produção de metano por massa in natura .....	51
Tabela 13: Comparação de resultados com outros trabalhos .....	51
Tabela 14: Dados e resultados da simulação .....	52

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2.OBJETIVOS</b> .....	<b>13</b>
2.1.OBJETIVO GERAL .....	<b>13</b>
2.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	<b>13</b>
<b>3.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>14</b>
3.1.PISCICULTURA NO MUNDO.....	<b>14</b>
3.2.PISCICULTURA NO BRASIL .....	<b>15</b>
3.3.RESÍDUOS DA AQUICULTURA.....	<b>18</b>
3.4.BIODIGESTÃO ANAERÓBIA .....	<b>20</b>
3.5.GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DA AQUICULTURA.....	<b>25</b>
3.6.SÍNTESE DE PROCESSOS .....	<b>27</b>
3.6.1. Representação por árvore de estados .....	<b>27</b>
3.6.2. Análise por método heurístico.....	<b>28</b>
3.6.3. Análise por método evolutivo .....	<b>28</b>
<b>4.METODOLOGIA</b> .....	<b>29</b>
4.1.CONTEXTUALIZAÇÃO .....	<b>29</b>
4.2.METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	<b>31</b>
4.2.1. Amostragem.....	<b>31</b>
4.2.2. Caracterização das amostras.....	<b>32</b>
4.2.3. Biodigestão anaeróbia.....	<b>33</b>
4.3.SÍNTESE DA ÁRVORE DE ESTADOS DO PROJETO .....	<b>35</b>
<b>5.RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>37</b>
5.1.RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS .....	<b>37</b>
5.2.RESULTADOS DA SÍNTESE DE PROCESSOS .....	<b>39</b>
5.2.1. Classificação dos resíduos de peixe .....	<b>39</b>
5.2.2. Pré tratamento .....	<b>40</b>
5.2.3. Especificação do biodigestor.....	<b>42</b>
5.2.4. Tratamento do biogás .....	<b>44</b>
5.3.DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL METANOGENICO .....	<b>46</b>
5.4.ANÁLISE FINANCEIRA.....	<b>52</b>
<b>6.CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>54</b>
<b>7.REFERÊNCIAS</b> .....	<b>55</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Os impactos e a poluição dos corpos hídricos são, em grande parte, causados por atividades antropogênicas, isto têm se tornado um dos maiores problemas socioambientais atuais no Brasil e no mundo, devido principalmente à gradativa diminuição da disponibilidade do recurso hídrico. Segundo a Agência Nacional das Águas (ANA), dos 2,5% de volume de água doce existentes no planeta, apenas 1% deste total está disponível através dos rios, o restante é considerado de difícil acesso pois encontra-se congelado nas geleiras ou armazenado em aquíferos subterrâneos (ANA).

Os recursos hídricos no Brasil são abundantes e estima-se que o país possui 12% do total de água doce disponível do planeta, no entanto, a grande exploração deste recurso é realizada através das usinas hidrelétricas e tem gerado preocupação por seu impacto socioambiental. Neste contexto, com a criação em 2003 do programa Cultivando Água Boa (CAB) da Itaipu Binacional, buscou-se fomentar a segurança hídrica da região oeste do Paraná, através da conservação dos recursos naturais e da biodiversidade, além da promoção da qualidade de vida das comunidades que habitam a área de influência da usina hidrelétrica de Itaipu (CAB).

A região oeste do Paraná é considerada o maior polo produtor de peixes do Brasil motivando o programa Cultivando Água Boa a reforçar a produtividade da bacia hidrográfica do rio Paraná. Nascia assim, em janeiro de 2003, o programa Produção de Peixe em Nossas Águas (PPNA), com a implantação de um modelo mais sustentável de aquicultura, como o sistema Biofloc Technology (BFT), uso de sistemas aquapônicos, e avaliação do potencial zootécnico (ITAIPU, 2018). A iniciativa abrange 850 pescadores e 130 famílias e promove o estabelecimento de cooperativas empresariais e da aquicultura familiar (CIPOLAT *et al.*, 2010).

Segundo o Anuário Brasileiro da Piscicultura (ABP), a produção de peixe no Brasil aumentou 4,9% em 2019, sendo a Tilápia (*Oreochromis niloticus*) a principal espécie em produção, representando 57% do total. O estado do Paraná coloca-se como o maior produtor de peixes do país, seguido por São Paulo (PEIXEBR, 2020).

Até o ano de 2018, na região do Oeste do Paraná, o PPNA treinou 350 pescadores/aquicultores. Paralelamente forneceu mais de 300 mil alevinos,

favorecendo a produção de 66 toneladas de pescado e aumentando o cultivo de Pacu em tanque rede em 500%. O reservatório de Itaipu passou a ter uma produção de 50 ton/ano (ITAIPU, 2018).

A grande capacidade produtiva deste setor acarreta também um grande potencial poluidor das bacias hidrográficas. No oeste do Paraná existem modelos de produção diversificados. Grande parte destes se caracteriza pelo desenvolvimento de atividades de grupos familiares que muitas vezes descartam os resíduos transferindo-os para lixões ou fossas sépticas e em consequência para os corpos hídricos.

No setor brasileiro o interesse principal recai na Tilápia, pela abundância desta espécie no mercado nacional, devido a sua adaptabilidade a diversos ambientes aquáticos, e as características nutritivas de sua carne (PEIXEBR, 2020). Ao ser abatido, os resíduos deste peixe são classificados como carcaças, pele, cabeça e vísceras e representam 65% do peso do peixe vivo. Estes resíduos podem ser aproveitados para a fabricação de ração, farinha, óleo etc., ou como alternativa, podem servir como fonte de energia através da produção de biogás.

Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a aplicação das tecnologias para geração de biogás a partir dos resíduos da aquicultura da tilápia, de modo a promover a redução do descarte inadequado destes resíduos no meio ambiente, possibilitando, a utilização do biogás como combustível renovável na cadeia produtiva da aquicultura familiar. O presente estudo faz-se em parceria com a empresa de aquicultura familiar Alquimia Pescados de Foz do Iguaçu, a qual disponibilizará resíduos de Tilápia que serão utilizados como substratos para biodigestão anaeróbia na geração de biogás.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de produção de biogás a partir de resíduos de tilápia, de modo a promover a redução do descarte inadequado destes resíduos.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar a biomassa utilizada como substrato, que consiste em resíduos de abate de Tilápia;
- Determinar o potencial metanogênico do substrato;
- Realizar a síntese de processos envolvidos e definir árvore de estados adequada para a aplicação do processo na empresa;
- Avaliar a influência dos lipídios contidos nos resíduos viscerais de tilápia na produção de biogás.

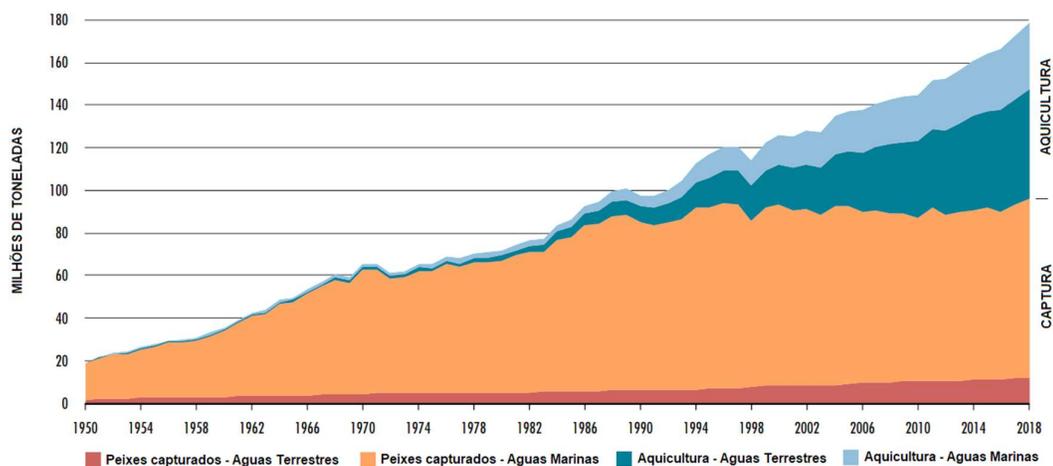
### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. PISCICULTURA NO MUNDO

O desenvolvimento científico dos últimos 50 anos ajudou a entender melhor os ecossistemas aquáticos de forma sustentável e ecologicamente correta. No ano de 1995, a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO) criou códigos de conduta para a pesca responsável. Estes incluem o desenvolvimento de instrumentos, políticas e programas para promover regimes transparentes da utilização do pescado, das transações envolvidas, e o cuidado do meio ambiente de maneira global. A FAO também é responsável por reunir dados globais sobre as estatísticas do setor pesqueiro, além de analisar os problemas e as medidas necessárias para alcançar o desenvolvimento sustentável desse setor (FAO, 2020).

Estima-se que em 2018 a produção total de pescados no mundo foi de 179 milhões de toneladas, com um custo estimado de USD 401 bilhões, dos quais 82 milhões de toneladas (46%) equivalem à aquicultura (Figura 1). Deste total, 156 milhões de toneladas (52%) são utilizadas para consumo humano, e os restantes 22 milhões são utilizados para a produção de ração e óleo de peixe. Entre os maiores produtores, encontra-se primeiramente a China com 35% do total da produção global, seguido pelas Américas com 14%, Europa com 10%, África com 7% e Oceania com 1% (FAO, 2020).

*Figura 1: Produção mundial de pescados*



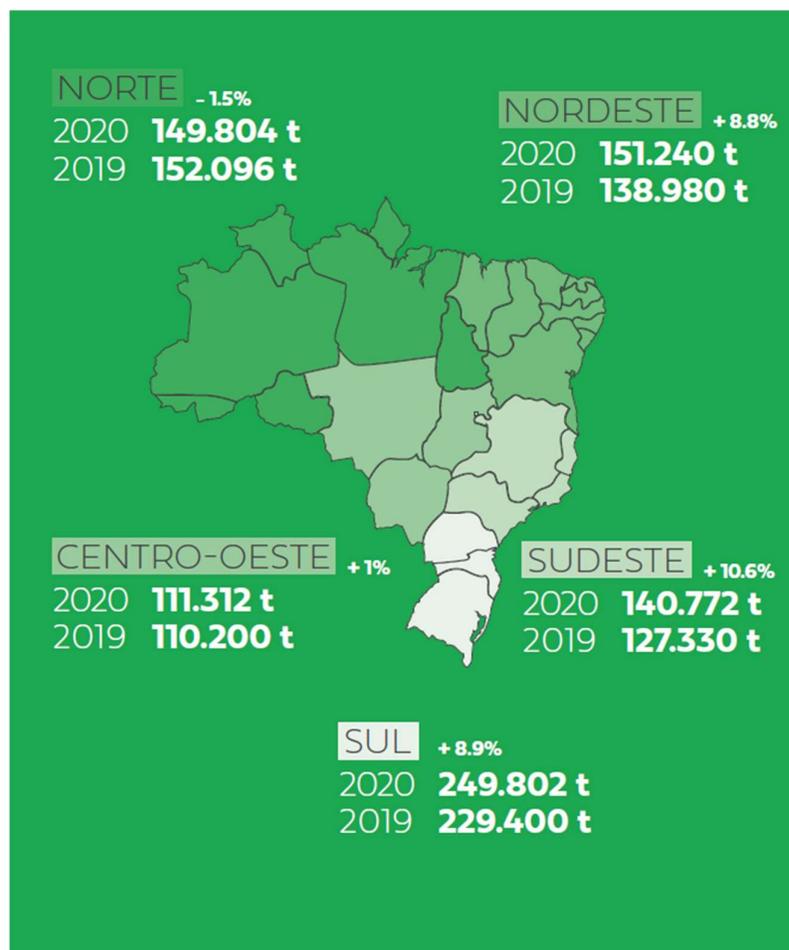
Fonte: (FAO, 2020)

Pela importância na alimentação do homem, o consumo de peixes aumentou a uma taxa de 3,1% ao ano desde 1961 até 2017, maior do que qualquer outro animal ou comida proteica. Dentre os peixes mais produzidos no planeta, encontra-se a tilápia com mais de 70 espécies de origem africana presentes atualmente nos cinco continentes do planeta, sendo o segundo peixe mais consumido no mundo. Registros indicam o cultivo em aquicultura da tilápia como um dos mais antigos, já sendo feito pelos egípcios há 4000 a.C., isto devido à facilidade de criação, alimentação onívora, resistência, adaptabilidade a diversos ambientes, e sabor da carne (CAMOLEZE, 2018).

### 3.2. PISCICULTURA NO BRASIL

No Brasil observa-se um grande crescimento na produção de tilápia, com um aumento de 12,5% em 2020, em relação ao ano de 2019. A produção bate o recorde de 486.155 ton em 2020, consolidando-se assim como o quarto produto de maior produção a nível mundial. O maior potencial de produção de tilápia pertence as regiões sul, sudeste e nordeste do país, enquanto nas regiões norte e centro-oeste predominam as espécies nativas da fauna aquática. Aproximadamente 31,1% do total da produção, pertence à região sul do Brasil, com um total de 249.802 ton, um aumento de 8,9% com respeito ao ano anterior, como apresentado na Figura 2.

Figura 2: Maiores produtores de peixe de cultivo no Brasil



Fonte: (PEIXESBR, 2021)

A nível nacional, o maior produtor da espécie é o estado do Paraná, com um total de 166 mil ton, ou 34% do total (PEIXESBR, 2021). Na Tabela 1 apresentam-se os 5 estados com maior produção de tilápia por cultivo no Brasil.

Tabela 1: Maiores produtores de peixes de cultivo do Brasil

Estado	Tilápia [ton]
Paraná	166.000
São Paulo	70.500
Minas Gerais	42.100
Santa Catarina	40.059
Mato Grosso do Sul	29.090

Fonte: Adaptado de (PEIXESBR, 2021)

A grande maioria dos estabelecimentos de produção, utilizam o método de viveiros escavados como mostra a Tabela 2, observando-se atualmente um crescimento na utilização de tanques flutuantes em reservatórios de barragens, como no caso da Itaipu Binacional, com grande potencial, porém com períodos de cessão demorados de 5 a 10 anos (PEIXE-BR, 2020).

*Tabela 2: Estabelecimentos de criação de Tilápia por estados*

<b>Locais de criação</b>	<b>PR</b>	<b>SC</b>	<b>SP</b>	<b>MG</b>
<b>Barragens/Lagos</b>	917	2.193	319	3.169
<b>Tanques-rede</b>	207	134	128	576
<b>Viveiros escavados</b>	29.978	38.926	2.884	13.941
<b>Mais de um local</b>	345	485	149	465
<b>TOTAL</b>	31.447	41.738	3.480	18.151

Fonte: Adaptado de (PEIXE-BR, 2020)

Boa parte da produção da aquicultura no Brasil é realizada em criadouros de pequenas propriedades, conforme dados apresentados na Tabela 3, o que reforça a importância da aquicultura familiar para a segurança alimentar do país (IBGE, 2019).

No Paraná, o programa Cultivando Água Boa (CAB) criado em 2003 com o objetivo de atender comunidades integrantes da Bacia do Paraná 3, já propôs 21 programas, 63 ações, e estabeleceu 2146 parceiros abrangendo 29 municípios com uma área total de 8 mil km<sup>2</sup> (CIPOLAT *et al.*, 2010) com o objetivo de preservação dos recursos naturais e da biodiversidade. O CAB propiciou também o surgimento do projeto Mais Peixes em nossas águas (MPNA), responsável pela promoção do fortalecimento da fauna aquática, a segurança alimentar da região e a aquicultura (PPNA, [s.d.]). O projeto tem como objetivo o desenvolvimento de cultivo de peixes nativos no reservatório de Itaipu, e posteriormente a produção de tilápia naturalmente

demandada pelos pescadores a partir de seu atrativo comercial. O MPNA envolveu no momento de sua criação 6 colônias e 4 associações de pescadores, com um total estimado de 859 profissionais e 153 famílias (CORONEL, 2007). O programa viabilizou a produção de tilápia no reservatório de Itaipu com 400.956 ton de peixe cultivado (PEIXE-BR, 2020).

*Tabela 3: Tamanho dos estabelecimentos de criação de peixe de cultivo e Tilápia*

<b>Locais de criação</b>	<b>PR</b>	<b>SC</b>	<b>SP</b>	<b>MG</b>
<b>Mais de 0 e até 5 ha (%)</b>	99,53	99,56	98,14	99,76
<b>Mais de 5 e até 50 ha (%)</b>	0,45	0,42	1,76	0,22
<b>Mais de 50 ha (%)</b>	0,02	0,02	0,10	0,02
<b>TOTAL (%)</b>	100	100	100	100
<b>TOTAL DE PRODUÇÃO (em ha)</b>	6.906	12.539	2.038	2.256
<b>Estabelecimentos rurais com Tilápia</b>	24.603	24.716	2.931	15.625

Fonte: Adaptado de (PEIXE-BR, 2020)

### 3.3. RESÍDUOS DA AQUICULTURA

O cultivo de peixes em tanque-rede e tanque escavado se destacam no oeste do Paraná. São contabilizados 17 frigoríficos industriais que trabalham exclusivamente com peixes, o que reforça a necessidade da implementação de tecnologias que ajudem a diminuir os resíduos gerados por este setor (VIDOTTI, 2016). Formas de utilização destes resíduos para que não sejam disponibilizados diretamente no meio ambiente, igualmente são necessárias.

Os resíduos são gerados em todas as etapas de produção do peixe, as quais consistem na reprodução, alevinagem, engorda, processamento e comercialização. Estes resíduos podem ser divididos em resíduos obtidos durante o processamento ou abate, e aqueles produzidos fora do processamento. O principal

atrativo da tilápia por exemplo é o filé, e o resíduo gerado é a carcaça composta por cabeça, vísceras, nadadeiras e escamas (FONSECA, 2018), representando aproximadamente 62,5 a 66,5% do peso do peixe vivo (BOSCOLO; FEIDEN, 2007). Os resíduos fora do processamento compreendem lixo comum, esgotos e lodos do sistema de tratamento de água, entre outros (VIDOTTI, 2016). Estima-se uma quantidade de resíduos gerados de mais de 290.000 ton em 2020 no Brasil (PeixeBr, 2021).

Os efluentes líquidos provenientes dos frigoríficos de peixes contêm grandes quantidades de matéria orgânica biodegradável (SONE, 2013). Conforme dados apresentados na Tabela 4, a maior parte das águas residuais dos abatedouros de peixe estão compostas por lipídios e proteínas (PALENZUELA ROLLÓN, 1999). O pH destas águas pode variar de 4,2 a 7,9. Sua demanda química de oxigênio (DQO) oscila entre 1.500 e 53.600 mg.L<sup>-1</sup>, a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) de 710 a 14.500 mg.L<sup>-1</sup> e os sólidos totais (ST) variam de 550 a 12.400 mg.L<sup>-1</sup>. A proporção de DQO total e solúvel pode variar amplamente em função do tipo de peixe para diferentes fábricas. A DBO pode chegar a variar de 52 a 87% do total da DQO (PALENZUELA ROLLÓN, 1999). Todos os valores excedem o limite da legislação ambiental, como apresentado na tabela, o que alerta sobre a necessidade de tratamento destes resíduos e o grau de contaminação dos corpos hídricos (SONE, 2013).

*Tabela 4: Composição média dos efluentes de abatedouro de peixes*

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Limites aceitos</b>
Temperatura [°C]	25 – 90	-
DQO lipídeos [g.L <sup>-1</sup> ]	0,04 – 21,6	< 0,05
DQO proteínas [g.L <sup>-1</sup> ]	0,7 – 28,8	-
pH	4,2 - 7,9	< 9
DQO total [mg.L <sup>-1</sup> ]	1.500 – 53.600	< 50
DBO [mg.L <sup>-1</sup> ]	710 – 14.500	< 125
ST [mg.L <sup>-1</sup> ]	550 – 12.400	< 1

Fonte: Adaptado de (FONSECA, 2018; PALENZUELA ROLLÓN, 1999)

Para terem um destino final proveitoso, parte dos resíduos de carcaça são destinados para a produção de farinhas, óleos e silagem. A parcela restante e os resíduos em decomposição são destinados para compostagem orgânica (VIDOTTI, 2016). Um futuro mais nobre para estes resíduos consiste na biodigestão anaeróbia que vem sendo proposta por vários autores (CADAVID-RODRÍGUEZ; VARGAS-MUÑOZ; PLÁCIDO, 2019; SALAM, 2015; SERRANO *et al.*, 2014; ZAPPI *et al.*, 2019). Esta última tem se mostrado uma solução interessante devido ao grande potencial metanogênico dos resíduos de peixe. A biodigestão anaeróbia, além da geração de uma fonte de energia como produto principal, gera menor quantidade de lodo, comparado ao processo aeróbio.

#### 3.4. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA

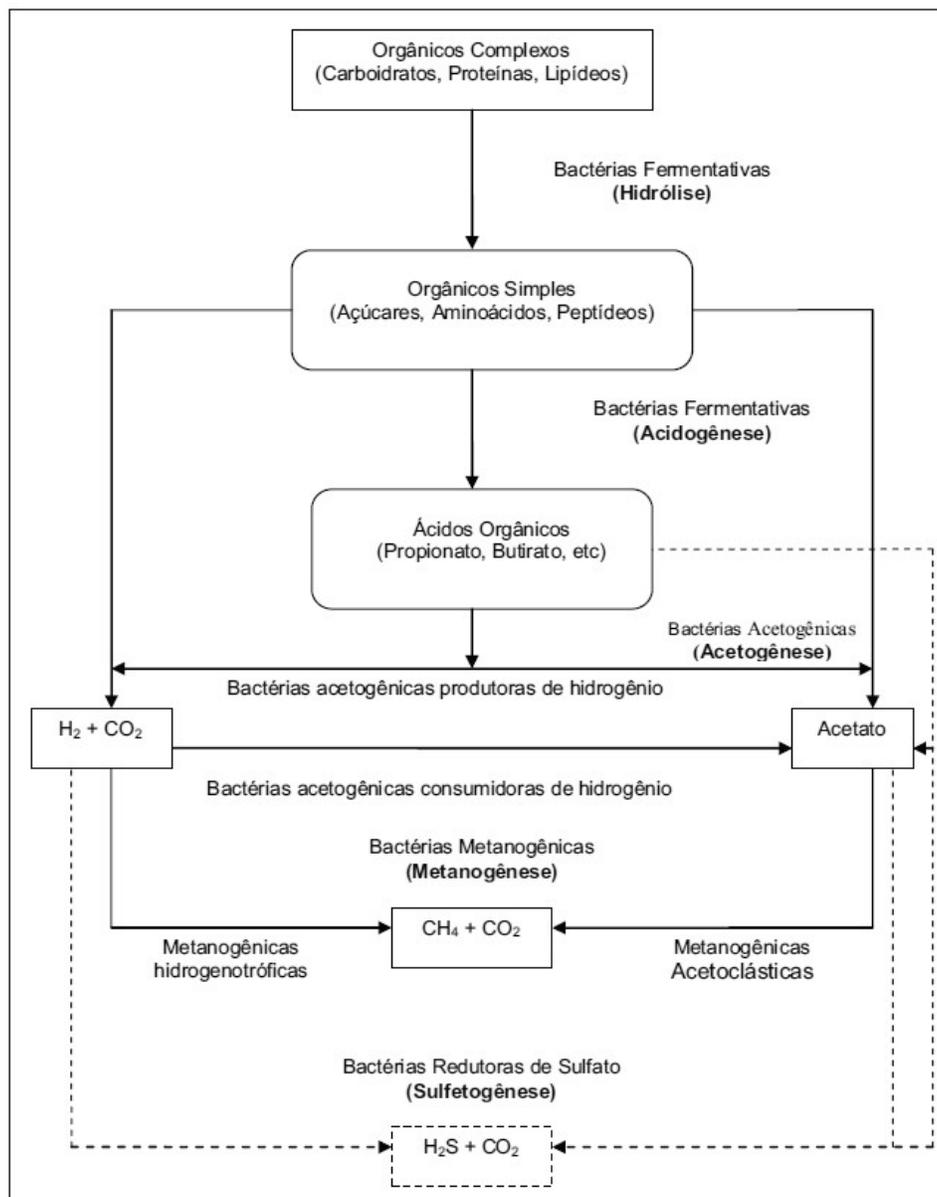
A biodigestão anaeróbia (BA) consiste no processo de produção de biogás a partir de decomposição da biomassa comumente gerada por resíduos orgânicos. Alguns destes resíduos orgânicos podem ser oriundos de culturas energéticas cultivadas para a produção de biocombustíveis, da agroindústria, de animais como dejetos e carcaça, e de lodos de estação de tratamento de esgoto. A matéria orgânica ao passar por um processo de decomposição anaeróbia produz biogás. A composição deste gás é função das condições nas quais os processos bioquímicos e microbiológicos são realizados, que dependem principalmente da temperatura, disponibilidade de nutrientes, pH, e tempo de retenção hidráulica (MORENO, 2011).

Toda a matéria orgânica é composta de água e uma fração sólida chamada de sólidos totais (ST). Para garantir que o processo seja realizado de forma satisfatória, o teor de sólidos totais da mistura no biodigestor deve garantir a mobilidade das bactérias, que é reduzida à medida que esta porcentagem aumenta, o que diminui o desempenho da produção de biogás. De acordo com a literatura, foi demonstrado experimentalmente que para um biodigestor semicontínuo o percentual de ST deve ficar em torno de 8 a 12% (MORENO, 2011). A temperatura de operação do digestor é um dos parâmetros operacionais mais importantes, devido à sua grande influência na velocidade da digestão anaeróbia. Há três faixas de temperatura em que os microrganismos podem operar: psicofílica (abaixo 25 °C), mesofílica (25 – 45 °C) e termofílica (45 – 65 °C) (BHARATHIRAJA *et al.*, 2018).

Além do efeito da temperatura, organismos metanogênicos são mais suscetíveis à variações de pH do que outros da comunidade anaeróbia, que apresentam níveis ideais de atividade em torno da neutralidade, especificamente em uma faixa de 7,8 a 8,2 para organismos metanogênicos (LORA; VENTURINI, 2012).

O processo da BA ocorre na ausência de oxigênio e compreende quatro fases: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese, como mostra a Figura 3.

*Figura 3: Sequências metabólicas envolvidas na digestão anaeróbia*



Fonte: (CHENICHARO, 1997)

Na etapa de hidrólise, ocorre a quebra de cadeias carbônicas de proteínas, lipídeos e carboidratos em compostos mais simples como ácidos graxos, aminoácidos e açúcares. Na acidogênese, são gerados dióxido de carbono, ácido acético, ácidos graxos que são absorvidos por bactérias fermentativas. A acetogênese consiste na produção dos substratos para a produção de metano com a transformação de ácidos graxos em ácido acético com a liberação de dióxido de carbono e hidrogênio. Na etapa de metanogênese, ocorre a produção de metano a partir de dois tipos de bactérias, a primeira chamada de bactérias acetotróficas a partir de ácido acético, e a segunda chamada bactérias hidrogenotróficas a partir de hidrogênio e dióxido de carbono (DALLAS, 2013).

Praticamente toda matéria orgânica pode ser convertida em biogás quando submetida à fermentação anaeróbia, e sua qualidade depende das características da matéria, sendo carbono e nitrogênio as principais fontes de alimento para bactérias metanogênicas. O carbono constitui a fonte de energia e o nitrogênio é usado para a formação de novas células. Essas bactérias consomem 30 vezes mais carbono do que nitrogênio, portanto, a proporção ideal entre os dois compostos é de C/N: 30:1 a 20:1. As características bioquímicas da matéria orgânica devem permitir o desenvolvimento e atividade microbiana do sistema. Este processo requer não apenas fontes de carbono e nitrogênio, mas também um equilíbrio de sais minerais (enxofre, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, ferro, manganês, molibdênio, zinco, cobalto, selênio, tungstênio, níquel e outros em menores quantidades) (MORENO, 2011).

Como produto da biodigestão anaeróbia, tem-se uma mistura de gases. Na Tabela 5 mostra-se a composição dos gases e suas proporções quando o biogás é produzido.

Tabela 5: Composição de gases presentes no biogás

Componente	Teor (%)
CH <sub>4</sub>	40 – 75
CO <sub>2</sub>	25 – 40
O <sub>2</sub>	0,1 – 1,0
N <sub>2</sub>	0,5 – 2,5
H <sub>2</sub>	1,0 – 3,0
H <sub>2</sub> S	0,1 – 0,5
CO	0,0 – 0,1
NH <sub>3</sub>	0,1 – 0,5

Fonte: (SANTIAGO; SANTIAGO, 2019)

O potencial energético do biogás está relacionado com o seu potencial metanogênico, ou seja, é desejável um maior percentual de CH<sub>4</sub> na mistura gasosa produzida. Segundo Schley *et al.* (2010) o poder calorífico superior (PCS) do biogás é de 13.270,14 kcal kg<sup>-1</sup>, e seu poder calorífico inferior (PCI) é de 11.959,39 kcal kg<sup>-1</sup>. Com estes valores é possível comparar energeticamente o biogás com alguns tipos de combustíveis e eletricidade, conforme demonstrado na Tabela 6 (SCHLEY *et al.*, 2010). Nesta pode-se observar que o biogás possui uma energia equivalente a 40% em média por exemplo de outro gás bastante utilizado como energia térmica como o GLP, e resulta um substituto interessante da lenha em comunidades de baixos recursos que ainda a utilizam.

Tabela 6: Equivalências energéticas por m<sup>3</sup> de biogás

Energético	Nogueira (1986)	Motta (1986)	Cortez et al. (2008)	Herrero (2008)	Lora et al. (2012)
Gasolina (L)	0,61	0,70	0,61	0,75	0,61-0,70
Querosene (L)	0,62	-	-	-	-
Óleo diesel (L)	0,55	-	0,56	0,65	0,55
Lenha (kg)	3,5	-	-	-	3,5
GLP (kg)	-	0,40	0,46	0,40-1,43	
Álcool (L)	0,80	-	0,79	1,1	0,8
Eletricidade (kWh)	-	1,25	1,43	-	1,25-1,43

Fonte: (CORTEZ; LORA; GÓMES, 2008; LORA; VENTURINI, 2012; MARTÍ-

HERRERO, 2008; MOTTA, 1986; NOGUEIRA, 1986)

Com respeito aos modos de operação dos biodigestores tem-se o contínuo, semicontínuo e batelada com descrito a seguir.

O contínuo é um tipo de processo ininterrompido no qual a carga do

biodigestor é igual à descarga, com geração de biogás uniforme durante o tempo de operação. Este tipo de sistema é mais utilizado na indústria, onde são empregados formas de controle de temperatura agitação e alimentação do biodigestor.

O semicontínuo é um sistema mais utilizado no meio rural, onde a primeira carga do biodigestor é a maior, em volume, e as demais cargas são adicionadas calculando-se o tempo de retenção hidráulico do processo e a capacidade de volume do biodigestor. A quantidade de efluente descarregada é proporcional à quantidade de afluente adicionada. Os biodigestores mais comuns neste tipo de sistemas são o Chinês e o Indiano.

O descontínuo ou batelada, é uma configuração que recebe uma grande carga de substrato no início da operação, e finalizado o tempo de reação, esta biomassa é descarregada totalmente, e o ciclo se reinicia.

Os tipos de biodigestores mais comuns utilizados atualmente são descritos a seguir (TEFERA, 2009).

O biodigestor tipo canadense ou de lona, consiste em um biodigestor de plástico enterrado parcialmente no solo. Este possui uma entrada e uma saída conectada diretamente na lona através de tubos, e o gás é armazenado no seu interior junto com o substrato. Este sistema possui a vantagem de ser o mais barato entre todos os tipos de biodigestores. É de fácil instalação, limpeza e a temperatura pode ser facilmente controlada externamente. As desvantagens são a curta vida útil, de aproximadamente 5 anos, a fragilidade e difícil reparo, e o seu isolamento térmico, entre outros.

O biodigestor de gasômetro fixo ou chinês, é construído com tijolos e é subterrâneo. Neste modelo a câmara de digestão e o gasômetro estão combinados na mesma unidade. O gasômetro fixo é relativamente barato e possui uma vida útil de aproximadamente 20 anos. Este tipo de sistema é mais adequado para climas frios, pois por ser subterrâneo, mantém sua temperatura facilmente. Entre suas desvantagens, está sua dificuldade construtiva para a vedação correta do sistema, e por ter o gasômetro fixo. Em áreas rochosas é impossível de se obter o biogás a pressão constante e o sistema de biodigestor subterrâneo depende do volume de gás gerado para que ocorra uma medição deste volume.

O biodigestor de gasômetro móvel ou indiano, é parecido com o chinês, porém o volume que armazena o biogás é móvel, mantendo assim sua pressão constante durante a operação e consumo do gás. Sua principal desvantagem

reside no projeto do gasômetro móvel, que deve ser de aço inoxidável o qual encarece o sistema e exige constante manutenção.

O biodigestor UASB é o mais eficiente dos biodigestores, e é bastante utilizado na degradação de matéria orgânica de esgotos. Este consiste em uma coluna ascendente onde o substrato inicialmente distribuído na base segue uma trajetória ascendente onde encontra uma manta de lodo, para a concretização da mistura, biodegradação e digestão anaeróbia. Este sistema possui uma zona de sedimentação e um dispositivo separador de fases líquida, sólida e gasosa (VERSIANI, 2005).

Para o auxílio na especificação do volume necessário do biodigestor, considera-se a Tabela 7 para a definição do tempo de retenção hidráulica TRH.

*Tabela 7: Tempo de retenção hidráulica para regiões distintas*

<b>Tempo de retenção hidráulica</b>	<b>Características</b>
<b>30 – 40 dias</b>	Clima tropical com regiões planas
<b>40 – 60 dias</b>	Regiões cálidas com invernos frios e curtos
<b>60 – 90 dias</b>	Climas frios com invernos longos

Fonte: (MORENO, 2011)

Para um sistema de carga diária semicontínuo, a equação utilizada para o cálculo do volume de biodigestor é a seguinte:

$$\frac{V_b}{TRH} = V_{cd} \quad (1)$$

Onde:

V<sub>b</sub>: Volume do biodigestor (m<sup>3</sup>);

TRH: Tempo de retenção hidráulica (dias);

V<sub>cd</sub>= Volume de carga diária (m<sup>3</sup>/dia);

### 3.5. GERAÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DA AQUICULTURA

A produção de biogás a partir de resíduos de peixe tem sido tema de pesquisa nos últimos anos. Os estudos consistem no potencial de geração de biogás, inclusive no pré-tratamento deste tipo de substrato para aumentar sua produção

metanogênica.

Estudo desenvolvido na Colômbia demonstrou o potencial de produção de biometano dos resíduos de peixe das comunidades de pesca artesanal daquele país, em função do teor de sólidos totais do substrato (1%; 1,5%; 2%; 2,5%). O substrato com a concentração de ST de 1% teve o melhor rendimento, com uma produção de 464,5 mL CH<sub>4</sub>/g<sub>SV</sub>, enquanto que a mistura com 2,5% de sólidos totais obteve o menor rendimento, aproximadamente 206,86 mL CH<sub>4</sub>/g<sub>SV</sub> (CADAVID-RODRÍGUEZ; VARGAS-MUÑOZ; PLÁCIDO, 2019).

O tipo de substrato utilizado interfere no biogás produzido, bem como o tipo de carcaça de peixe utilizado, em trabalho recente o substrato utilizado na digestão correspondeu às águas residuais da indústria de processamento de peixe gato. Os autores avaliaram diversas estratégias para o pré-tratamento do substrato, dentre elas: (a) alteração de nutrientes com adição de N<sub>2</sub>; (b) pré-tratamento com ozônio + alteração de nutrientes; (c) pré-tratamento com HCl + alteração de nutrientes; d) pré-tratamento com NaOH + alteração de nutrientes. A produção do biogás apontou que a adição de nitrogênio promoveu a digestão anaeróbia favorecendo a produção do biogás (ZAPPI *et al.*, 2019).

Soethe (2014) analisou a produção de biogás a partir de vísceras de tilápia na codigestão com resíduos suínos. Foi considerada a variação na concentração dos substratos, e observou-se concentrações de CH<sub>4</sub> de até 88,72% no biogás produzido na codigestão contendo 50% de vísceras de tilápia e 50% de dejetos suínos.

O trabalho de Braz e Pimentel (2016) estimou a produção de 294 m<sup>3</sup> de biogás equivalente a 1708,74 kWh/dia a partir de 243 toneladas de vísceras de tilápia de comunidades pesqueiras na Bahia, através de equações empíricas da literatura (BRAZ; PIMENTEL, 2016).

Fonseca (2018) dividiu os resíduos de tilápia em 7 partes, sendo estas, escama, resíduos mistos, carcaça, cabeça, vísceras, pele e nadadeira para a biodigestão anaeróbia, obtendo rendimentos de metano superiores nas frações de cabeça, carcaça e vísceras com 975, 937 e 916 L<sub>Nbiogás</sub>kg<sub>SV</sub><sup>-1</sup> respectivamente.

Kafle e Kim (2012) avaliou a produção de biogás a partir de resíduos do mercado coreano de peixe onde obteve valores de 757 a 554 mLCH<sub>4</sub>/g<sub>SV</sub> com porcentagens de metano de até 77% no biogás obtido (KAFLE; KIM, 2012).

### 3.6. SÍNTESE DE PROCESSOS

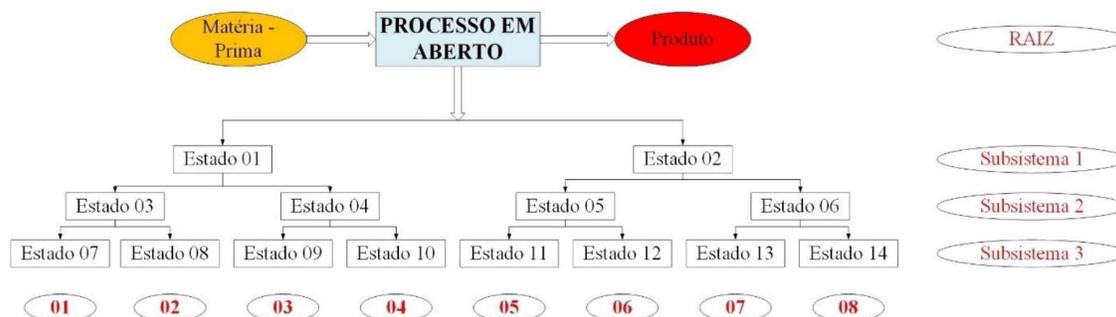
A Síntese de Processos é uma técnica utilizada para resolver problemas combinatórios, quando se tem poucos dados quantitativos na idealização de um projeto. O objetivo é gerar um número de soluções que posteriormente serão reduzidas em busca de uma solução ótima em função das propriedades da matéria prima, o produto e as diferentes rotas tecnológicas que podem-se adotar no projeto para chegar ao produto final (ARRIECHE *et al.*, 2020).

A síntese de um projeto é a etapa de sua concepção que define sua estrutura, que logo deve ser analisada e resolvida coordenadamente. Em seguida o processo pode ser representado por superestruturas e por árvores de estados que representam as diferentes rotas tecnológicas que podem ser tomadas (PERLIGEIRO, 2005).

#### 3.6.1. Representação por árvore de estados

A Figura 4 reproduz uma representação genérica de um processo através de árvore de estados. Ela é apresentada como uma árvore invertida com a raiz, onde é identificado o produto desejado, e os ramos onde se encontram os subsistemas ou etapas alternativas do processo. Este tipo de representação permite organizar e varrer todas as soluções possíveis sem repetições e omissões para chegar ao produto de forma ótima (PERLIGEIRO, 2005).

Figura 4: Representação por árvore de estados



Fonte: (DAL-BÓ, 2016)

Para chegar ao resultado, devido à multiplicidade de soluções,

adotam-se métodos heurísticos e evolutivos desenvolvidos na engenharia de processos.

### 3.6.2. Análise por método heurístico

O objetivo deste método é encontrar apenas um fluxograma ótimo que descreva o processo inteiro até chegar no produto. O mesmo utiliza de um conjunto de regras práticas que podem se basear em experiência acumulada, resultados experimentais, características da matéria prima, especificações dos equipamentos ou na literatura científica pertinente, para definir de forma hierárquica as tarefas para a seleção das etapas do processo. Para determinar estas regras heurísticas deve-se considerar um objetivo, como por exemplo, custos, eficiência, impacto ambiental, ou tempo de processo (ARRIECHE *et al.*, 2020).

Devem-se aplicar as regras heurísticas mais adequadas a cada estado do processo para assim definir o estado seguinte (Figura 4). O fluxograma obtido pelo método heurístico, deve ser ainda submetido ao método evolutivo de maneira a otimizar o fluxograma base escolhido e aprimorar a solução já existente (PERLIGEIRO, 2005).

### 3.6.3. Análise por método evolutivo

Através das regras evolutivas procura-se identificar os fluxogramas vizinhos que diferem apenas por um único elemento estrutural e encontrar o fluxograma com o menor custo. O processo é repetido até que o fluxograma mais promissor seja encontrado.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Este projeto é realizado em parceria com a microempresa de aquicultura familiar Alquimia Pescados, com sede em Foz do Iguaçu/Paraná. A empresa iniciou suas atividades em 2008, com a proposta de realizar cultivo de peixes Pacu, Bagre, Piau, Tilápia, entre outros, no lago de Itaipu pelo método de tanque rede submerso, conforme mostrado na Figura 5. A empresa realiza o cultivo no ponto de pesca 2 localizado no bairro Alto da Boa Vista. O abate e processamento dos produtos é realizado no bairro Itaipu C Nova, onde também são comercializados os produtos.

*Figura 5: Tanques rede da empresa Alquimia Pescados*



Fonte: Alquimia Pescados

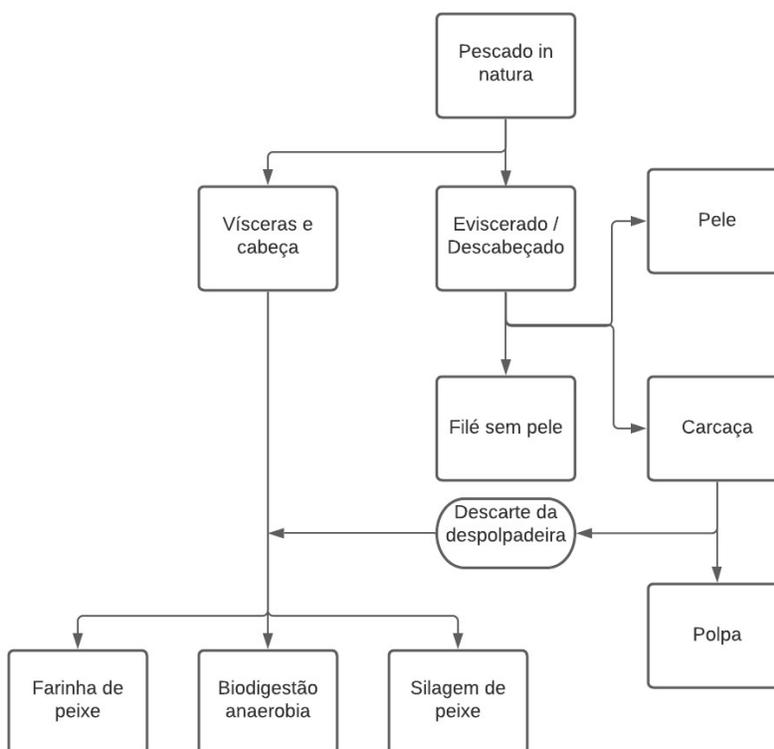
A proposta deste trabalho é verificar a viabilidade técnica para o aproveitamento dos resíduos de peixe do abate para a geração de biogás através de biodigestão anaeróbia. Estes resíduos consistem basicamente na mistura de todas as partes constituintes do pescado de uma espécie em particular. Para este estudo considera-se a tilápia por ser uma espécie comum e a mais comercializada pela empresa com uma média de produção semanal de 500 kg de peixe *in natura* o que leva a uma geração resíduos de mais de 540 kg por semana.

Os resíduos de tilápia de abate (cabeça, escamas, nadadeiras, peles,

vísceras, ossos, etc) normalmente são doados para a fabricação de ração para peixes. A parte restante é utilizada para a produção de óleo de peixe para uso local, quando necessário, porém este óleo não é comercializado. A partir disto, a proposta consiste em aproveitar estes resíduos que representam um passivo ambiental, para gerar um ativo energético que é o biogás.

Na Figura 6 apresenta-se um resumo do processo que envolve a cadeia produtiva do pescado da empresa e em que etapa cada tipo de resíduo é gerado. Nela pode-se observar que os principais resíduos gerados são, a pele, a carcaça, vísceras e cabeça. Estes resíduos podem ser aproveitados para a fabricação de farinhas de peixe para ração, silagem de peixe, óleo de peixe e também biogás a partir de sua biodigestão anaeróbia. A metodologia aplicada para a obtenção do biogás será discutida com base na teoria de síntese de processos a fim de enquadrá-la com o contexto da empresa, características da matéria prima escolhida, e a redução de custos do processo.

*Figura 6: Fluxograma de produção da Tilápia e resíduos*



Fonte: Adaptado de (KUBITZA; CAMPOS, 2006)

## 4.2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

### 4.2.1. Amostragem

As amostras para estudo consistem em resíduos viscerais e de carcaça de tilápia fornecidos pela empresa Alquimia Pescados de Foz do Iguaçu (ver Figura 7). Através de levantamento em campo foram identificados os tipos de resíduos de tilápia encontrados de forma comum na empresa. As amostras foram divididas da seguinte forma, uma fração de vísceras in natura (VIS), uma fração de vísceras após a extração de parte dos lipídeos (VSO) (ver Figura 8), uma fração de carcaça in natura (CAR) e uma fração de mistura de carcaça e vísceras (MIX) em proporção (6:1), proporção baseada no peso das tilápias encontradas na empresa.

As amostras de carcaça foram trituradas com um triturador de resíduos orgânicos Trapp TR200 (ver Figura 9) e posteriormente entregues no laboratório. Foram coletadas aproximadamente 1 kg de cada amostra triturada. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos selados e levadas imediatamente para o laboratório para sua refrigeração até a caracterização. As amostras foram armazenadas a 4 °C até o início dos ensaios conforme recomendado pela (APHA, 2017).

*Figura 7: Resíduos de Tilápia*



Fonte: O Autor

Figura 8: Cocção das vísceras e óleo extraído via metodologia da empresa



Fonte: O Autor

Figura 9: Triturador Trapp TR200



#### 4.2.2. Caracterização das amostras

Foram realizadas as caracterizações citadas na Tabela 8: Parâmetros da caracterização dos substratos.

Para os ensaios de ST e SV foi utilizado o método gravimétrico adaptado do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). O ensaio de PBM foi realizado de acordo com a norma VDI 4630 (2016) e DIN 38414 (1985), utilizando o método em batelada. A caracterização do biogás foi

efetuada com uso do analisador de monitor portátil da marca Geotech, modelo GA5000, onde obteve-se os valores de metano (CH<sub>4</sub>). Os valores de carbono orgânico total (COT) foram estimados em base dos SV dividindo estes valores por 1,8 como indicado pelo autor (COMPOSTING, 1996) e utilizados por (GUERI, 2017) e (FONSECA, 2018).

*Tabela 8: Parâmetros da caracterização dos substratos*

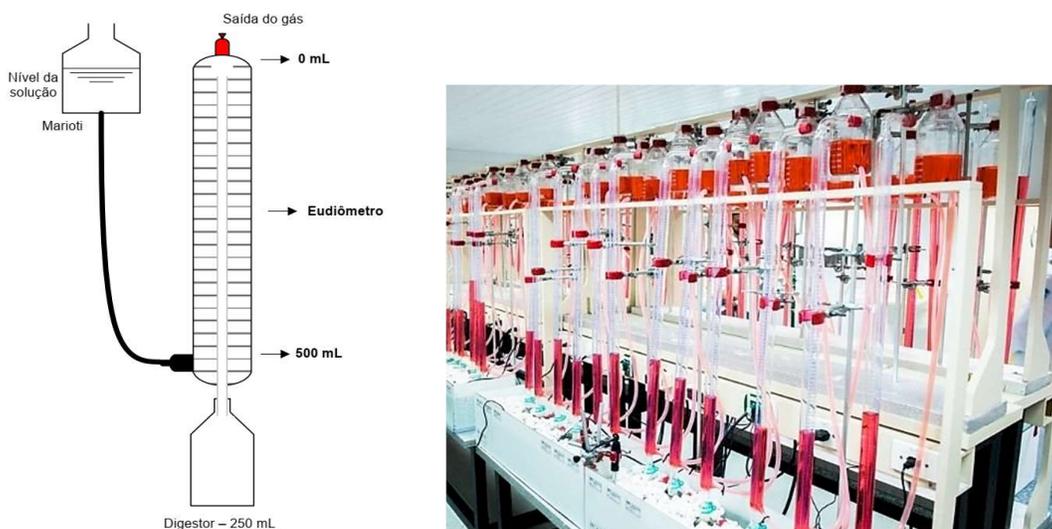
<b>Parâmetro</b>	<b>Método</b>
<b>Sólidos Totais</b>	2540 G (APHA, 2017)
<b>Sólidos Fixos</b>	2540 G (APHA, 2017)
<b>Sólidos Voláteis</b>	2540 G (APHA, 2017)
<b>Demanda Química de Oxigênio</b>	Espectrofotômetro
<b>Carbono Orgânico Total</b>	Gravimétrico
<b>Nitrogênio Total</b>	Kjeldhal
<b>Lipídeos</b>	Soxhlet

Fonte: O Autor

#### 4.2.3. Biodigestão anaeróbia

Os ensaios de produção de biogás foram conduzidos no laboratório do Cibogas no Parque Tecnológico Itaipu. Os biorreatores utilizados consistem em reatores de vidro de 250 mL conectados a tubos graduados de 0 a 500 mL, utilizando-se a técnica com eudiômetros, conforme imagem mostrada na Figura 10, de acordo com a metodologia da norma VDI 4630. O volume de biogás gerado desloca o líquido selante na coluna do eudiômetro, o que é controlado diariamente. O padrão positivo utilizado foi a celulose microcristalina e o padrão negativo consiste no inóculo puro.

Figura 10: Sistema reator, eudiômetro e frasco de nível



Fonte: (LINS, 2017)

O experimento foi conduzido por 35 dias à temperatura mesofílica (37 °C). Os parâmetros do biogás foram verificados através do uso de um monitor portátil Geotech modelos GA5000. O metano foi contabilizado a partir de sua produção específica com base nos SV em base seca, e condições normais de temperatura e pressão expressos nas unidades ( $L_N.kgSV^{-1}$ ), conforme a VDI 4630.

O inóculo foi retirado de um biodigestor operando há 8 anos nas instalações do CiBiogas composto por efluentes de suinocultura, bovinocultura e resíduos urbanos. Conforme recomendação da VDI 4630 utilizou-se uma proporção de amostra/inóculo de 1/3 em função dos SV respectivamente, a norma ainda recomenda que esta relação não deve ser menor a 1/2, a massa de cada amostra em base úmida utilizada no biorreator mostra-se na Tabela 9. A massa utilizada de inóculo foi de 200g.

Tabela 9: Parâmetros iniciais das amostras

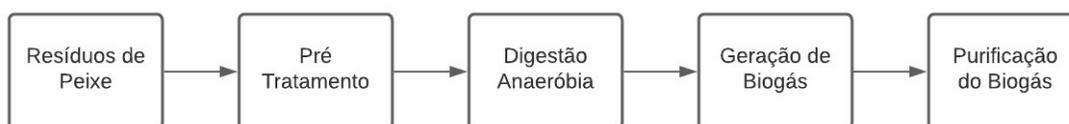
Massa [g]	MIX	CAR	VIS	VSO
<b>Amostra</b>	3,92	4,43	2,72	4,25
<b>Inóculo</b>	200	200	200	200

Fonte: O Autor

### 4.3. SÍNTESE DA ÁRVORE DE ESTADOS DO PROJETO

Na Figura 11 está representado, de forma resumida, o processo de biodigestão dos resíduos de peixe para este projeto. O fluxograma embrião apresenta, de forma geral, o processamento dos resíduos de peixe para a obtenção do biogás.

*Figura 11: Fluxograma embrião do processo de biodigestão anaeróbia*

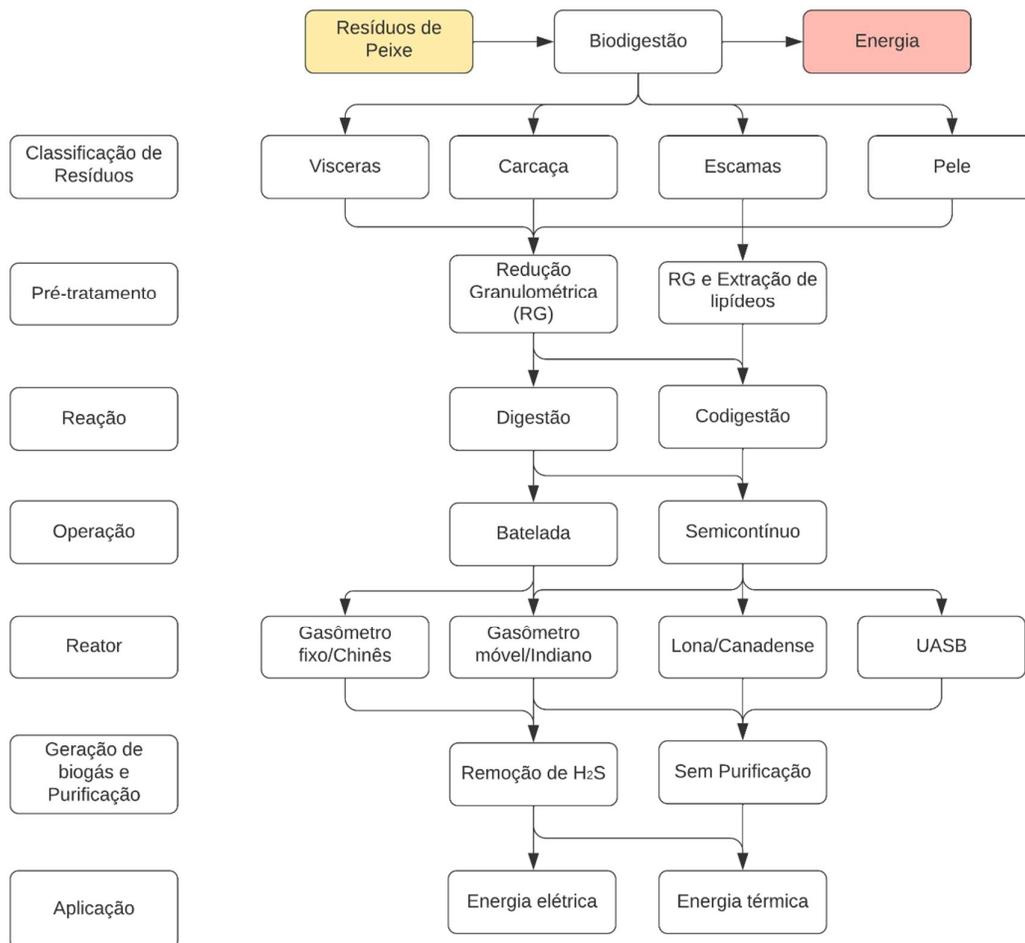


Fonte: O Autor

A sistematização do projeto de processos decompõe o problema em subproblemas tecnológicos, estruturais e paramétricos, para serem representados através de uma árvore de estados que representa todas as rotas tecnológicas do processo para chegar ao resultado final (DAL-BÓ *et al.*, 2019). Ao apresentar alternativas em algum subsistema do processo, como por exemplo, o de redução granulométrica, aumentam o número de possibilidades a serem analisadas, formando assim ramificações no fluxograma embrião.

A Figura 12 apresenta a árvore de estados para o processo de produção do biogás utilizando os resíduos de peixe. Cada ramo representa uma possível solução para o problema. A raiz da árvore corresponde à finalidade do processo definindo a matéria-prima e o produto como sendo os resíduos de peixe e seus ensaios de biodigestão anaeróbia para a geração de energia. Os estados são representados pelos vértices da árvore e os subsistemas são as etapas envolvidas no processo. A seguir são discutidos os subsistemas da árvore de estados a fim de analisá-los para chegar ao fluxograma base do processo.

Figura 12: *Árvore de estados geral*



Fonte: O Autor

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1. RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DOS SUBSTRATOS

Na Tabela 10 são apresentados os resultados da caracterização das amostras compostas por resíduos de tilápia.

*Tabela 10: Resultados da caracterização das amostras*

<b>Parâmetro</b>	<b>VIS</b>	<b>VSO</b>	<b>CAR</b>	<b>MIX</b>	<b>Inóculo</b>
<b>ST (%)</b>	54,60	39,80	44,80	46,80	3,16
<b>SV (%) base seca</b>	98,70	96,40	73,90	79,90	69,42
<b>pH</b>	7,75	7,77	7,68	7,73	8,30
<b>COT (%SV/1,8)</b>	54,80	53,50	41,10	44,40	-
<b>NTK (%)</b>	1,00	2,26	3,14	2,36	-
<b>C/N</b>	54,80	23,60	13,10	18,80	-
<b>DQO (gO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup>)</b>	692,83	716,17	437,83	629,50	-
<b>Lipídios (%)</b>	36,55	9,60	16,20	32,90	-

Fonte: O Autor

A fração com a maior taxa de ST foi a VIS com 54,6% e fração VSO com o menor valor igual a 39,8%. Fonseca (2018) ao analisar resíduos de tilápia para a produção de biogás, encontrou teores de ST de 42,7% para vísceras de tilápia. Estes valores de ST confirmam uma presença grande de água nestes resíduos como era esperado, para prever seu rendimento foram analisados os valores de SV.

Com respeito ao teor de SV, foram encontrados para a fração VIS 98,7% e o menor valor na fração CAR com 73,9% em base seca. Fonseca (2018) obteve o valor de 97,4% de SV para a fração de vísceras de tilápia bastante similar ao presente trabalho, Soethe (2014) também para resíduos de vísceras de tilápia encontrou valores de 91,64% de SV um abaixo do presente trabalho, Cadavid, Muñoz e Plácido (2019) encontraram 84,9% de SV para resíduos de peixes nativos da Colômbia para produção de biogás. Estas diferenças nos teores de SV podem-se dever à alimentação dos peixes e a espécie a qual pertencem.

Os valores de SV estão ligados com o rendimento de produção de biogás uma vez que são os sólidos voláteis que de fato, irão gerar o biogás

(PROBIOGÁS, 2010). A partir disto, observa-se que a fração CAR obteve o menor valor de SV, sendo então um sinal da previsão de um rendimento reduzido da fração VIS quando misturada com esta na fração MIX.

Foram encontrados os valores para a relação C/N obtendo-se para a fração VIS um valor de 54,8 muito superior ao apresentado por Fonseca (2018), C/N = 14,36 para vísceras de tilápia *in natura*, que pode ser devido à diferença no regime de alimentação do peixe, e Cadavid, Muñoz e Plácido (2019) encontraram valores de C/N de 5,7 para resíduos de peixe da pesca artesanal com níveis de ST de 1 a 2,5%. Kafle e Kim (2012) encontraram valores de C/N de 4,1 para efluentes de peixe do mercado coreano com valores de ST de 31,30 e de SV de 27,5% em base seca.

Os altos valores de DQO são relatados por outros autores como Soethe (2014) que encontrou valores de 503,75 gO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> para vísceras de tilápia. Cadavid, Muñoz e Plácido (2019) determinaram uma DQO de 256 gO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> para resíduos de peixes nativos da Colômbia, Pacheco e Yamanaka (2006) corroboram uma concentração de 400 gO<sub>2</sub>.L<sup>-1</sup> para resíduos de abatedouro bovino como sangue bruto (PACHECO; YAMANAKA, 2006). Estes valores elevados de DQO podem ser atribuídos ao fato de que os resíduos não estão dissolvidos em água no momento do descarte e análise, contendo altas concentrações de sangue e matéria orgânica putrescível, como observado por Pacheco e Yamanaka (2006) com os resíduos do abatedouro bovino.

Com respeito ao teor de lipídios obteve-se valores de 36,66 e 9,6% para as frações de VIS e VSO respectivamente evidenciando um rendimento de 26,2% no método de extração de óleo utilizada pela empresa. Estudo realizado com a codigestão de resíduos de peixe com dejetos suínos (1:1), encontrou um teor de gorduras de 20,03% (SOETHE, 2014). A avaliação dos impactos ambientais da criação de tilápia observou teores de gordura corporal de 1,57 a 1,98% e visceral de 12,64 a 25,04% (ELIZA *et al.*, 2002). Fonseca (2018), estudando a produção de biogás a partir de resíduos de tilápia mistos, encontrou um teor de lipídeos de 30,1%. Carvalho (2016), que estudou o aproveitamento do óleo de peixe para a geração de biodiesel, encontrou teores de lipídeos de 56,8% para a fração de vísceras de tilápia, e extraindo os óleos dos resíduos de filetagem de tilápia observou um teor de 16,68% (CARVALHO, 2016).

## 5.2. RESULTADOS DA SÍNTESE DE PROCESSOS

Nesta seção serão exploradas as regras heurísticas consideradas para a tomada de decisão na síntese do processo. Entre elas são consideradas principalmente questões relevantes para o estudo de caso, como o contexto da cadeia produtiva da empresa, baixo custo de operação e manutenção nos processos envolvidos na produção de biogás, dados da literatura e resultados experimentais.

### 5.2.1. Classificação dos resíduos de peixe

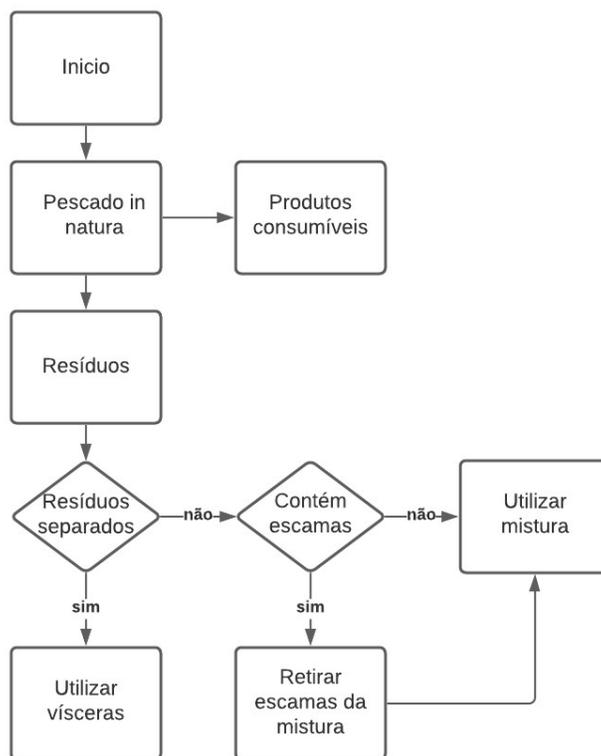
Para realizar a classificação dos resíduos a serem utilizados para a geração de biogás, é necessário conhecer a logística da empresa durante sua produção. Posteriormente deve-se escolher uma metodologia adequada para a gestão dos resíduos.

Na Figura 6 da seção anterior apresentou-se o fluxograma geral da produção da tilápia e a geração dos resíduos envolvidos no processo. Como pode ser observado, os resíduos de vísceras e carcaça podem ser destinados para diferentes aplicações. Destas têm destaque a farinha para a produção de ração, a silagem de peixe, e a proposta do presente trabalho, que consiste na biodigestão anaeróbia para a geração de biogás.

Entre as regras heurísticas consideradas para a escolha e classificação dos resíduos, conforme a Figura 13, considera-se a logística da empresa, uma vez que esta faz a separação dos resíduos em dois grupos; o primeiro, vísceras *in natura*, e o segundo, carcaça de tilápia. Cada parte que compõe esses resíduos de peixe como vísceras (VIS), cabeça (CAB), carcaça (CAR), pele (PEL), nadadeiras (NAD) e escamas (ESC) tem um potencial de geração de biogás.

Segundo Fonseca (2018), as frações de CAB, CAR e VIS apresentaram uma produção maior de biogás, sendo que VIS apresentou maior porcentagem de metano por kg de resíduo. Os resultados mostraram que a fração ESC obteve o pior desempenho na produção de biogás, desta forma é recomendada sua remoção da mistura para digestão devido à dificuldade de degradação e acúmulo de materiais sólidos no interior do biodigestor.

Figura 13: Subsistemas de classificação de resíduos



Fonte: O autor

O estudo obteve valores satisfatórios para a produção do biogás na fração de mistura (MIX). A quantidade de gás produzida foi superior ao obtido na degradação das NAD e PEL (310 e 190  $L_{NCH_4} \text{ kg}_{SV}^{-1}$ , respectivamente), porém menores que VIS, CAR e CAB (481, 522 e 572  $L_{NCH_4} \text{ kg}_{SV}^{-1}$ , respectivamente). O autor concluiu que o resultado se deve provavelmente à ação inibidora das escamas presentes na pele e nadadeiras dos resíduos.

### 5.2.2. Pré tratamento

A etapa de redução granulométrica é fundamental para o processo de biodigestão anaeróbia. A diminuição do tamanho das partículas é necessária para biodisponibilizar macromoléculas no sistema anaeróbio aumentando a área superficial dos resíduos, isto evita o acúmulo de compostos inibitórios no reator e aumenta a cinética da reação anaeróbia (IZUMI *et al.*, 2010). Entre os métodos mais utilizados para a redução do tamanho de partícula do substrato de diversas matérias

primas para biodigestão, tem-se cocção (térmico), moagem ou trituração e ultrassom (SOUZA, 2014).

Um possível agente inibidor do processo de biodigestão anaeróbia, indicado por alguns autores, é o óleo e a gordura contidos nos resíduos de peixe. Em estudo com resíduo de abatedouro suíno, os resultados demonstraram que altos valores de lipídios nos resíduos promovem a formação de amônia e ácidos graxos de cadeia longa causando inibição na reprodução dos microrganismos envolvidos no processo de biodigestão anaeróbia (HEJNFELT; ANGELIDAKI, 2009). Outros problemas que acarretam a alta concentração de material lipídico são a insolubilidade e as reduzidas densidade e degradabilidade, o que dificulta a biodisponibilidade necessária para a concretização da reação de biodigestão (BATTIMELLI *et al.*, 2010).

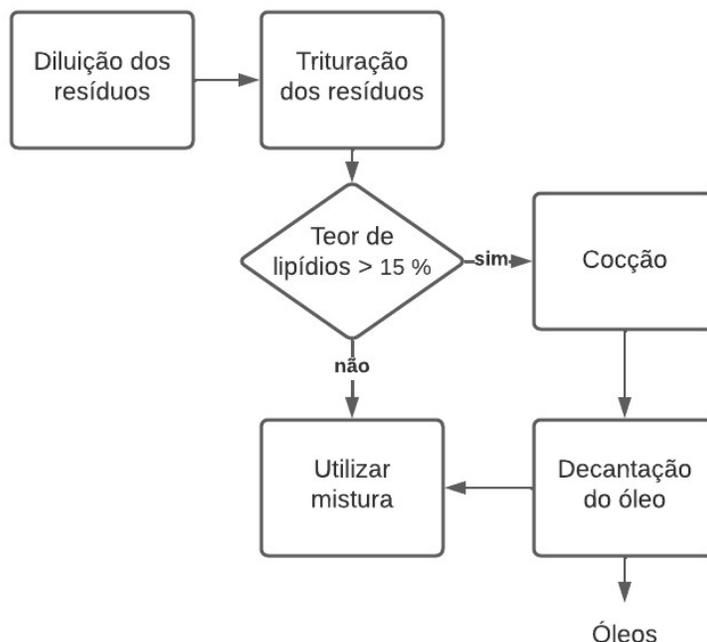
Uma solução para a diminuição de lipídeos e demais gorduras, é a realização de pré-tratamento da biomassa. Harris e McCabe estudaram a geração de biogás através de resíduos de carcaças da indústria bovina, onde constataram a importância do pré-tratamento para diminuição do conteúdo de gordura e óleos. Entre os pré-tratamentos estudados estão os mecânicos (homogeneização a alta pressão e desintegração ultrassônica), térmicos, químicos e termoquímicos (HARRIS; MCCABE, 2015).

Uma opção viável para a redução do teor de gordura é através da extração do óleo dos resíduos que pode também ser utilizado para a produção de biodiesel, por exemplo (OLIVEIRA; BARBOZA; DA SILVA, 2013; SOUZA, 2014). Em estudo realizado por Battimelli *et al.* (2010), verificou-se um aumento no rendimento na geração de biogás a partir de resíduos de abatedouro, após o pré-tratamento por saponificação do substrato. O objetivo do pré-tratamento foi hidrolisar os lipídios para transformá-los em sais de ácidos graxos e glicerol, a fim de biodisponibilizar a matéria passível de degradação (BATTIMELLI *et al.*, 2010).

Park *et al.* (2017) estudaram o pré tratamento térmico de resíduos de carcaça de aves provenientes da indústria aviária. Estes resíduos foram submetidos a um tratamento hidrotérmico na faixa de temperaturas de 170 a 220 °C com o objetivo de degradar a matéria orgânica no que diz respeito aos carboidratos, lipídios, proteínas e ácidos nucleicos. O rendimento máximo de metano foi alcançado na temperatura de 190 °C. Os autores também apontam que, em temperaturas superiores a 200 °C, os carboidratos solubilizados reagem com outros compostos dificultando o processo de degradação da biomassa (PARK *et al.*, 2017).

No presente trabalho, serão analisados os resultados no rendimento de produção de biogás de substratos de vísceras in natura, e com o óleo extraído para observar o impacto deste composto nas amostras. Para a extração do óleo será utilizada uma metodologia simplificada já utilizada pela empresa, que consiste na cocção das vísceras e posterior decantação do óleo. O subsistema do pré-tratamento dos resíduos, conforme discutido aqui, está ilustrado na Figura 14.

*Figura 14: Subsistema de pré-tratamento*



Fonte: O autor

### 5.2.3. Especificação do biodigestor

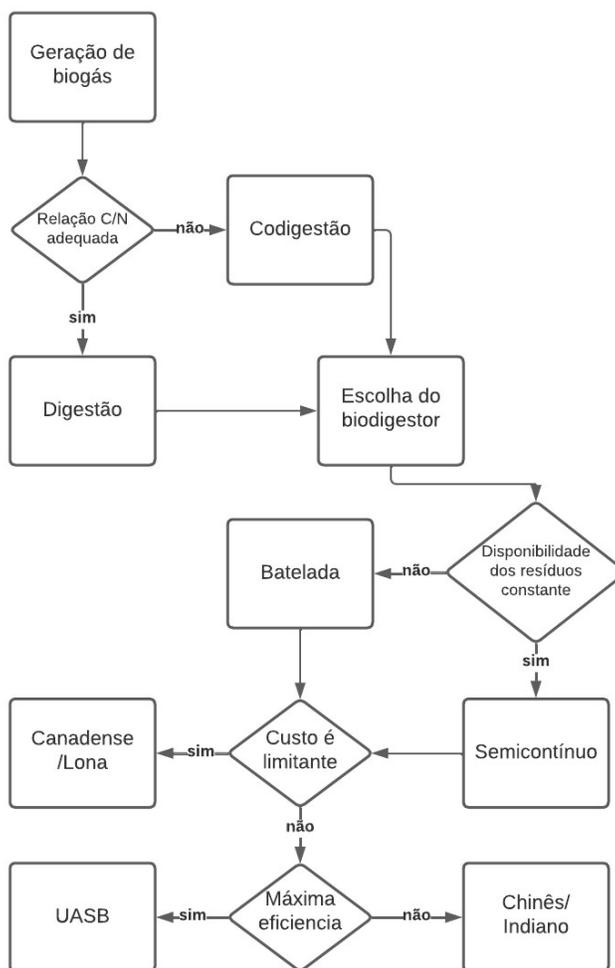
Para escolher o tipo de biodigestor a ser utilizado na aplicação do projeto pela empresa, serão considerados o baixo custo de construção, operação e manutenção, como também as características particulares de cada tipo. Consideram-se os três tipos de processos de biodigestão, sendo o contínuo, semicontínuo e descontínuo (MORENO, 2011).

A constante disponibilidade de resíduos de tilápia, de aproximadamente 500 kg por semana ou 71 kg por dia, viabiliza a utilização de um regime semicontínuo na operação do biodigestor. Considerando a equação 1, e a

Tabela 7 para um TRH de 30 dias e uma taxa de ST de 12% para regime semicontínuo recomendado por Moreno (2011). Considerando a Tabela 10 para as vísceras de tilápia com ST = 54,60%, seria necessária uma proporção de 5:1 de água:substrato, o que daria um volume de carga diária de mais de 421 L para manter a taxa de ST total do sistema em 11%, tem-se então um volume de biodigestor de 12,63 podendo ser arredondado para 13 m<sup>3</sup>.

Para este projeto considera-se o biodigestor de menor custo possível, e pela sua facilidade de instalação e operação, ou seja, o de lona. Como o biogás será utilizado como combustível para gerar energia térmica, não é necessário um processo estritamente eficiente e sofisticado, de maneira a viabilizar a aplicação no contexto de aquicultura familiar. Na Figura 15 considera-se o fluxograma decisório para a escolha das etapas adequadas para a produção do biogás, já discutidas anteriormente.

Figura 15: Subsistema de geração de biogás



Fonte: O Autor

#### 5.2.4. Tratamento do biogás

Com respeito à purificação do biogás (Figura 16), como este será utilizado como combustível, e não para geração de energia elétrica, o processo pode ser simplificado. O biogás contém em sua composição de 50 a 70% de CH<sub>4</sub> e 25 a 50% de CO<sub>2</sub> com pequenas quantidades de H<sub>2</sub>S, N<sub>2</sub>, vapor d'água, O<sub>2</sub> e CO (MORENO, 2011).

Com o objetivo de aumentar o poder calorífico do biogás, pode-se aplicar um tratamento de remoção de sua umidade. A umidade presente na mistura de gases é indesejável pelo fato de que parte do calor gerado seria absorvido pela massa de água da mistura de gases. Para isto são considerados métodos de

adsorção e absorção para o tratamento do biogás.

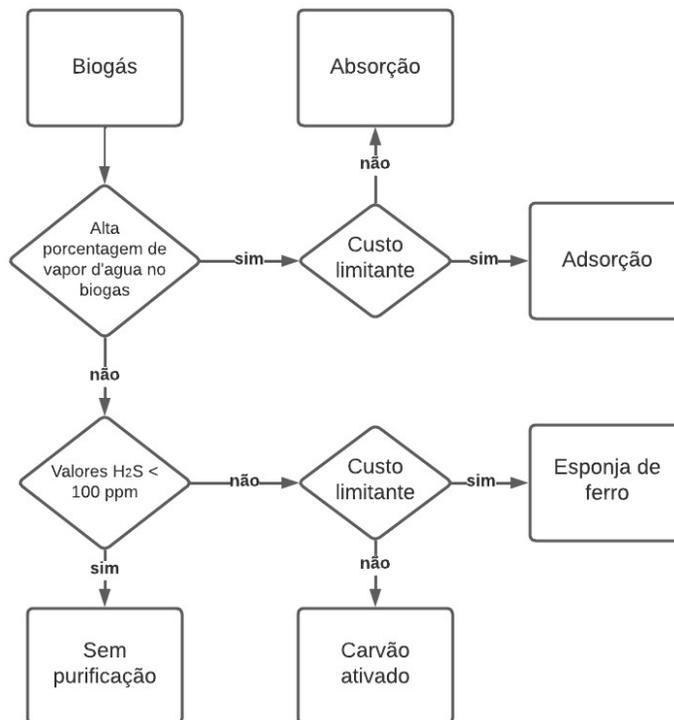
Na secagem por adsorção, o biogás é conduzido por uma tubulação contendo zeólitas, sílica gel ou óxidos de alumínio a uma pressão de 6 a 8 bar. Este método resulta de baixo custo e tem um ótimo resultado, e pode ser utilizado em qualquer tipo de biogás. Na secagem por absorção são utilizados como desumidificadores o glicol, etilenoglicol ou trietileno glicol. Estes álcoois removem do biogás tanto o vapor d'água como os hidrocarbonetos superiores, e são utilizados em fluxos mais altos de biogás ( $500 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ) passando por uma torre absorvedora em contracorrente com o reagente (PROBIOGÁS, 2010).

Para combustão de biogás em queimadores convencionais os requerimentos são a operação a uma pressão de gás de 8 a 25 mbar e a manutenção dos níveis de  $\text{H}_2\text{S}$  menores que 100 ppm para conseguir um ponto de orvalho de  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  (MORENO, 2011). Para a dessulfurização do biogás, são considerados os métodos relativamente simples de filtração física.

O primeiro deles conhecido como o método *iron sponge*, utiliza um filtro de ferro metálico, óxido de ferro ou óxido de zinco. Neste sistema o biogás é conduzido através do filtro contendo limalhas de ferro, óxido de ferro impregnado em lascas de madeira ou esponja de ferro, obtendo-se como produto de reação sulfeto de ferro ou sulfeto de zinco. A desvantagem deste método é a possibilidade de combustão espontânea devido à reação do sulfeto de ferro na forma de pirita com o ar atmosférico, o que deve ser levado em consideração na fase de projeto do sistema (BUSI DA SILVA; PAOLO MEZZARI, 2019).

Outro método considerado, porém, mais caro, é a adsorção através de carvão ativado dopado com permanganato de potássio para utilização com biogás isento de ar. Este processo consiste na oxidação catalítica do sulfeto de hidrogênio na superfície do carvão ativado (PROBIOGÁS, 2010).

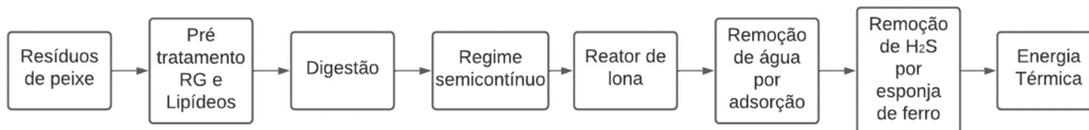
Figura 16: Tratamento do biogás



Fonte: O Autor

Com isto pode-se concluir de forma preliminar a árvore de estados teoricamente adequada para o projeto como mostra-se na Figura 17.

Figura 17: Síntese final dos processos



Fonte: O Autor

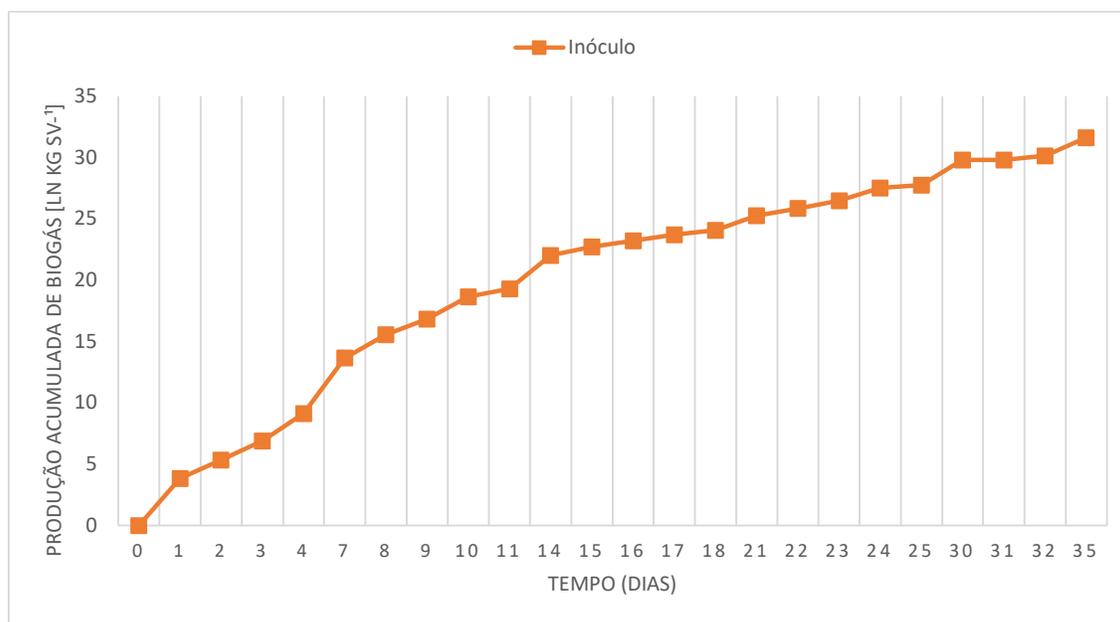
### 5.3. DETERMINAÇÃO DO POTENCIAL METANOGENÉTICO

Nesta seção são apresentados os resultados do potencial de produção de biogás das amostras VIS, VSO, CAR e MIX, além dos ensaios do inóculo e celulose microcristalina. Estes resultados pretendem também estudar o impacto da

extração de grande parte dos lipídeos das amostras de vísceras *in natura* com a fração VSO, a fim de justificar este processo adicional de pré-tratamento.

Na Figura 18 mostra-se a produção acumulada de biogás do inóculo, na qual obteve-se  $32 \text{ L}_N \cdot \text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$ . Para avaliar o rendimento do inóculo, este foi ensaiado junto com celulose microcristalina, um composto com o PBM conhecido.

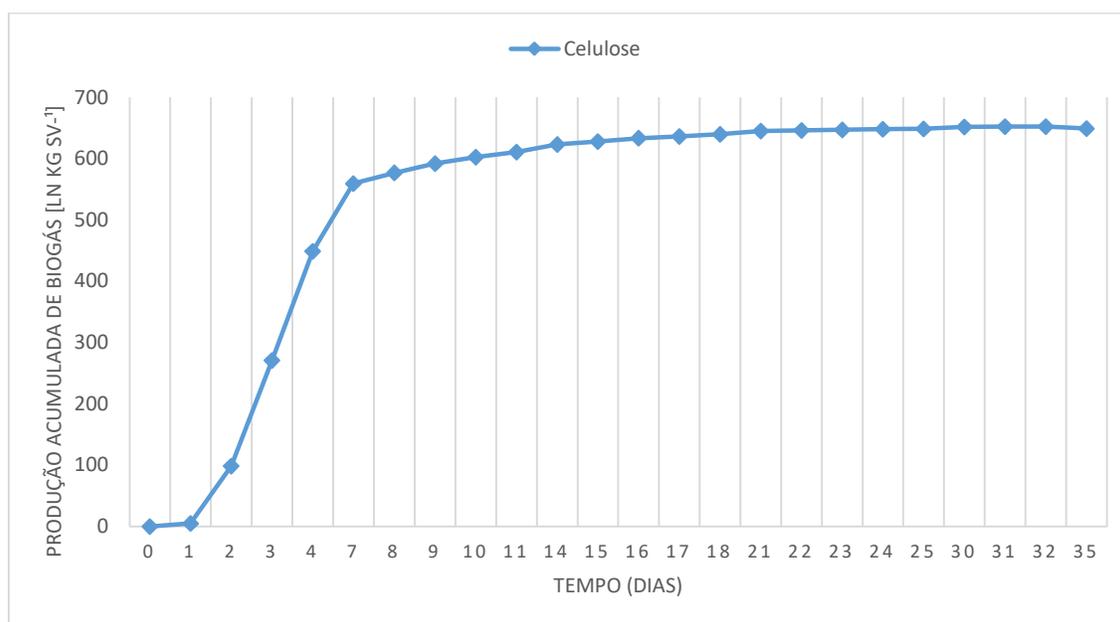
*Figura 18: Produção acumulada de biogás do inóculo*



Fonte: O autor

Na Figura 19 apresenta-se a produção acumulada de biogás da celulose microcristalina junto com o inóculo. A partir deste resultado pode-se afirmar que o ensaio foi satisfatório uma vez que foi atingida uma produção de  $649 \text{ L}_N \cdot \text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$  superando os 80% ou  $592 \text{ L}_N \cdot \text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$  de produção do valor padrão exigidos, de 740 a  $750 \text{ L}_N \cdot \text{kg}_{\text{SV}}^{-1}$  pela norma VDI 4630.

Figura 19: Produção acumulada de biogás da celulose microcristalina



Fonte: O Autor

No que se refere ao processo de biodigestão anaeróbia considera-se a possibilidade de utilizar isoladamente o substrato de resíduos de peixe. Na Tabela 11, apresentam-se os resultados de geração de biogás para cada amostra considerada. Além do teste com as amostras isoladas, também foi analisado uma mistura (MIX) das vísceras e carcaça. Destaca-se que as vísceras utilizadas na mistura eram amostras in natura, ou seja, antes da extração do óleo.

Tabela 11: Potencial de geração de biogás das amostras

Amostra	Prod. Biogás (LN.kgsv <sup>-1</sup> )	Prod. Metano (LN.kgsv <sup>-1</sup> )	% Metano
VIS	1295	864	67
VSO	1063	683	64
CAR	943	605	64
MIX	892	553	62

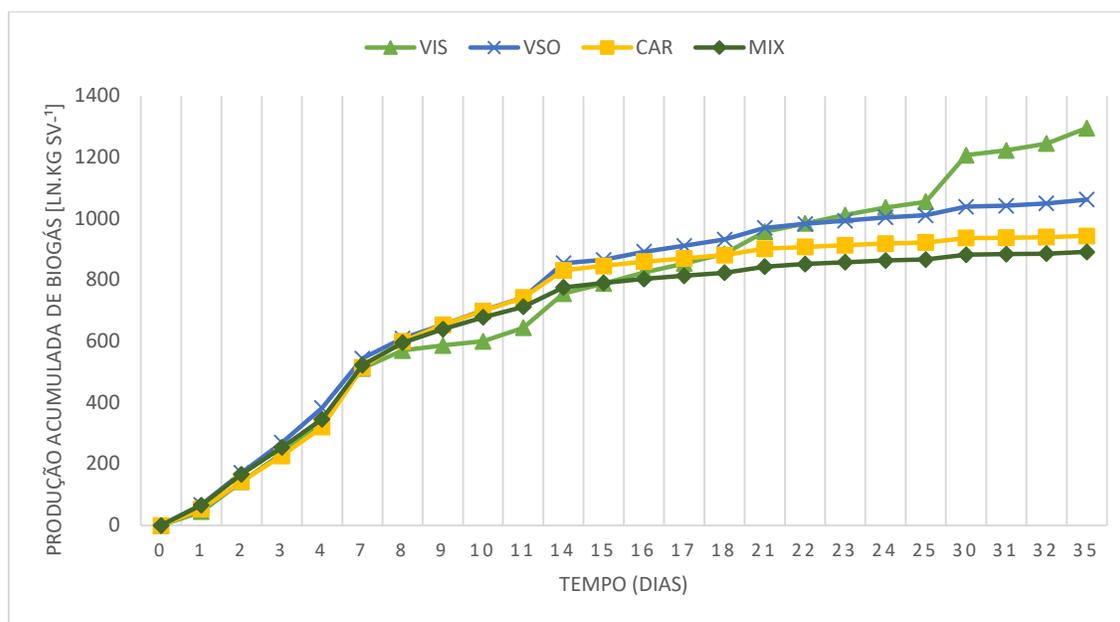
Fonte: O Autor

Com respeito ao potencial de geração de biogás, observa-se um rendimento superior na fração VIS, com uma produção acumulada de 1295 LN.kgsv<sup>-1</sup>

devido ao alto teor de SV que contem esta amostra (EIROA *et al.*, 2012). Para estudar o impacto dos lipídeos na víscera de tilápia, foram ensaiadas amostras com lipídeos extraídos através da metodologia utilizada pela empresa para a fração VSO, a qual teve um rendimento de extração de óleo de 26,2% em peso. Esta fração obteve uma produção acumulada de 1063 LN.kgSV<sup>-1</sup>, menor que a fração de VIS. Segundo Rasit *et al.* (2015), o teor de lipídeos presente nos substratos, aumenta a produção de biogás, existindo uma correlação positiva entre estes parâmetros (RASIT *et al.*, 2015).

Os menores rendimentos de produção de biogás pertencem as frações MIX e CAR com 798,9 LN.kgSV<sup>-1</sup> e 739,2 LN.kgSV<sup>-1</sup> respectivamente, em concordância também com sua menor taxa de SV. A Figura 20 apresenta a cinética de produção acumulada de biogás para cada amostra. Como apresentado na figura a fração VIS apresenta uma maior produção acumulada, e a fração MIX a menor entre as amostras.

*Figura 20: Cinética de produção acumulada de biogás de acordo com o tipo de amostra*



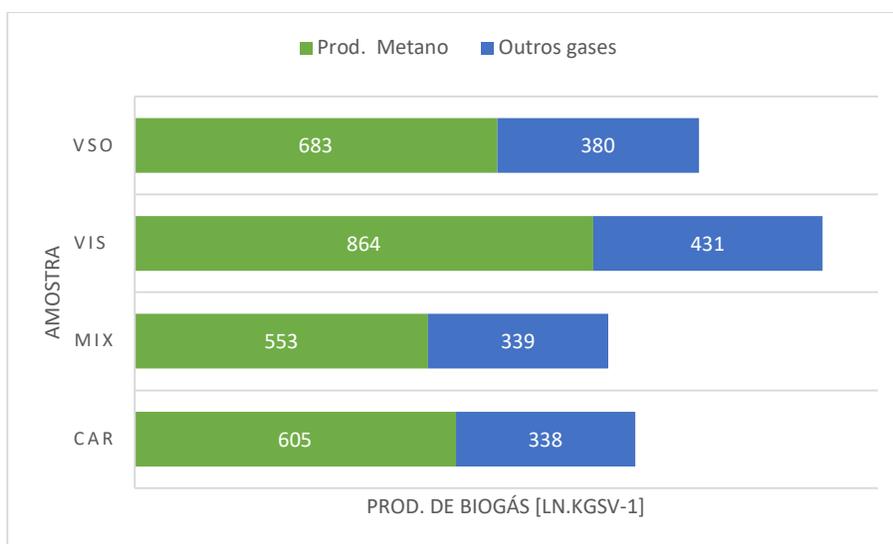
Fonte: O autor

Embora o rendimento da fração VIS seja maior com respeito a produção acumulada, observa-se um período de menor produção até o dia 21, e uma produção superior ao resto de amostras a partir do dia 23 de Tempo de retenção

hidráulica. Isto se deve ao potencial inibidor dos lipídios na fase de hidrólise devido à alta taxa de geração e acumulação de ácidos graxos de cadeia longa (AGCL), importante inibidor dos microrganismos metanogênicos (SALMINEN; RINTALA, 2002). Uma vez superada a fase de hidrólise, os microrganismos conseguem digerir os AGCL o que resulta em uma produção de biogás maior comparada com a digestão de proteínas e carboidratos, porém esta situação requer de TRH maiores (CIRNE *et al.*, 2007; PEREIRA *et al.*, 2004).

Na Figura 21 apresentam-se os resultados de produção de metano presente no biogás produzido, comparando esta figura com a Tabela 11, pode-se observar mais uma vez o rendimento superior da fração VIS com 67% de metano presente na mistura de gases, e com rendimento inferior a fração MIX com 62%.

Figura 21: Produção de metano de acordo com o tipo de amostra



Fonte: O autor

Fonseca (2018) constatou um percentual de metano de 51% para a biodigestão de vísceras de tilápia, Soethe (2014) encontrou 88,72% de metano a partir da codigestão de vísceras de tilápia com dejetos suínos, Souza (2010) verificou valores de 78,05% a partir de biodigestão de resíduos de filetagem de sangria de pescado.

Na Tabela 12 apresenta-se a relação de produção de metano em termos de massa *in natura*, com a fração de VIS superando as demais com 466 litros normalizados de metano por kg de vísceras em estado natural. A segunda fração com

o melhor rendimento é a VSO seguida de MIX e CAR.

*Tabela 12: Produção de metano por massa in natura*

<b>Amostra</b>	<b>Prod. Metano por SV (L<sub>N</sub>CH<sub>4</sub>.kg<sub>SV</sub><sup>-1</sup>)</b>	<b>Prod. Metano por MI (L<sub>N</sub>CH<sub>4</sub>.kg<sub>MI</sub><sup>-1</sup>)</b>
VIS	864	466
VSO	683	262
MIX	553	207
CAR	605	200

MI: Massa *in natura*

Fonte: O Autor

Na Tabela 13 mostra-se uma comparação entre os valores de volume de metano gerado para diferentes autores que trabalharam com resíduos de peixe para a geração de biogás. A unidade considerada é L<sub>N</sub>CH<sub>4</sub>.kg<sub>SV</sub><sup>-1</sup>. Fonseca, (2018) utilizou frações de víscera de Tilápia, Mshandete *et al.* (2004) utilizou resíduos de peixes nativos em codigestão com resíduos de sisal. Cadavid, Vargas e Plácido, (2019) a partir de resíduos de peixe da pesca extrativa artesanal da Colômbia. Eiroa *et al.* (2012) trabalhou com três espécies diferentes de peixes, e Nges *et al.* (2012), utilizou resíduos de salmão.

*Tabela 13: Comparação de resultados com outros trabalhos*

<b>Autor</b>	<b>Tipo de amostra</b>	<b>Prod. Metano por SV (L<sub>N</sub>CH<sub>4</sub>.kg<sub>SV</sub><sup>-1</sup>)</b>
Presente trabalho	Vísceras de tilápia	864
Fonseca (2018)	Vísceras de tilápia	481
Mshandete et al. (2004)	Mistura de peixes	390
Cadavid, Vargas e Plácido (2019)	Peixes nativos	464,4
Eiroa et al. (2012)	Mistura de peixes	350
Nges et al. (2012)	Resíduos de salmão	828

#### 5.4. ANÁLISE FINANCEIRA

A continuação apresenta-se uma breve análise financeira realizada a partir de uma simulação com a ferramenta BiogasInvest do Cibiogas (CASSIANO MORO PIEKARSKI *et al.*). Na Tabela 14 apresentam-se os dados utilizados para a simulação financeira na plataforma. Na Figura 22 apresenta-se o fluxo de caixa apresentando o payback do projeto.

O substrato escolhido para análise é a fração VIS, devido ao seu rendimento superior com respeito aos demais substratos. O biogás produzido será utilizado como energia térmica para queima simples em fogareiro comum, por 5 horas ao dia com consumo a plena carga de 90 L/h.

Embora o volume total de biodigestor pode chegar a 13m<sup>3</sup>, para a simulação considera-se um volume útil de 9 m<sup>3</sup> composto por 3 biodigestores de 3 m<sup>3</sup> assumindo-se um custo total de R\$ 10 mil. Como o propósito é gerar energia térmica para combustão, determina-se um custo OPEX de O&M de R\$ 100 por mês.

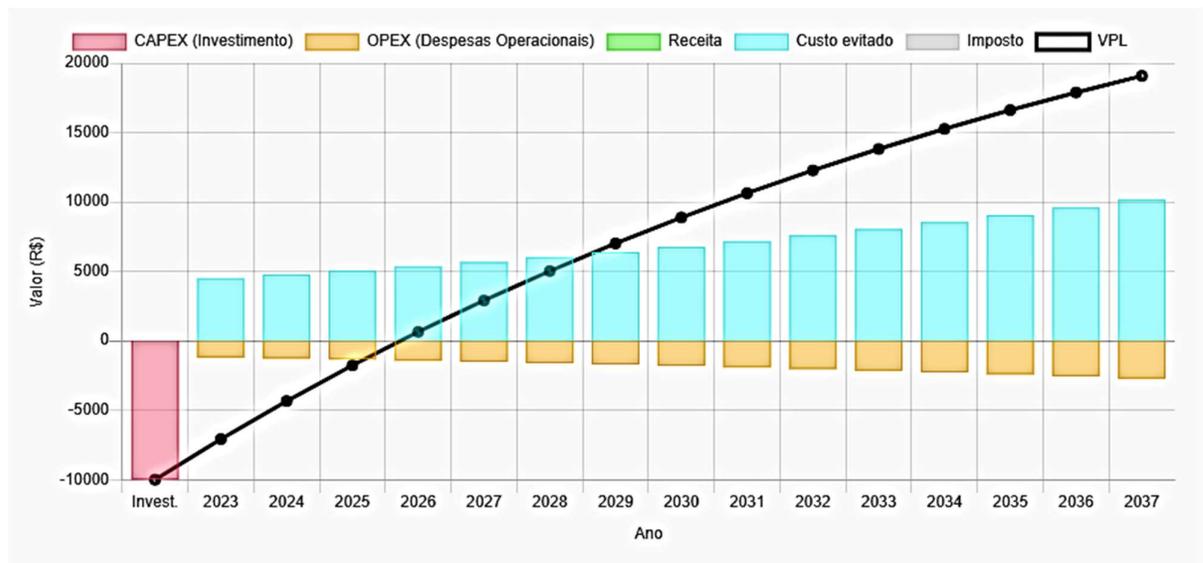
A taxa mínima de atratividade (TMA) considerada é a taxa SELIC. A taxa de inflação anual corresponde a uma média de 12 anos (IPCA).

*Tabela 14: Dados e resultados da simulação*

Inflação média anual projetada	6% ao ano
Taxa mínima de atratividade (TMA)	13% ao ano
Valor presente líquido (VPL) do projeto	R\$ 19.082,27
Taxa interna de retorno (TIR)	38,40 % ao ano
Ano de payback	2026
CAPEX (investimento) total	R\$ 10.000,00
CAPEX (investimento) (R\$) por Nm <sup>3</sup> de Biogás	R\$ 8,71
OPEX (custos operativos) total	R\$ 27.931,16
OPEX (custos operativos) (R\$) por Nm <sup>3</sup> de Biogás	R\$ 24,33
Produção de metano (VIS)	466 L <sub>N</sub> CH <sub>4</sub> .kg <sub>Mi</sub> <sup>-1</sup>
Porcentual de metano	67%
Porcentual de ST	54,6%
Volume do biodigestor	9 m <sup>3</sup>
Volume diário	300 L/dia
Custos de O&M anual	R\$ 1200,00

Fonte: O Autor

Figura 22: Fluxo de caixa do projeto



Fonte: O Autor

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a ajuda da síntese de processos foi possível explorar teoricamente as estratégias a aplicar para o sucesso do processo. Através da literatura foram verificadas condições comuns deste tipo de processos com o mesmo tipo ou substrato equivalente, e observaram-se características relevantes e similares nos trabalhos apresentados.

Os ensaios de caracterização das amostras evidenciam altas taxas de sólidos voláteis, o que prevê um bom rendimento para a biodigestão anaeróbia, como também alta concentração de matéria orgânica, e uma ótima relação C/N na fração VIS. Com respeito à influência de uma maior taxa de lipídeos em algumas amostras, observa-se que existe um potencial inibidor na fase inicial do tempo de retenção hidráulica, porém uma vez superada esta fase, este tipo de substratos apresenta um maior rendimento na produção acumulada de biogás.

A partir dos ensaios laboratoriais foi determinada a viabilidade técnica da produção de biogás a partir de resíduos de tilápia com um rendimento bastante satisfatório e ótimos teores de metano. No entanto deve-se ter em conta que para uma aplicação real podem-se experimentar rendimentos inferiores, devido a que os ensaios realizados no trabalho foram levados a cabo em um laboratório com condições controladas e alta complexidade tecnológica. Estes resultados podem ser considerados, no entanto, como máximos ideais.

A biodigestão destes resíduos auxiliará na preservação das bacias hidrográficas bem como apresenta uma alternativa adicional para o aproveitamento deste passivo ambiental como fonte de energia. A partir da análise financeira demonstrou-se a viabilidade econômica do empreendimento, com um tempo de payback de 3 anos, um VPL de R\$ 19 mil, e uma TIR de 38,4 %.

As maiores dificuldades enfrentadas no trabalho devem-se as complicações geradas pela pandemia de Covid-19 o que de várias formas atrasou o início dos ensaios, e afetou no planejamento como um todo. Como trabalho futuro pretende-se avaliar o poder calorífico do biogás gerado a partir dos resíduos de tilápia para o seu uso como combustível renovável para substituição de gás GLP.

## 7. REFERÊNCIAS

- ANA. **Quantidade da água — Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/panorama-das-aguas/quantidade-da-agua>>. Acesso em: 28 jul. 2020.
- APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington: AWWA, 2017. v. 1
- ARRIECHE, L. S. et al. **SÍNTESE DE PROJETOS EM ENERGIA E SUSTENTABILIDADE**. [s.l.] EDITORA CRV, 2020.
- BATTIMELLI, A. et al. Slaughterhouse fatty waste saponification to increase biogas yield. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 10, p. 3388–3393, 2010.
- BHARATHIRAJA, B. et al. Biogas production – A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 90, n. July, p. 570–582, 2018.
- BOSCOLO, WILSON.; FEIDEN, ALDI. **Industrialização da Tilapia**. Toledo: Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), 2007.
- BRAZ, M. A. C.; PIMENTEL, L. A. ANÁLISE DA VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE VÍSCERAS DE TILÁPIA NA REGIÃO DE PAULO AFONSO - BA. v. 4, p. 1343–1345, 2016.
- BUSI DA SILVA, M. L.; PAOLO MEZZARI, M. Tratamento e purificação de biogás - Capítulo IV. In: **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato**. [s.l.] Airton Kunz, Ricardo Luis Radis Steinmetz, André Cestonaro do Amaral (editores Técnicos), 2019. p. 69–93.
- CAB. **Cultivando Água Boa | ITAIPU BINACIONAL**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/meioambiente/cultivando-agua-boa>>. Acesso em: 28 jul. 2020.
- CADAVID-RODRÍGUEZ, L. S.; VARGAS-MUÑOZ, M. A.; PLÁCIDO, J. Biomethane from fish waste as a source of renewable energy for artisanal fishing communities. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 34, n. May, p. 110–115, 2019.
- CAMOLEZE, EDINO. **Tilápia: O segundo peixe mais consumido do mundo – Animal Business Brasil**. Disponível em: <<https://animalbusiness.com.br/producao-animal/criacao-animal/tilapia-o-segundo-peixe-mais-consumido-do-mundo/>>. Acesso em: 15 ago. 2020.
- CARVALHO, G. C. D. E. POTENCIAL DO ÓLEO EXTRAÍDO DE RESÍDUOS DA FILETAGEM DE TILÁPIA ( *Oreochromis niloticus* ) PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL. p. 74, 2016.
- CASSIANO MORO PIEKARSKI, A. S. P. et al. **BiogasInvest**. Disponível em: <<https://biogasinvest.cibiogas.org/biogasinvest/>>. Acesso em: 6 jun. 2022.
- CHENICHARO, C. A. L. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA, UFMG, 1997.
- CIPOLAT, C. et al. Programa Cultivando Água Boa ( CAB ) da Itaipu Binacional : Análise dos principais programas , projetos e ações. **VII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia**, p. 15, 2010.
- CIRNE, D. G. et al. Anaerobic digestion of lipid-rich waste-Effects of lipid concentration. **Renewable Energy**, v. 32, n. 6, p. 965–975, 2007.
- COMPOSTING, C. **Estimating Carbon content**. Disponível em: <<http://compost.css.cornell.edu/calc/carbon.html>>. Acesso em: 30 mar. 2022.
- CORONEL, C. Aquicultura no Reservatório de Itaipu. 2007.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMES, E. O. Biomassa para Energia.

- Biomassa para energia**, p. 734, 2008.
- DAL-BÓ, V. **Potencialidades para o Aproveitamento de Biomassa de Casa de Café Robusta para a Geração de Energia**. [s.l.] Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.
- DAL-BÓ, V. et al. Process synthesis for coffee husks to energy using hierarchical approaches. **Renewable Energy**, v. 142, p. 195–206, 2019.
- DALLAS, J. Revista Brasileira de Energias Renováveis BIODIGESTÃO ANAERÓBIA NO TRATAMENTO DE RESÍDUOS LIGNOCELULÓSICOS<sup>1</sup>. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, p. 21–35, 2013.
- EIROA, M. et al. Evaluation of the biomethane potential of solid fish waste. **Waste Management**, v. 32, n. 7, p. 1347–1352, 2012.
- ELIZA, A. et al. UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA CENTRO DE AQUICULTURA DA UNESP CAMPUS DE JABOTICABAL IMPACTO AMBIENTAL E PARÂMETROS ZOOTÉCNICOS DA PRODUÇÃO DE TILÁPIA DO NILO (*Oreochromis niloticus*) SOB DIFERENTES MANEJOS ALIMENTARES. 2002.
- FAO. **THE STATE OF THE WORLD FISHERIES AND AQUACULTURE 2020, Sustainability in action**. Rome: [s.n.].
- FONSECA, C. **POTENCIAL BIOQUÍMICO DE BIOGÁS DE RESÍDUO DE FILETAGEM DE TILÁPIA *Oreochromis nilóticos***. [s.l.] UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2018.
- GUERI, M. V. D. **AValiação do Processo de Digestão Anaeróbia de Resíduos Alimentares em Reatores Batelada e Semi-Contínuo**. [s.l.] UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE CENTRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS EXATAS, 2017.
- HARRIS, P. W.; MCCABE, B. K. Review of pre-treatments used in anaerobic digestion and their potential application in high-fat cattle slaughterhouse wastewater. **Applied Energy**, v. 155, p. 560–575, 2015.
- HEJNFELT, A.; ANGELIDAKI, I. Anaerobic digestion of slaughterhouse by-products. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 8, p. 1046–1054, 2009.
- IBGE. Censo agropecuário 2017: resultados definitivos. **Censo agropecuário: resultados definitivos**, v. 8, p. 1–105, 2019.
- ITAIPU. **Produção de Peixes em Nossas Águas | ITAIPU BINACIONAL**. Disponível em: <<https://www.itaipu.gov.br/meioambiente/mais-peixes-em-nossas-aguas>>. Acesso em: 28 jul. 2020.
- IZUMI, K. et al. Effects of particle size on anaerobic digestion of food waste. **International Biodeterioration and Biodegradation**, v. 64, n. 7, p. 601–608, out. 2010.
- KAFLE, G. K.; KIM, S. H. Evaluation of the Biogas Productivity Potential of Fish Waste: A Lab Scale Batch Study. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 37, n. 5, p. 302–313, 2012.
- KUBITZA, F.; CAMPOS, J. L. **O Aproveitamento dos subprodutos do processamento do pescado | Revista Panorama da Aqüicultura**. Disponível em: <<https://panoramadaaquicultura.com.br/o-aproveitamento-dos-subprodutos-do-processamento-do-pescado/>>. Acesso em: 15 dez. 2020.
- LINS, L. P. **PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DE RESÍDUOS DE BOVINOCULTURA LEITEIRA POR MEIO DA CODIGESTÃO COM MACRÓFITAS DA ESPÉCIE *Salvinia***. [s.l.] UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, 2017.
- LORA, E.; VENTURINI, O. **Biocombustíveis**. Rio de Janeiro: [s.n.].
- MARTÍ-HERRERO, J. **Biodigestores familiares: Guía de diseño y manual de**

- instalación.** [s.l: s.n.]. v. 53
- MORENO, M. T. V. Manual de Biogás. **MINENERGIA / PNUD / FAO / GEF, Santiago, Chile**, 2011.
- MOTTA, F. S. **Produza sua Energia - Biodigestores Anaeróbios**. Recife: S.A., 1986.
- NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão: A Alternativa Energética**. São Paulo: Nobel, 1986.
- OLIVEIRA, L. E.; BARBOZA, J. C. S.; DA SILVA, M. L. C. P. Production of ethylic biodiesel from tilápia visceral oil. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, v. 1, n. 11, p. 683–686, 2013.
- PACHECO, J. W.; YAMANAKA, H. T. Guia técnico ambiental de abates (bovino e suíno) - série P+L. p. 98, 2006.
- PALENZUELA ROLLÓN, A. Anaerobic Digestion of Fish Processing Wastewater with Special Emphasis on Hydrolysis of Suspended Solids. p. 123, 1999.
- PARK, S. et al. Effect of hydrothermal pre-treatment (HTP) on poultry slaughterhouse waste (PSW) sludge for the enhancement of the solubilization, physical properties, and biogas production through anaerobic digestion. **Waste Management**, v. 64, p. 327–332, 2017.
- PEIXEBR. **Anuário PeixeBR 2020: Crescimento de 4,9% da piscicultura nacional - Seafood Brasil | Seafood Brasil**. Disponível em: <<http://seafoodbrasil.com.br/anuario-peixebr-2020-crescimento-de-49-da-piscicultura-nacional->>. Acesso em: 28 jul. 2020.
- PEIXE-BR. Anuário Peixe Br da Piscicultura 2020. **Associação Brasileira de Piscicultura**, p. 1–136, 2020.
- PEIXESBR. Anuário Peixe BR da Piscicultura 2021. **Peixe Br**, p. 140, 2021.
- PEREIRA, M. A. et al. Mineralization of LCFA associated with anaerobic sludge: Kinetics, enhancement of methanogenic activity, and effect of VFA. **Biotechnology and Bioengineering**, v. 88, n. 4, p. 502–511, 2004.
- PERLIGEIRO, C. **Engenharia de processos**. [s.l: s.n.].
- PPNA. **Produção de Peixes em Nossas Águas (PPNA) (01 C)**. Disponível em: <<http://www.boaspraticas.org.br/index.php/pt/areas-tematicas/inclusao-socio-productiva/27-producao-de-peixes-em-nossas-aguas>>. Acesso em: 17 ago. 2020.
- PROBIOGÁS. Guia Prático do Biogás - Geração e Utilização. **Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR)**, v. 5, p. 20–30, 2010.
- RASIT, N. et al. Effects of lipid inhibition on biogas production of anaerobic digestion from oily effluents and sludges: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 45, p. 351–358, 2015.
- SALAM, B. Biogas from anaerobic digestion of fish waste ICME09-RT-06 BIOGAS FROM ANAEROBIC DIGESTION OF FISH WASTE. n. October, p. 7–10, 2015.
- SALMINEN, E. A.; RINTALA, J. A. Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse waste: Effect of hydraulic retention time and loading. **Water Research**, v. 36, n. 13, p. 3175–3182, 2002.
- SANTIAGO, H. D. S.; SANTIAGO, E. L. G. Potencial energético utilizando a produção de biogás em tratamento de esgoto. **Engineering Sciences**, v. 7, n. 1, p. 73–80, 2019.
- SCHLEY, P. et al. Measurements of the calorific value of methane with the new GERG reference calorimeter. **International Journal of Thermophysics**, v. 31, n. 4–5, p. 665–679, 2010.
- SERRANO, A. et al. Optimization of anaerobic co-digestion of strawberry and fish waste. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 173, n. 6, p. 1391–1404,

2014.

SOETHE, G. C. **APROVEITAMENTO DA MASSA VISCERAL DA TILÁPIA (Oreochromis niloticus) PARA PRODUÇÃO DE BIOGÁS.** [s.l.] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2014.

SONE, A. P. **Tecnologia alternativa para tratamento de efluente proveniente de frigorífico de peixes.** [s.l.] Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2013.

SOUZA, E. G. DE. GERAÇÃO DE BIODIESEL E BIOGÁS A PARTIR DOS RESÍDUOS DO PROCESSAMENTO DE TILÁPIA DO NILO (*Oreochromis niloticus*). **Universidade Federal do Ceará**, v. 0, n. 0, p. 0, 2014.

TEFERA, T. T. Potential for biogas production from slaughter houses residues in Bolivia. **Royal Institute of Technology (KTH)**, v. 1, n. 2, p. 1–2, 2009.

VERSIANI, B. M. Desempenho De Um Reator Uasb Submetido A Diferentes Condições Operacionais Tratando Esgotos Sanitários Do Campus Da Ufrj. p. 78, 2005.

VIDOTTI, R. M. Resíduos Orgânicos Gerados na Piscicultura. n. July, 2016.

ZAPPI, M. E. et al. Evaluation of the methane production potential of catfish processing wastewater using various anaerobic digestion strategies. **Processes**, v. 7, n. 6, 2019.