



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**



**SARA ALMEIDA DE FIGUEIREDO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL FITORREMEIADOR E ENERGÉTICO DA BIOMASSA  
DAS ESPÉCIES *EICHHORNIA CRASSIPES* (AGUAPÉ) E *PISTIA STRATIOTES*  
(ALFACE D'ÁGUA)**

**JOÃO PESSOA - PB**

**2018**

**SARA ALMEIDA DE FIGUEIREDO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL FITORREMEIADOR E ENERGÉTICO DA  
BIOMASSA DAS ESPÉCIES *EICHHORNIA CRASSIPES* (AGUAPÉ) E *PISTIA  
STRATIOTES* (ALFACE D'ÁGUA)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba,  
como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em  
Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e  
Renováveis, área de concentração Meio Ambiente, Economia e  
Aproveitamento Energético, para a obtenção do título de Mestre.

Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa Lopes  
Orientadora

**JOÃO PESSOA - PB**

**2018**

F475a Figueiredo, Sara Almeida de.

Análise do potencial fitorremediador e energético da biomassa das espécies *Eichhornia crassipes* (aguapé) e *Pistia stratiotes* (alface d'água) / Sara Almeida de Figueiredo. - João Pessoa, 2018.

54 f. : il.

Orientação: Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa Lopes.  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR.

1. biomassa. 2. fitorremediação. 3. briquetes. 4. geração de energia. I. Lopes, Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa. II. Título.

UFPB/BC

**SARA ALMEIDA DE FIGUEIREDO**

**ANÁLISE DO POTENCIAL FITORREMEIADOR E ENERGÉTICO DA  
BIOMASSA DAS ESPÉCIES *EICHHORNIA CRASSIPES* (AGUAPÉ) E *PISTIA  
STRATIOTES* (ALFACE D'ÁGUA)**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis, do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração Meio Ambiente, Economia e Aproveitamento Energético, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 24 de Agosto de 2018

Prof. Dr<sup>a</sup> Pollyana Caetano Ribeiro Fernandes  
UFPB  
Examinadora Interna

Prof. Dr<sup>a</sup> Silvia Layara Floriani Andersen  
UFPB  
Examinadora Interna

Prof. Dr<sup>a</sup> Sayonara Andrade Eliziário  
UFPB  
Examinadora Externa

Prof. Dr<sup>a</sup> Riuzuani Michelle Bezerra Pedrosa Lopes  
UFPB  
Orientadora

**JOÃO PESSOA – PB  
2018**

Aos meus pais, dedico este trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, as duas pessoas que, não importando aonde eu for, estarão sempre comigo e eu com eles. Que não medem esforços nem dificuldades pelas duas filhas que tanto amam e protegem, seus eternos bebês. Para eles, não é necessário receber nenhum obrigado e, para mim, não é suficiente dizer-lhes apenas isso. Mas, ainda assim, obrigada por tanto amor.

Agradeço, também, à minha companhia de todas as horas, o meu abuso diário, mas também minha maior incentivadora e a fonte das minhas melhores gargalhadas: minha irmã, Marcela, que sempre faz questão de dizer quanto orgulho sente de mim.

Às minhas primas/irmãs, Luana e Laise, pela fonte eterna de conversas e diversão.

À minha família, por ser sempre a minha base.

Àquelas que estão comigo há muito tempo nessa jornada, as cinco lindas que a escola me presenteou para a vida.

A todos os amigos da UFPB, especialmente às *chicas* do curso de Engenharia Ambiental, por serem até hoje as melhores companheiras em alguns dos meus momentos de mais apherio e de maior felicidade.

À prof<sup>a</sup>. Riuzuani, por ser a orientadora que é, sempre demonstrando apoio e paciência, além da compreensão pelos meus prazos apertados e sonhos loucos de alçar voos mais distantes.

A Elaine e Gláucio, sem os quais esse trabalho teria sido quase impossível, por toda a determinação e motivação para que essa pesquisa se tornasse realidade.

A Alexandre e a Elson, pela disponibilidade, e muita paciência durante as análises.

À prof<sup>a</sup>. Silvia e à prof<sup>a</sup>. Carmen, pelo suporte dado aos experimentos.

A Roberto, por ceder o seu tempo e a sua casa para contribuir com essa pesquisa.

Enfim, a tantas pessoas que participaram da minha trajetória até aqui e que, de alguma forma, me trouxeram onde estou, meu muito obrigada.

*"O homem é a mais insana das espécies. Ele adora um Deus invisível e destrói a natureza visível. Sem saber que essa natureza que ele está destruindo é esse Deus que ele está adorando."*

(Hubert Reeves)

## RESUMO

O aumento da demanda por recursos naturais, destacando-se os energéticos e hídricos, tem aumentado significativamente as pressões antrópicas sobre o meio ambiente. Diversos sistemas de tratamento de água já existem ou vêm sendo desenvolvidos no intuito de amenizar a degradação do meio aquático e facilitar o acesso às reservas hídricas. Existem, no entanto, técnicas simples e naturais - tendo como exemplo a fitorremediação - que usam recursos do próprio meio, e se mostram como importantes complementos ou, até mesmo, alternativas, aos sistemas tradicionais de tratamento de água. Tal método é considerado bastante eficaz e menos dispendioso, em comparação a estes últimos. Diante do exposto, esse trabalho de pesquisa se propôs a testar a efetividade das espécies de macrófitas aquáticas *Eichhornia crassipes* (Aguapé) e *Pistia stratiotes* (Alface d'Água) no processo de fitorremediação, através de análises físico-químicas da sua água de cultivo, sendo esta proveniente do rio Jaguaribe, João Pessoa – PB. Ademais, foi avaliado, também, o uso posterior dessas espécies como fonte de geração de energia por meio da sua queima na forma de briquetes, com análises da sua composição imediata, poder calorífico e análise termogravimétrica em atmosfera de Nitrogênio. Os resultados obtidos demonstram uma elevada capacidade remediadora das espécies estudadas, especialmente em termos de remoção de coliformes totais e termotolerantes, para os quais a eficiência alcançada foi de 99,72% para as duas espécies. Quanto às características energéticas, os valores obtidos para o poder calorífico, de 14,382 MJ/kg (Aguapé) e 14,185 MJ/kg (Alface d'Água), encontram-se levemente abaixo do estabelecido pela norma europeia, estando, no entanto, muito próximos aos valores observados para a lenha, para a qual os briquetes de biomassa aquática são vistos como potenciais substitutos. O aguapé se destacou com poder calorífico e capacidade fitorremediadora ligeiramente superiores aos da alface d'água, enquanto esta última apresentou maior taxa de produção de biomassa. Com estes resultados é possível dar uma destinação adequada à biomassa excedente do processo de fitorremediação do rio Jaguaribe, ao mesmo tempo em que se produz energia de forma limpa e renovável.

**PALAVRAS-CHAVE:** biomassa, fitorremediação, briquetes, geração de energia.



## ABSTRACT

The increased demand for natural resources, especially energy and water, has expanded the pressures on the environment. Several water treatment systems already exist or have been developed in order to reduce degradation of the aquatic ecosystem and facilitate the access to water reserves. There are, however, simple and natural techniques - such as phytoremediation - that use resources from the environment itself, which have proved to be important complements, or even alternatives, to the traditional water treatment systems and which have been considered to be quite effective and less expensive in comparison to the latter. Regarding that, this study intended to test the efficacy of the aquatic macrophytes species *Eichhornia crassipes* (water hyacinth) and *Pistia stratiotes* (water lettuce) in the phytoremediation process, through physicochemical analyzes of their culture water, obtained from the Jaguaribe River, located in the urban zone of João Pessoa - PB. In addition, it was evaluated the later use of these species as a source of energy through its burning in the form of briquettes, with analyzes of its immediate composition, calorific value and thermal analysis using Nitrogen atmosphere. The results indicate a high remedial capacity of the studied species, especially in terms of removal of total and thermotolerant coliforms, for which the efficiency reached was 99.72% for both species. Regarding their energetic characteristics, the values obtained for the calorific value, of 14,382 MJ/kg (water hyacinth) and 14.185 MJ/kg (water lettuce) are slightly below the European standard, but very close to the values observed for firewood, for which the aquatic biomass briquettes are considered as potential substitutes. The water hyacinth stood out with a calorific value and phytoremediation capacity slightly superior to those of the water lettuce, while the latter presented higher rate of biomass production. With these results it is possible to give adequate allocation to the surplus biomass from the Jaguaribe river's eutrophication process, while producing energy in a clean and renewable way.

**KEY-WORDS:** biomass, phytoremediation, briquettes, energy production.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Processos de conversão energética da biomassa de acordo com sua fonte de origem. ....	17
<b>Figura 2</b> - Capacidade instalada mundial para a bioenergia no período de 2007 a 2017. ....	18
<b>Figura 3</b> - Principais matérias-primas usadas na fabricação de briquetes no Brasil. ....	19
<b>Figura 4</b> - Comparativo da produtividade de diferentes culturas de biodiesel. ....	21
<b>Figura 5</b> - Percentual dos principais insumos utilizados na produção de biodiesel no Brasil em 2016. ....	21
<b>Figura 6</b> - Desenho esquemático da <i>Eichhornia crassipes</i> (aguapé) e exemplar real da espécie. ....	25
<b>Figura 7</b> - Desenho esquemático da <i>Pistia Stratiotes</i> (alface d'água) e exemplar real da espécie. ....	26
<b>Figura 8</b> - Situação atual do rio Jaguaribe devido aos processos de poluição e eutrofização. ....	27
<b>Figura 9</b> - Localização cartográfica do ponto de coleta das amostras de água do rio Jaguaribe, localizado na cidade de João Pessoa – PB. ....	28
<b>Figura 10</b> - Tanque de alvenaria utilizado para o cultivo das espécies. ....	29
<b>Figura 11</b> - Exemplares dos briquetes produzidos para as duas espécies de macrófitas aquáticas. ....	32
<b>Figura 12</b> - Prensa de fabricação própria utilizada na produção dos briquetes. ....	33
<b>Figura 13</b> - Ocupação final do tanque de cultivo do aguapé. ....	34
<b>Figura 14</b> - Ocupação final do tanque de cultivo da alface d'água. ....	35
<b>Figura 15</b> - Evolução dos níveis de turbidez da água durante o período de cultivo das macrófitas. ....	37
<b>Figura 16</b> - Evolução dos valores de DBO da água durante o período de cultivo das macrófitas. ....	38
<b>Figura 17</b> - Evolução da presença de bactérias heterotróficas na água durante o período de cultivo das macrófitas. ....	39
<b>Figura 18</b> - Evolução da presença de coliformes totais na água durante o período de cultivo das macrófitas. ....	40

<b>Figura 19</b> - Evolução da presença de coliformes termotolerantes na água durante o período de cultivo das macrófitas.....	40
<b>Figura 20</b> - Curva termogravimétrica (TGA) e da derivada termogravimétrica (DTG) da pirólise do aguapé.....	46
<b>Figura 21</b> - Curva termogravimétrica (TGA) e da derivada termogravimétrica (DTG) da pirólise da alface d'água.....	47

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Peso inicial e final da biomassa obtida para cada espécie de macrófita aquática.....	34
<b>Tabela 2</b> - Variação do pH para as amostras da água de cultivo do Aguapé e da Alface d'Água, e para a amostra de controle.....	35
<b>Tabela 3</b> - Variação da temperatura para as amostras da água de cultivo do Aguapé e da Alface d'Água, e para amostra de controle.....	36
<b>Tabela 4</b> - Eficiência na fitorremediação para as amostras da água de cultivo do Aguapé e da Alface d'Água, e para a amostra de controle. ....	42
<b>Tabela 5</b> - Teor de umidade encontrado para o Aguapé e a Alface d'Água após a sua colheita. ....	43
<b>Tabela 6</b> - Análise da composição imediata dos briquetes fabricados a partir da biomassa do Aguapé e da Alface d'Água.....	44
<b>Tabela 7</b> - Poder calorífico encontrado para os briquetes fabricados a partir da biomassa do Aguapé e da Alface d'Água.....	45

## LISTA DE SIGLAS

ASTM	American Society for Testing and Materials
BNE	Balanco Energético Nacional
CEAR	Centro de Energias Alternativas e Renováveis
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CT	Centro de Tecnologia
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
IRENA	International Renewable Energy Agency
LabMaQ	Laboratório de Materiais e Química Ambiental
Labsan	Laboratório de Saneamento
LCA	Laboratório de Carvão Ativado
PCS	Poder Calorífico Superior
PNPB	Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel
Proálcool	Programa Nacional do Alcool
tep	toneladas equivalentes de petróleo
TGA	Curva Termogravimétrica
DTG	Curva da Derivada Termogravimétrica
UFPB	Universidade Federal da Paraíba

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	13
1.1. Objetivos .....	16
1.1.1. Objetivo Geral.....	16
1.1.2. Objetivos Específicos .....	16
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	16
2.1. Biomassa como Fonte de Energia .....	16
2.1.1. Briquetes.....	18
2.2. Algas como Recurso Energético .....	20
2.3. O Processo de Fitorremediação .....	22
2.3.1. Macrófitas Aquáticas em Estudo.....	24
2.4. O Rio Jaguaribe .....	26
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	28
3.1. Caracterização da Água de Cultivo .....	28
3.2. Espécies Cultivadas .....	28
3.3. Condições de Cultivo .....	29
3.4. Procedimentos Experimentais.....	30
3.4.1. Acompanhamento do Crescimento Vegetativo .....	30
3.4.2. Análises Físico-químicas da Água de Cultivo.....	30
3.4.3. Verificação do Potencial Energético.....	31
3.4.4. Processo de Fabricação dos Briquetes.....	32
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	33
4.1. Crescimento vegetativo e qualidade da água de cultivo .....	33
4.2. Análise imediata e potencial energético.....	43
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	48
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	49
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	50

## 1. INTRODUÇÃO

O solo e a água foram o destino principal dos resíduos e efluentes humanos durante grande parte da história da nossa civilização. À medida que novos conhecimentos foram sendo desenvolvidos, maneiras mais adequadas para o tratamento e destinação de resíduos, bem como sistemas de esgotamento sanitário e de tratamento de efluentes, passaram a ser adotados em quase todo o mundo.

Entretanto, o processo acelerado de urbanização em algumas regiões e, ainda, o atraso tecnológico que persiste em muitos lugares, tem provocado um aumento das pressões humanas sobre o meio ambiente, com o surgimento de novos e variados tipos de poluentes, que põem em risco o equilíbrio dos meios terrestre e aquático, em especial. Nessa situação é que se encontra inserido atualmente o rio Jaguaribe, principal rio urbano da cidade de João Pessoa (PB), e para o qual as atenções devem ser voltadas, no intuito de recuperar suas características e importância originais (SANTOS et al., 2016).

Ademais de medidas preventivas, que devem ser empregadas, se apresentam como uma possibilidade de mitigação dos impactos adversos ocasionados pelo homem à natureza, as técnicas de remediação de áreas contaminadas, destacando-se, entre elas, a fitorremediação da água e de efluentes líquidos pelo uso de macrófitas aquáticas.

As macrófitas aquáticas, ou macroalgas, são caracterizadas como plantas que se desenvolvem em água ou em solos saturados de água, tendo como exemplos bem conhecidos as espécies *Eichhornia crassipes* (aguapé) e *Pistia stratiotes* (alface d'água), comumente usadas como agentes fitorremediadores, para o tratamento de água e efluentes, devido à sua elevada taxa de multiplicação e boa absorção de poluentes (LIAO; CHANG, 2004; SWAIN; ADHIKARI; MOHANTY, 2014).

No entanto, considerando a elevada taxa de proliferação dessas plantas, associada a uma estrutura de folhas que formam camadas espessas na superfície do corpo d'água, as macrófitas aquáticas podem se tornar um problema, levando a processos de eutrofização. Estes se caracterizam como o bloqueio da entrada de luz e das trocas gasosas e de nutrientes no corpo aquático, levando à morte dos organismos que ali habitam.

Além do supracitado, Oliveira Júnior (2011) menciona como efeitos negativos dessa proliferação excessiva o acúmulo de lixo e sedimentos, um aumento da presença de animais vetores de doenças, além de inconvenientes para atividades como navegação, pesca e turismo. Assim, a busca por alternativas para controlar a multiplicação excessiva de macrófitas aquáticas é essencial, tanto nos casos em que estas ocorrem naturalmente no ambiente aquático, quanto nas ocasiões em que são empregadas nos processos de fitorremediação.

Uma alternativa a ser destacada é o uso dessas plantas como fonte de energia, seja pela queima direta de sua biomassa ou pela produção de gases e óleos a serem utilizados como biocombustíveis (ANDERSSON et al., 2014). Do ponto de vista ambiental, esta opção é muito favorável, uma vez que a produção de combustíveis derivados da biomassa elimina alguns dos principais problemas relacionados ao uso de fontes fósseis, como seu alto potencial de poluição e disponibilidade limitada.

A biomassa, principalmente na forma de lenha para aquecimento ou para cozinhar alimentos, se caracterizou como o principal recurso energético da humanidade até o século XIX, quando a Revolução Industrial modificou os padrões de consumo da nossa civilização e a colocou em segundo plano no mercado energético mundial. Entretanto, questões como o esgotamento dos combustíveis fósseis e seus prejuízos ao meio ambiente, vem trazendo, desde o século XX, novas perspectivas sobre as fontes renováveis de energia e, entre elas, a biomassa.

Diferente dos tempos primitivos, quando o aproveitamento dessa fonte de energia ocorria basicamente pela combustão direta e geração de calor, atualmente são inúmeras as formas de aproveitamento da biomassa, como a produção de álcool, por exemplo, que se destacou no país a partir de 1975, com a criação do Programa Nacional do Álcool (Proálcool). Nesse período, a cana-de-açúcar voltou a ocupar uma posição de destaque na economia nacional, se tornando uma promessa de independência energética e elevando o Brasil ao patamar de pioneiro na produção de biocombustíveis.

Essa versatilidade transforma a biomassa em uma das principais soluções técnicas para os problemas relacionados à produção de energia, como destacam Goldemberg e Lucon (2008), de modo que sua participação na matriz energética mundial é cada vez maior e com previsões de ainda mais crescimento nos próximos anos (PANWAR; KAUSHIK; KOTHARI, 2011).



Além dessa diversidade de formas para o seu aproveitamento energético, um fator importante a ser considerado é a viabilidade econômica do material a ser usado como biocombustível que, no caso dos combustíveis sólidos, pode ser determinada pelo estudo do seu poder calorífico. Este último refere-se à energia que a biomassa, ou outro material energético, é capaz de fornecer após ser submetida a um determinado processo de conversão. Esses processos, ou rotas de conversão, podem ser divididos em:

- Rotas de Conversão Bioquímica: nesta, estão inseridos os processos de digestão anaeróbica, para a produção de biogás, e os processos de fermentação/destilação e hidrólise, por meio dos quais são produzidos combustíveis líquidos, como o etanol (CARDOSO, 2012).

- Rota de Conversão Físico-química: neste processo é utilizado o mecanismo da transesterificação, que consiste na reação química entre alcoóis e uma base, produzindo o biodiesel (BRASIL, 2002).

- Rotas de Conversão Termoquímica: neste último processo estão incluídos os mecanismos da combustão direta, quando a biomassa é diretamente queimada em caldeiras para a produção de energia através do vapor, ou no seu uso mais simples, como em fogões, por exemplo; da gaseificação, onde a biomassa sólida é convertida em gás, gerando um combustível mais limpo e versátil que aquele proveniente da combustão direta, o qual pode ser empregado em turbinas e motores a gás ou, ainda, na síntese de hidrocarbonetos, que podem ser usados diretamente como combustíveis ou como fonte de hidrogênio em células a combustível (BRASIL, 2002); e da pirólise, quando a biomassa é aquecida em condições quase anaeróbias até que o material volátil seja liberado. A matéria residual é o que dá origem, então, ao produto combustível, geralmente carvão, de maior densidade e poder calorífico que a biomassa de origem (BRASIL, 2002).

Desta forma, a proposta deste trabalho foi de avaliar a capacidade fitorremediadora do aguapé e da alface d'água, aliada ao potencial de aproveitamento energético da sua biomassa, quando submetida ao processo de combustão na forma de briquetes.

## **1.1. Objetivos**

### **1.1.1. Objetivo Geral**

Avaliar a capacidade fitorremediadora das espécies de macrófitas aquáticas *Eichhornia crassipes* (Aguapé) e *Pistia Stratiotes* (Alface d'água), bem como o potencial energético da sua biomassa.

### **1.1.2. Objetivos Específicos**

- Verificar se as espécies apresentam boa capacidade de fitoextração;
- Analisar a evolução da qualidade da água do rio Jaguaribe usada para o cultivo das macrófitas;
- Determinar o potencial de utilização da biomassa das espécies estudadas como fonte de geração de energia, por meio da sua combustão na forma de briquetes;
- Fornecer uma opção adequada para o aproveitamento dessa biomassa, eliminando os problemas relacionados à sua proliferação excessiva quando usada em processos de fitorremediação.

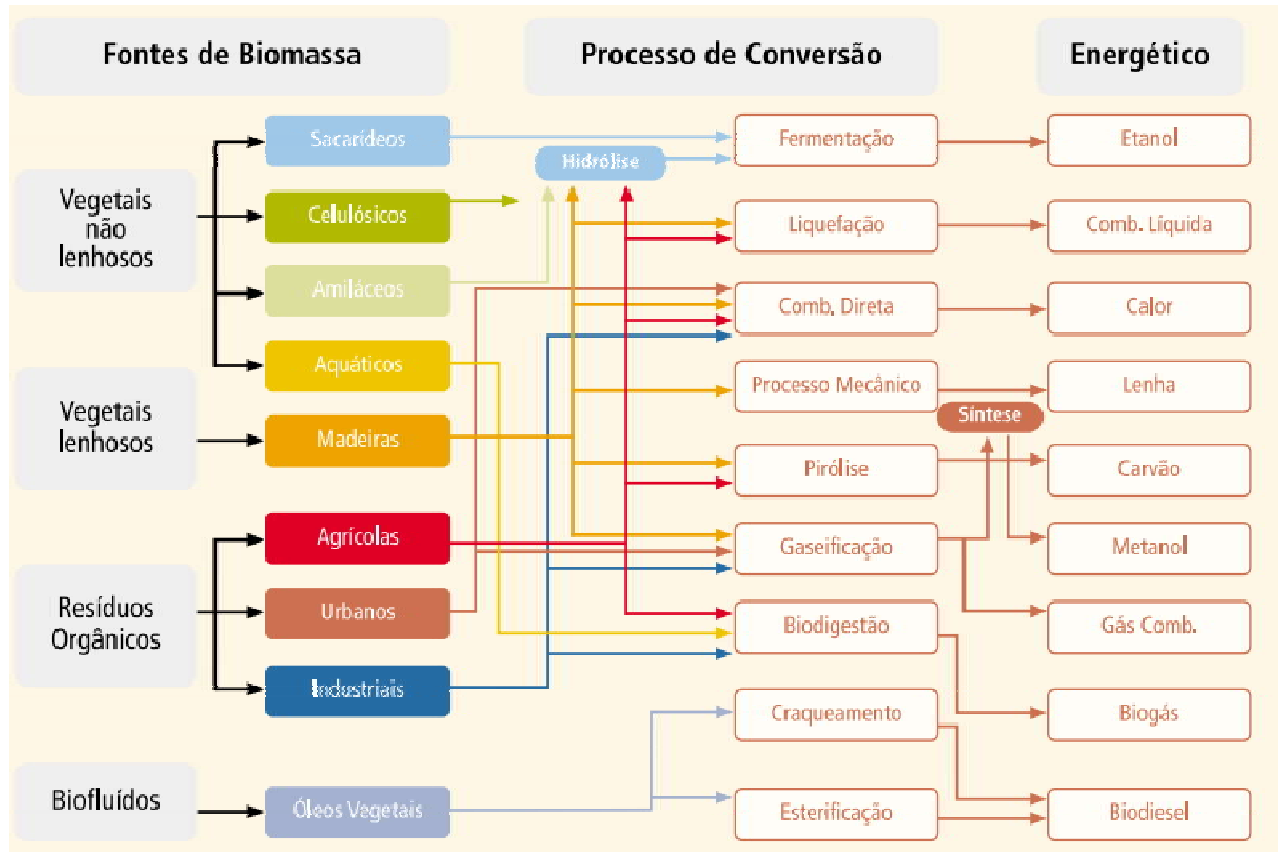
## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1. Biomassa como Fonte de Energia**

A biomassa a ser utilizada como recurso energético pode se diferenciar de acordo com a sua origem (PEREIRA, 2015), qual seja: natural, quando a biomassa não sofreu intervenção humana, tendo sido gerada diretamente pela natureza; residual, que deriva dos descartes produzidos nos centros urbanos e pela agroindústria; e de plantações energéticas, onde a biomassa é cultivada no intuito de gerar energia.

O tipo de rota de conversão a ser empregada dependerá, principalmente, das características dessa biomassa (FIGURA 1), podendo ela ser classificada como: vegetal não lenhoso, sendo este o caso das macrófitas aquáticas; vegetal lenhoso, como as madeiras; resíduos orgânicos, já mencionados como sendo resultado dos

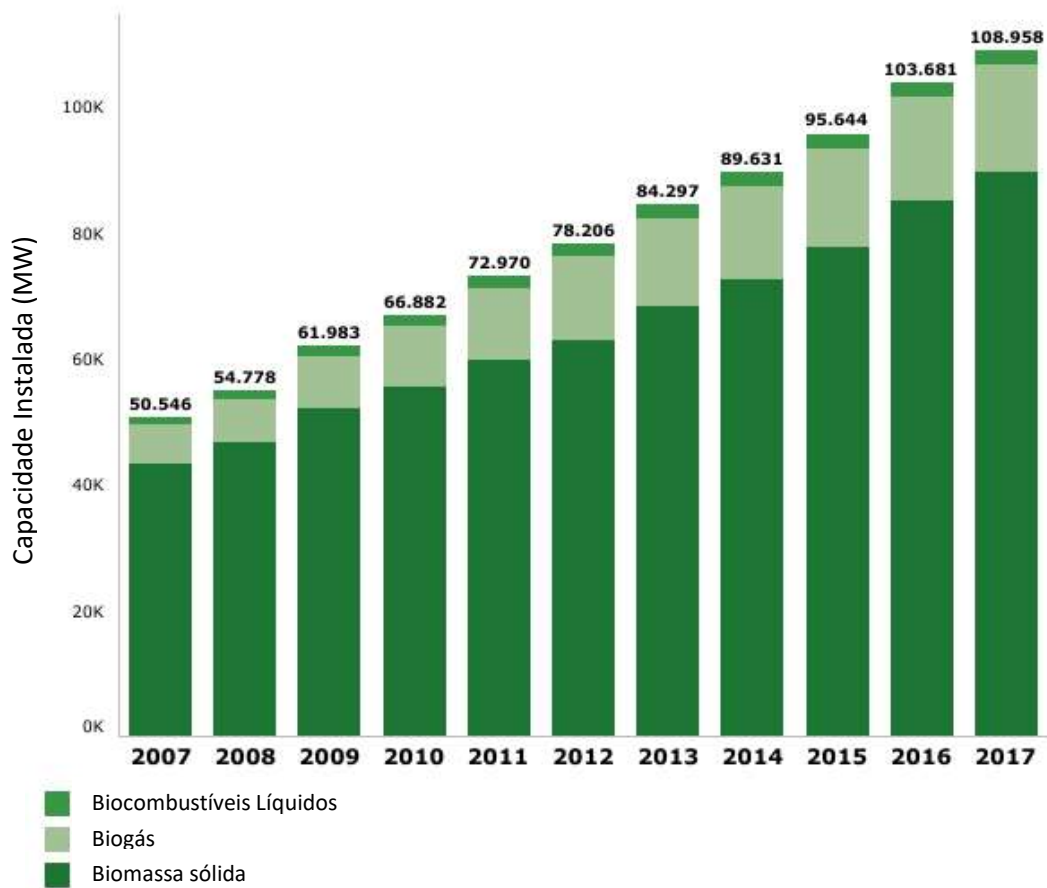
descartes gerados por algumas atividades humanas; e os biofluidos, que representam os óleos vegetais (BRASIL, 2002).



**Figura 1** - Processos de conversão energética da biomassa de acordo com sua fonte de origem.

**Fonte:** Adaptado de BRASIL, 2002.

A variabilidade das fontes de biomassa que podem ser aproveitadas, bem como dos processos para a sua conversão e dos produtos finais a serem obtidos, alavancaram a capacidade instalada mundial dessa fonte energética, com crescimento de mais de 100% nos últimos 10 anos (FIGURA 2) (IRENA, 2018)



**Figura 2** - Capacidade instalada mundial para a bioenergia no período de 2007 a 2017.

**Fonte:** IRENA, 2018

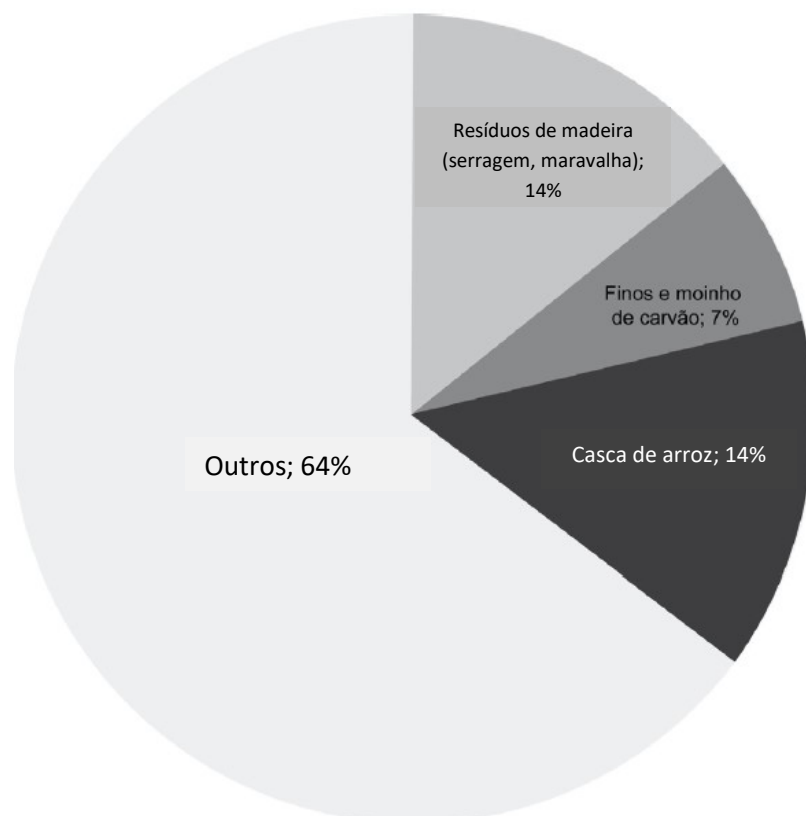
O reaproveitamento da biomassa na forma de bioprodutos, como os briquetes, por exemplo, se apresenta como um adicional de sustentabilidade no uso dessa fonte de energia renovável, uma vez que os bioprodutos se caracterizam como biomassa residual oriunda dos diversos setores da sociedade, principalmente a agroindústria, para a qual inicialmente não havia destinação definida.

### 2.1.1. Briquetes

O processo denominado de briquetagem tem a capacidade de melhorar as propriedades dos resíduos submetidos a ele, uma vez que o material energético é triturado, compactado e concentrado – processo esse chamado de Densificação (PEREIRA, 2015) – formando os blocos denominados briquetes. Estes apresentam maior poder calorífico que os resíduos no seu estado original, armazenando maior

energia em menos volume. Com a redução de volume podendo ser de até 11 vezes, quando comparado ao da biomassa original, esse processo apresenta vantagens também em relação à facilidade e eficiência no transporte desses materiais (DIAS *et al.*, 2012, SILVA; CARNEIRO; LOPES, 2017).

Um estudo feito por Dias *et al.* (2012) afirma que, apesar dos primeiros briquetes terem sido produzidos já no século XIX, nos Estados Unidos, 72% das empresas fabricantes do Brasil surgiram somente a partir dos anos 2000. Esse crescimento recente é explicado, principalmente, pelo aumento na demanda por fontes alternativas de energia, em substituição ao petróleo e à lenha. Ainda de acordo com o mesmo estudo, 80% dessas empresas estão localizadas nas regiões Sul e Sudeste, estando essa distribuição geográfica relacionada às principais matérias-primas usadas atualmente no Brasil para a produção de briquetes (FIGURA 3).



**Figura 3** - Principais matérias-primas usadas na fabricação de briquetes no Brasil. Fonte: DIAS *et al.*, 2012.

A localização geográfica é um fator determinante na escolha da matéria-prima para a produção dos briquetes, uma vez que o transporte da biomassa do local de

coleta ao de fabricação pode representar um importante percentual do custo desse biocombustível. Entre outros fatores que influenciam o preço final do produto, estão os mecanismos de cultivo, coleta e tratamento da biomassa a ser usada na produção, como mencionam Munjeri *et al.* (2016).

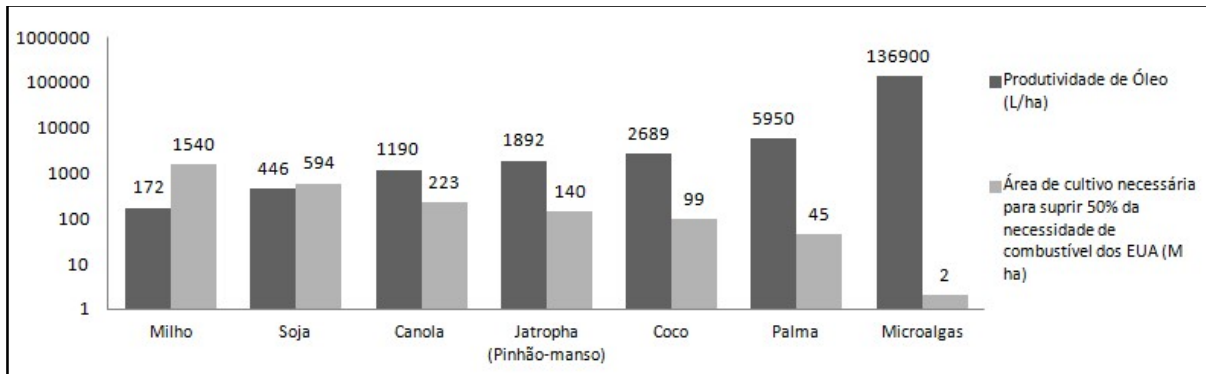
Ademais, para fabricar um briquete de qualidade e competitivo no mercado, é necessário considerar algumas características como, por exemplo, o teor de umidade e o poder calorífico obtido com o produto final. Rezania *et al.* (2016) atestam em seu estudo que teores entre 10% e 15% de umidade são preferíveis, uma vez que valores mais altos representam maior gasto de energia para a evaporação da água presente nos blocos. Além disso, os mesmo autores consideraram o poder calorífico de 17.17 MJ/Kg, obtido em sua pesquisa, como um valor mediano aceitável para um bio-briquete, estando próximo ao valor médio encontrado para a lenha e não muito abaixo do referente ao carvão (MUNJERI *et al.*, 2016).

## **2.2. Algas como Recurso Energético**

Em 2005, foi regulamentado o Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB), com o objetivo de organizar e impulsionar a produção desse bio-óleo (GALVÃO *et al.*, 2016). A partir daí cresceram os incentivos aos seus principais insumos, sendo o primeiro deles a soja. Entretanto, a difusão das plantações de soja incitou questionamentos a respeito da sustentabilidade do biodiesel produzido a partir desse grão, devido aos prejuízos ambientais causados pela prática da monocultura, além dos conflitos sobre o uso da terra entre as plantações destinadas à produção energética e à produção de alimentos.

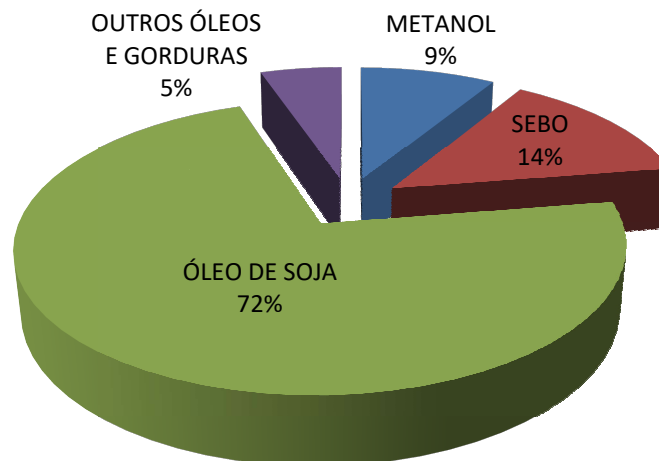
Esses fatores trouxeram à tona a necessidade de se buscar opções diversas para a obtenção de óleo vegetal, destacando-se, entre elas, o óleo obtido a partir de algas. Dentre as vantagens observadas no uso destas últimas, pode-se mencionar a baixa demanda por áreas do cultivo, a ausência de sazonalidade na sua produção quando se trata de climas tropicais como o do Brasil e maior eficiência fotossintética em relação à biomassa terrestre (ARESTA; DIBENEDETTO; BARBERIO, 2005). Todos esses fatores fazem com que a produtividade de óleo por hectare cultivado de

microalgas, por exemplo, chegue a ser até 99% maior que a de grãos como a soja (CHIST, 2007) (FIGURA 4).



**Figura 4** - Comparativo da produtividade de diferentes culturas de biodiesel. **Fonte:** Figueiredo; Barbosa; Lopes, 2017, adaptado de Chist, 2007.

Ainda assim, dados do Balanço Energético Nacional (BNE), mostram que em 2016 a soja ainda representou 72% dos insumos consumidos para a obtenção de biodiesel no Brasil (BNE, 2017) (FIGURA 5).



**Figura 5** - Percentual dos principais insumos utilizados na produção de biodiesel no Brasil em 2016.

**Fonte:** Figueiredo; Barbosa; Lopes, 2017, adaptado de BNE, 2017.

À parte disso, são diversas as possibilidades de obtenção energética a partir desses organismos, como a produção de biogás, gás de síntese (syngas), briquetes para combustão direta, etanol celulósico, entre outros (FAVARO; MIRANDA, 2013). Entretanto, algumas dificuldades ainda são observadas para que as algas se

estabeleçam como fonte de geração de energia, entre elas, o alto custo de cultivo e o elevado consumo de água e nutrientes, em se tratando de microalgas. Em relação às macrófitas, a principal barreira identificada é o fato de sua ocorrência natural ter origem em fontes dispersas, dificultando a sua obtenção e fornecimento em escala industrial (FIGUEIREDO; BARBOSA; LOPES, 2017).

Como possível solução para essas dificuldades, o uso de algas para o tratamento de efluentes vem ganhando destaque, uma vez que permite a produção em grande escala desses organismos, eliminando a necessidade de água e nutrientes, ao mesmo tempo em que simplifica o tratamento desses rejeitos. A obtenção de algas que se desenvolvem naturalmente em rios e regiões pantanosas se torna, então, mais um adicional a essa produção.

Munjeri et al. (2016) sugeriram, ademais, o uso de algas para a fabricação de briquetes por comunidades ribeirinhas, cujas vidas são afetadas pela proliferação excessiva dessas espécies aquáticas. Além de não possuírem acesso a sistemas convencionais de aquecimento, sendo adeptas ainda ao uso da lenha, as comunidades estudadas pelos autores sofrem também com problemas relacionados à eutrofização do rio que margeiam. Os bio-briquetes à base de algas são propostos, então, como uma possível solução a essas duas questões, acrescentando um caráter social ao uso desses biocombustíveis.

### **2.3. O Processo de Fitorremediação**

Incluído no conceito de ecologia industrial – em que os processos industriais se desenvolvem em ciclos fechados com reaproveitamento de recursos e energia, seguindo o modelo e a eficiência dos sistemas naturais (COLE; NYS; PAUL, 2014) – o uso de espécies vegetais para o tratamento de solo, água ou efluentes, denominado de fitorremediação, tem se destacado como uma tecnologia limpa e eficiente na remediação de áreas contaminadas.

O conceito de Remediação é dado pela Resolução CONAMA 420/2009 como sendo “uma das ações de intervenção para reabilitação de área contaminada, que consiste em aplicação de técnicas, visando à remoção, contenção ou redução das concentrações de contaminantes”.

A técnica a ser aplicada nesse processo dependerá de diversos fatores, como mencionam Cardoso, Lodi e Barros (2017), entre eles as características do



contaminante e da área contaminada, além de quais recursos técnicos estão disponíveis. Dentre as principais técnicas existentes para remediação do solo e da água, Lima *et al.* (2017) cita as barreiras passivas, reativas e de contenção; a oxidação química; o tratamento térmico; o bombeamento de águas subterrâneas; a injeção de ar; e a extração de vapores.

Além disso, o mesmo autor menciona, também, alguns processos naturais de remediação de áreas contaminadas, como a atenuação natural controlada, em que são usados processos existentes na própria área afetada para redução da concentração de contaminantes; a biorremediação, onde bactérias e fungos, nativos ou exóticos, são empregados como agentes de degradação dos compostos contaminantes; e a fitorremediação.

Nesse último, o vegetal – que atua como agente remediador - pode empregar diferentes mecanismos para realizar a descontaminação (ANDRADE; TAVARES; MAHLER, 2007): na Fitoextração, os poluentes presentes no meio são absorvidos e armazenados no tecido vegetal; na Fitodegradação, o poluente passa por processos metabólicos no interior da planta, transformando-se em formas menos tóxicas; no mecanismo de Fitovolatilização, o poluente é absorvido e volatilizado, sendo, então, liberado na atmosfera; na Fitoestimulação, a atividade de biodegradação microbiana é estimulada pela presença dos vegetais; e na Fitoestabilização o vegetal promove a lignificação ou humificação do poluente.

Para o tratamento da água e de efluentes líquidos, especificamente, são empregadas diversas espécies de macrófitas aquáticas, e a espécie escolhida determinará o tipo de sistema de tratamento (ANDRADE; TAVARES; MAHLER, 2007). Nos sistemas baseados em macrófitas aquáticas flutuantes, são utilizadas espécies cujo tecido vegetal permanece flutuando na superfície do corpo hídrico, enquanto suas longas raízes podem estar livres ou enraizadas, dependendo da profundidade do meio. Nos sistemas baseados em macrófitas submersas, os tecidos vegetais da planta ficam imersos pelo corpo hídrico. E nos sistemas baseados em macrófitas aquáticas emergentes, por sua vez, é feita uma combinação dos diferentes sistemas mencionados.

Freqüentemente, as macrófitas que se proliferam nos ambientes aquáticos são tidas como “pragas”, devido a sua alta taxa de reprodução. Em condições ótimas, a produção do aguapé, por exemplo, pode atingir 15 toneladas de biomassa úmida ao dia por hectare (ANDRADE; TAVARES; MAHLER, 2007). Apesar de

atuarem no processo de purificação da água, quando presentes em excesso, essas plantas podem diminuir a entrada de luz, bem como a disponibilidade de oxigênio no corpo hídrico, prejudicando a biodiversidade do meio. Esse processo, chamado de eutrofização, pode ser evitado se forem empregadas técnicas de controle da produtividade dessas algas. Dentre as possibilidades existentes, se destaca o aproveitamento dessa biomassa para a produção energética, como se propõe nesta pesquisa.

Dentre as diversas espécies conhecidas de macrófitas aquáticas fitorremediadoras, a *Eichhornia crassipes* (aguapé) e a *Pistia Stratiotes* (alface d'água) se destacam por suas altas taxas de reprodução, tendo se tornado espécies invasoras em diversas regiões do mundo (HONGJIE *et al.*, 2016, MUNJERI *et al.*, 2016). Essas duas espécies de macroalgas (macrófitas) aquáticas servirão de base para este estudo, e suas características principais são descritas a seguir.

### **2.3.1. Macrófitas Aquáticas em Estudo**

O aguapé (FIGURA 6), pertencente à família *Pontederiaceae* e ao gênero *Eichhornia*, é uma das espécies de macroalgas de ocorrência mais frequente em ambientes aquáticos eutrofizados, sendo nativa do Brasil, com origem na região Amazônica, e eficiência comprovada no tratamento de efluentes agrícolas e industriais (PEREIRA, 2010, SILVA *et al.*, 2014). Essa espécie é caracterizada como aquática flutuante e possui alta capacidade de multiplicação devido, principalmente, ao seu elevado potencial de fitorremediação (CAMPOS *et al.*, 2013).



**Figura 6** - Desenho esquemático da *Eichhornia crassipes* (aguapé) e exemplar real da espécie. **Fonte:** Biodiversity Heritage Library, 1824-32, Autora, 2018.

Diferentes autores (PATEL, 2012, BARBOSA *et al.*, 2017) relatam a elevada eficiência dessa espécie na desinfecção da água, além de melhorias relacionadas aos níveis de turbidez, DBO e ao pH.

Assim como o aguapé, a alface d'água (FIGURA 7) também se caracteriza como uma espécie de macrófita aquática flutuante. A espécie, originária do continente africano, da família *Araceae* e do gênero *Pistia*, tem sido testada com eficiência no tratamento de diferentes tipos de efluentes, bem como no reaproveitamento energético para a produção de biogás, por exemplo (ROBLES-PLIEGO *et al.*, 2015).

Zimmels, Kirzhner e Malkovskaja (2006) atestam, em seu estudo, o alto desempenho da alface d'água na melhoria de parâmetros como DBO e turbidez, no tratamento de efluentes líquidos, por exemplo.



**Figura 7** - Desenho esquemático da *Pistia Stratiotes* (alface d'água) e exemplar real da espécie. **Fonte:** Lemaire *et al.*, 1851, A autora, 2018.

Seu desenvolvimento ocorre principalmente em temperaturas entre 17°C a 30°C e pH entre 6,0 e 7,5, condições nas quais pode chegar a formar densas camadas na superfície da água (OLIVEIRA JÚNIOR, 2011).

Diversos autores (AKINBILE; YUSOFF, 2012, YASAR *et al.*, 2013, BUTA *et al.*, 2014, HONGJIE *et al.*, 2016) destacam também a eficiência que ambas as espécies apresentam em relação à remoção de metais pesados e nutrientes em ambientes aquáticos.

## 2.4. O Rio Jaguaribe

Com seus 21 km de extensão, o rio Jaguaribe se caracteriza como o principal rio urbano da cidade de João Pessoa. De acordo com Dieb e Martins (2017), na sua bacia hidrográfica estão inseridos 32 dos 64 bairros da capital paraibana, além de 41 assentamentos não planejados, constituindo uma área de drenagem de aproximadamente 4.824,52 ha dentro do município.

Por um longo período, esse rio permaneceu preservado dos impactos da atividade humana. No entanto, a intensificação expressiva do processo de urbanização ocorrida nas décadas de 1960 e 1970 levou a cidade ao encontro dele, modificando enormemente o seu entorno (DIEB; MARTINS, 2017). Atualmente, o

Jaguaribe sofre com problemas de erosão, assoreamento, além de altos índices de impermeabilização do solo na região da bacia hidrográfica, o que gera enchentes e inundações. Ademais, são observados altos níveis de poluição nas suas águas, que, em decorrência disso, sofrem com um elevado processo de eutrofização (SANTOS et al., 2016) (FIGURA 8).



**Figura 8** - Situação atual do rio Jaguaribe devido aos processos de poluição e eutrofização. **Fonte:** Autora, 2018.

Segundo Fernandes *et al.* (2017) o rio Jaguaribe é afetado por lançamentos diretos e indiretos de lixo e esgotos domésticos sem tratamento, o que vem prejudicando também a qualidade da água nas praias do Bessa (município de João Pessoa) e Intermares (município de Cabedelo), onde ele deságua. Ademais, Costa e Dantas (2011) relatam a presença de grande variedade de macrófitas aquáticas flutuantes nas águas desse rio, com destaque para a família *Pontederiaceae*, à qual pertence o aguapé, confirmando, assim, o seu estado de eutrofização.

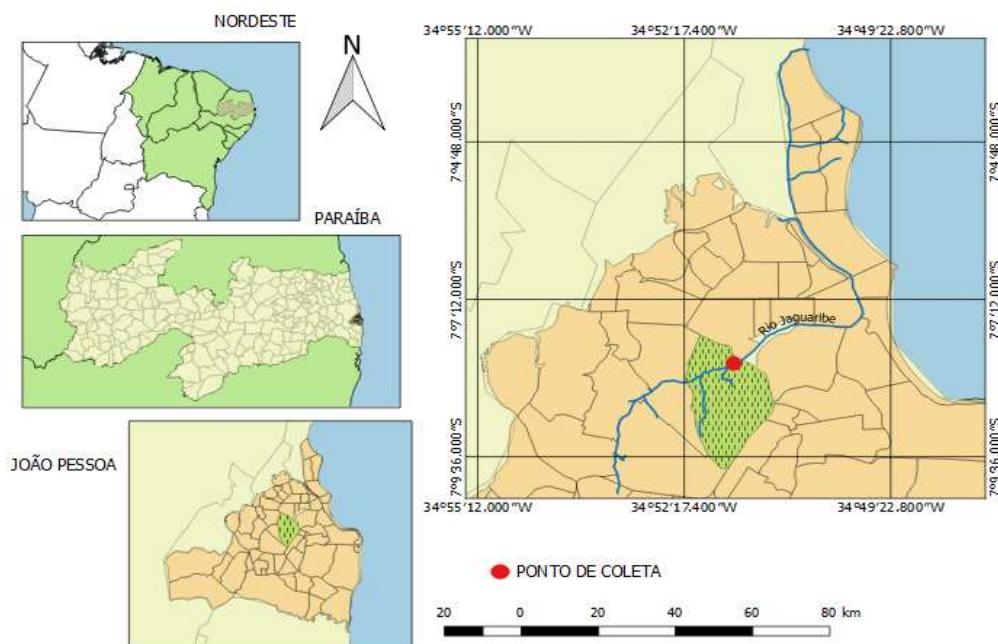
Tendo em vista as pressões do entorno exercidas sobre o ecossistema aquático mencionado, com elevado potencial de degradação da sua qualidade, considerando também a sua importância e expressividade local, as águas do rio Jaguaribe se configuram como de interesse para a realização de estudos envolvendo a qualidade dos recursos hídricos, sendo este o caso desta pesquisa.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Caracterização da Água de Cultivo

A água utilizada para o cultivo das macrófitas foi coletada do rio Jaguaribe através de um carro pipa com capacidade para o armazenamento de 10000 L sendo, então, conduzida ao município do Conde, onde foram construídos os tanques para o cultivo das algas.

O trecho do rio localizado dentro do Jardim Botânico Benjamim Maranhão (Mata do Buraquinho), foi o escolhido para a coleta da água devido à facilidade e segurança no acesso ao local. O ponto de coleta das amostras de água utilizadas no cultivo das macrófitas é mostrado a seguir (FIGURA 9).



**Figura 9** - Localização cartográfica do ponto de coleta das amostras de água do rio Jaguaribe, localizado na cidade de João Pessoa – PB. **Fonte:** Autora, 2017.

#### 3.2. Espécies Cultivadas

Essa pesquisa adotou, como base de estudos dos potenciais de fitorremediação e de produção energética, duas espécies de macrófitas aquáticas, quais sejam, *Eichhornia crassipes* (aguapé) e *Pistia Stratiotes* (alface d'água). A

escolha dessas espécies foi feita com base nas suas altas taxas de crescimento e produtividade, já mencionadas anteriormente.

### 3.3. Condições de Cultivo

As espécies de macrófitas aquáticas foram cultivadas, separadamente, em dois tanques retangulares construídos em alvenaria, contendo água proveniente do rio Jaguaribe, com dimensões de 2,5 m x 1,0 m x 1,0 m e capacidade de armazenamento para 2500 L (FIGURA 10). Os tanques foram instalados no município do Conde, em local próximo ao de obtenção das espécies cultivadas.



**Figura 10** - Tanque de alvenaria utilizado para o cultivo das espécies.

**Fonte:** Autora, 2017.

O cultivo foi realizado no mês de abril de 2018, período de transição entre o verão e o outono no hemisfério sul. Entretanto, em climas tropicais, como o do Brasil, e da região Nordeste principalmente, as temperaturas se mantêm constantes ao longo do ano, de modo que a época de cultivo não representa influências significativas na produtividade e crescimento das espécies.

Para um melhor acompanhamento dos resultados, foi mantida também uma amostra de controle da água do rio, na qual não foi realizado o cultivo de macrófitas, de modo que pudesse ser feita uma comparação dos valores obtidos com e sem tratamento por fitorremediação.

### **3.4. Procedimentos Experimentais**

Os procedimentos da pesquisa foram divididos em três etapas, sendo a primeira delas o acompanhamento do crescimento vegetativo; a segunda tratando das análises físico-químicas da água de cultivo; e a terceira etapa, centrada na verificação do potencial energético da biomassa cultivada. As três etapas são descritas em detalhes a seguir. Todas as análises foram realizadas em duplicata.

#### **3.4.1. Acompanhamento do Crescimento Vegetativo**

As espécies cultivadas tiveram seu crescimento acompanhado através do seu percentual de ocupação da área do tanque, de modo a registrar seu ritmo de desenvolvimento. O acompanhamento foi feito em quatro momentos: ao início do cultivo e aos 7, 14 e 21 dias de crescimento das macrófitas. Além disso, também foi registrado o peso inicial e final da biomassa cultivada.

#### **3.4.2. Análises Físico-químicas da Água de Cultivo**

Para o acompanhamento da evolução da qualidade da água e do potencial de fitorremediação das espécies estudadas, foram conduzidos experimentos de análises físico-químicas da água coletada para o cultivo das macrófitas. A coleta de amostras para essas análises ocorreu em período simultâneo ao acompanhamento do crescimento vegetativo, ou seja, ao início e após 7, 14 e 21 dias de cultivo das espécies. As amostras foram levadas ao Labsan do CT, na UFPB, onde foram realizadas as análises.

Os experimentos conduzidos seguiram as diretrizes estabelecidas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, sendo aplicados os métodos 2130 B (Método Nefelométrico), para determinação da turbidez; 4500 A e B (Método Potenciométrico – Faixa: 2 – 14), para determinação do pH; Método de Winkler, para determinação da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO); 9215 B (Método-Contagem de Placas UFC), para determinação das bactérias heterotróficas; e Método dos Tubos Múltiplos NMP/100 mL PTA-018 – rev 27/15, para determinação dos coliformes totais e *Escherichia coli*.



Para a avaliação do potencial de fitorremediação das espécies estudadas, além do acompanhamento do crescimento vegetativo e das análises físico-químicas da água, também foi calculada a eficiência da atividade fitorremediadora para cada espécie, por meio da seguinte equação (EQUAÇÃO 1) (ALVES *et al.*, 2017):

$$E = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

E = Eficiência de remoção;

C<sub>i</sub> = Concentração inicial do parâmetro/poluento na água;

C<sub>f</sub> = Concentração final do parâmetro/poluento na água;

### 3.4.3. Verificação do Potencial Energético

Após as etapas iniciais, quando foi atingido o fim do crescimento vegetativo, iniciou-se o processo de morte das macrófitas, que foram, então, retiradas dos tanques, pesadas, armazenadas em sacos plásticos e levadas ao LabMaQ. A biomassa coletada foi empregada na produção dos briquetes e nas análises para determinação da sua composição imediata e do seu poder calorífico.

Os procedimentos de análise imediata, em que estão inseridas as determinações do teor de umidade (balança de umidade AND MF – 50), de materiais voláteis e de cinzas – ambas utilizando um forno mufla (marca Quimis) - e de carbono fixo, foram realizados de acordo com as normas ASTM *Standard Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke* D3172, E872 e E1755.

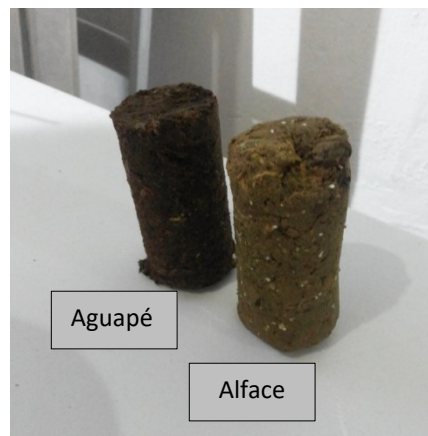
A determinação do poder calorífico, por sua vez, foi conduzida seguindo as determinações da norma ASTM D5865, tendo sido empregada uma bomba calorimétrica adiabática modelo IKA C 200.

Por fim, foi feita a análise térmica da biomassa dos briquetes, através das sua curva termogravimétrica (TGA) e derivada termogravimétrica (DTG), que indicam a taxa de perda de massa da amostra em função da variação da temperatura de aquecimento (IONASHIRO, 2004). Essa análise foi conduzida no Laboratório de Carvão Ativado (LCA) da UFPB, sendo utilizada uma termobalança modelo Q-50 da TA Instruments. Foram empregadas as seguintes condições para a análise térmica

de biomassa: atmosfera de nitrogênio, vazão de  $50 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , temperatura variando da temperatura ambiente até  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  e taxa de aquecimento de  $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ .

#### 3.4.4. Processo de Fabricação dos Briquetes

Para a produção dos briquetes utilizados na determinação do poder calorífico, parte da biomassa retirada dos tanques e levada ao laboratório foi secada na estufa a  $105^\circ\text{C}$ . Após a secagem, as amostras foram trituradas e compactadas na forma de briquetes cilíndricos, com aproximadamente 10 cm de altura e 3 cm de diâmetro (FIGURA 11).



**Figura 11** - Exemplares dos briquetes produzidos para as duas espécies de macrófitas aquáticas.

**Fonte.** Autora, 2018

Um moinho caseiro foi utilizado para triturar as algas, não sendo necessário o uso de aglutinante após esse processo, uma vez que foi obtida boa compactação e aglutinação apenas com a própria biomassa misturada com água a  $100^\circ\text{C}$ . As misturas para cada espécie foram, então, compactadas utilizando uma máquina briquetadeira de fabricação própria (FIGURA 12), na forma de prensa, com capacidade para fornecer uma pressão de duas toneladas. Foram incluídos pequenos furos na parte inferior do molde usado na compactação, de modo a permitir a saída da água usada na mistura.



**Figura 12** - Prensa de fabricação própria utilizada na produção dos briquetes.

**Fonte.** Autora, 2018.

Depois de prontos, os briquetes foram levados novamente à estufa para secagem e análise do teor de umidade, sendo conduzidos, em seguida, para a verificação do seu potencial energético.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. Crescimento vegetativo e qualidade da água de cultivo**

A partir já das primeiras observações foi possível perceber que ambas as espécies de macrófitas aquáticas apresentam um elevado percentual de crescimento, sendo este o primeiro sinal da ocorrência de fitoextração dos poluentes presentes na água. Esse crescimento pode ser observado através da evolução da área ocupada pelas espécies no tanque de cultivo, ao longo do período de observação, bem como, pela diferença do peso inicial (início do cultivo) e final (21 dias de cultivo) da biomassa obtida para cada espécie (TABELA 1), com um aumento de quase 400% para a biomassa do aguapé e de mais de 500% para a da alface d'água.

**Tabela 1** - Peso inicial e final da biomassa obtida para cada espécie de macrófita aquática.

	Peso inicial (kg)	Peso final (kg)
Aguapé	1,58	5,88
Alface d'Água	2,32	11,95

No primeiro dia de cultivo, exemplares das espécies estudadas foram colocados em cada tanque de modo a ocupar uma área inicial de aproximadamente 0,3 m x 1,0 m. O nível de ocupação do tanque, para cada espécie, no último dia de cultivo pode ser observado a seguir (FIGURAS 13 e 14):

**Figura 13** - Ocupação final do tanque de cultivo do aguapé.

**Fonte.** Autora, 2018.



**Figura 14** - Ocupação final do tanque de cultivo da alface d'água.

**Fonte.** Autora, 2018.

Partindo, então, para a análise da qualidade da água de cultivo, onde foram avaliados parâmetros físicos, químicos e biológicos, observou-se que, dentre os parâmetros físicos, alguns não apresentaram alterações significativas, mantendo-se relativamente constantes. Esse foi o caso para o pH (TABELA 2) e para a temperatura (TABELA 3), que variaram próximo às médias de 7,42 e 22,87°C, respectivamente.

**Tabela 2** - Variação do pH para as amostras da água de cultivo do Aguapé e da Alface d'Água, e para a amostra de controle.

	pH			
	Início	7 dias	14 dias	21 dias
Aguapé	7,31	7,87	7,7	7,3
Alface d'Água	7,31	7,71	7,3	7,1
Rio (controle)	7,31	7,41	7,3	7,2

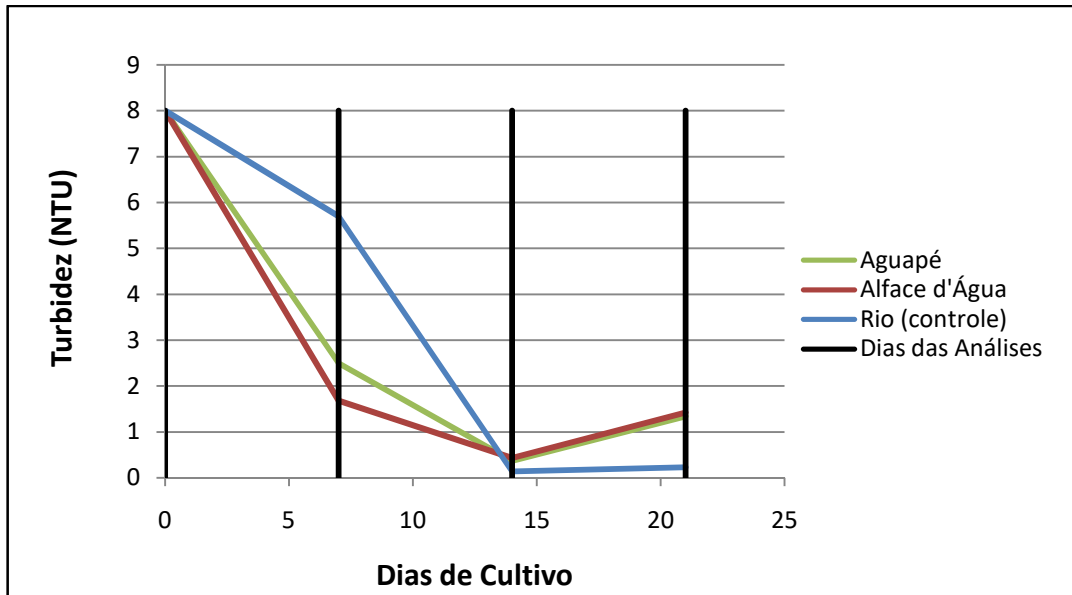
**Tabela 3** - Variação da temperatura para as amostras da água de cultivo do Aguapé e da Alface d'Água, e para amostra de controle.

	Temperatura (°C)			
	Início	7 dias	14 dias	21 dias
Aguapé	25,4	25,8	22,3	19,5
Alface d'Água	25,4	26,1	22,3	19,8
Rio (controle)	25,4	25,4	23,6	18,5

Em relação aos dois parâmetros, é possível perceber um pequeno aumento dos valores no segundo dia de análises (após uma semana de cultivo), quando comparados aos valores obtidos no primeiro dia, para a água bruta. Esse aumento é seguido, então, por um decaimento nas duas semanas seguintes. No entanto, as variações observadas foram muito baixas, podendo ser consideradas pouco significantes para a qualidade da água.

De acordo com a Resolução CONAMA 357/05, águas doces de classe 2, onde se enquadra o rio Jaguaribe, devem apresentar valores de pH entre 6,0 e 9,0, de modo que as amostras analisadas se encontram dentro do padrão. Não há uma norma que determine a temperatura ótima para um corpo d'água, mas os valores medidos não apresentaram grandes variações em relação à temperatura média do ambiente, sendo considerados normais e com as pequenas mudanças observadas podendo ser atribuídas, por exemplo, à alternância entre dias chuvosos e ensolarados no período das análises.

Ainda dentre os parâmetros físicos, a turbidez da água também foi analisada, e os resultados obtidos podem ser observados na Figura 15.



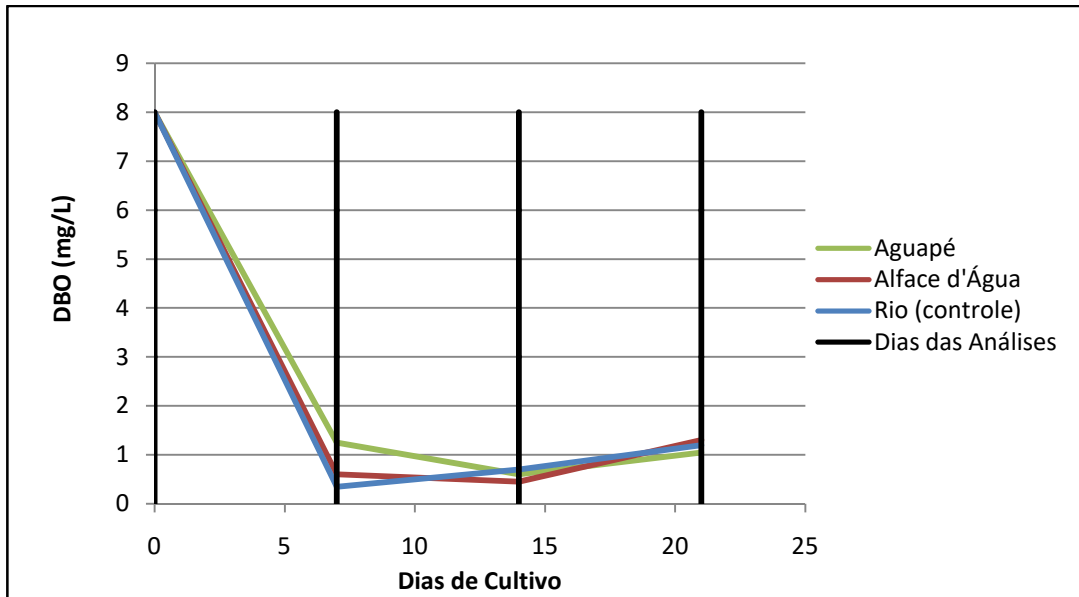
**Figura 15** - Evolução dos níveis de turbidez da água durante o período de cultivo das macrófitas.

É possível perceber uma redução expressiva da turbidez da água no segundo dia de análises, após uma semana de cultivo das duas espécies de macrófitas, consideravelmente maior do que aquela observada na amostra de controle. Isso pode ser atribuído ao fato de as macrófitas possuírem a capacidade de adsorver em suas raízes o material particulado presente na água, o que funciona como um filtro, reduzindo assim os níveis de turbidez (ANDRADE; TAVARES; MAHLER, 2007).

Essa redução continuou a ocorrer até o terceiro dia de análises, ou seja, aos 14 dias de cultivo, havendo, a partir daí, uma mudança de padrão com um aumento dos valores medidos. A justificativa mais pertinente para essa alteração de comportamento é a de que ela seja um indicativo de que, nesse período em que os valores voltaram a aumentar, se iniciou a fase de morte das algas, com decaimento da atividade de fitorremediação, e aumento dos valores de turbidez.

Em relação à amostra de controle, os baixos níveis de turbidez observados ao final do cultivo devem ser relacionados à decantação do material particulado presente na água.

As análises dos parâmetros biológicos, assim como para os físicos, mostraram clara evolução positiva para as três amostras. Os resultados obtidos para a DBO podem ser observados a seguir (FIGURA 16):



**Figura 16** - Evolução dos valores de DBO da água durante o período de cultivo das macrófitas.

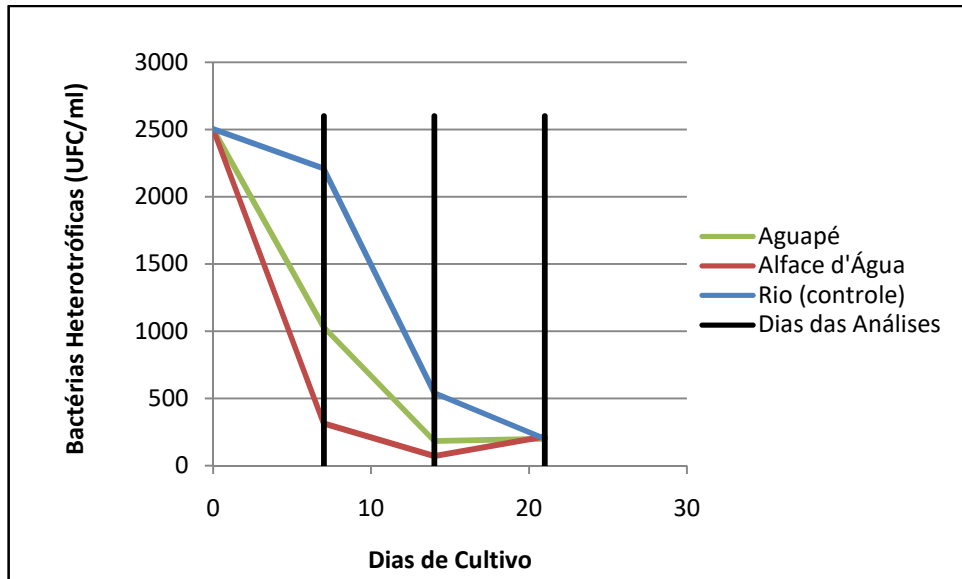
É importante ressaltar, no entanto, que a amostra de controle apresentou resultados inicialmente mais satisfatórios, mas sofrendo um aumento logo em seguida e, ao final, praticamente se igualando aos resultados obtidos com as macrófitas. Assim, deve-se destacar que o início do cultivo das macrófitas representa um acréscimo de matéria orgânica à água, proveniente das próprias plantas, e justificando sua remoção inicial mais lenta nessas amostras, diferente do que ocorre para a amostra de controle.

Seguindo o mesmo padrão observado para a turbidez, os valores de DBO sofreram redução significativa no segundo e no terceiro dia de análises havendo, então, uma pequena elevação observada no último dia, correspondente à última semana de cultivo das macrófitas. Novamente, o início da fase de perda foliar e decomposição dos espécimes mais antigos eleva os níveis de carga orgânica na água, aumentando a demanda por oxigênio para a sua degradação.

Em termos numéricos, o agupapé apresentou os melhores resultados finais para a DBO, com 1,03 mg/L comparados a 1,3 mg/L para a alface d'água e 1,2 mg/L para o controle.

Ainda dentro dos parâmetros biológicos, foi feito o acompanhamento do crescimento de bactérias heterotróficas na água, através da contagem de unidades formadoras de colônia/ml da amostra, cujos resultados podem ser vistos a seguir (FIGURA 17):

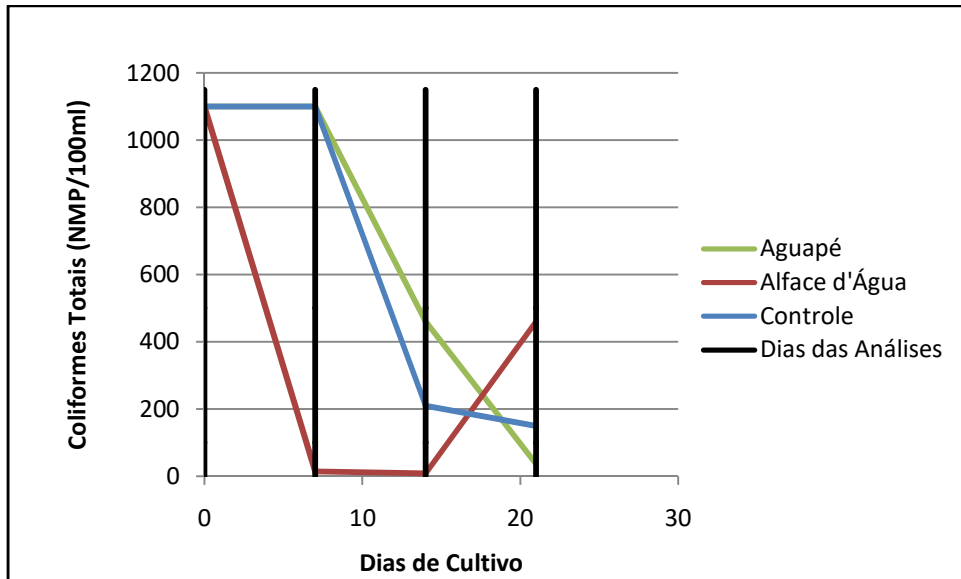




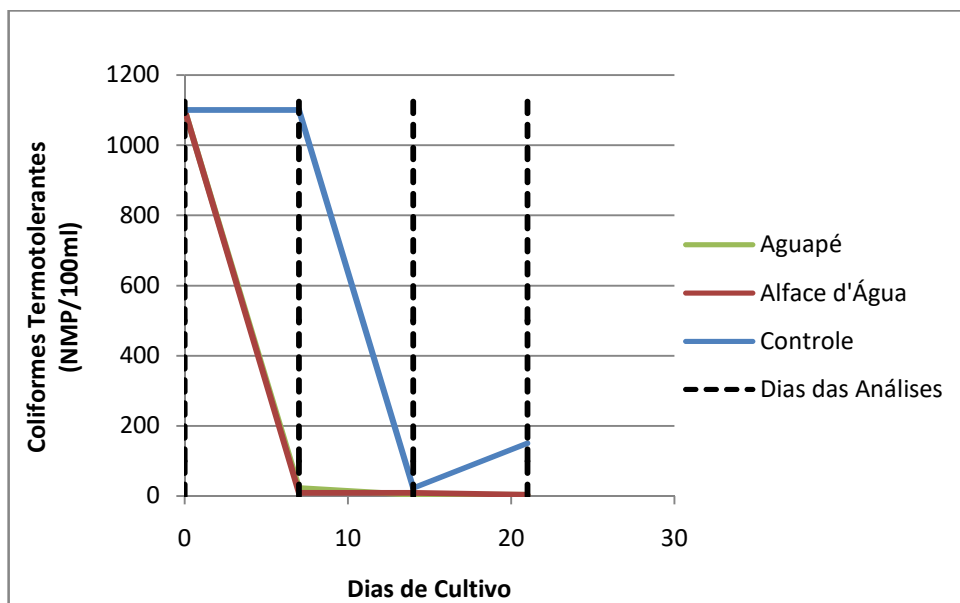
**Figura 17** - Evolução da presença de bactérias heterotróficas na água durante o período de cultivo das macrófitas.

A tendência observada nos outros parâmetros se repetiu também para as bactérias heterotróficas, com decréscimo expressivo e rápido da sua presença nas duas primeiras semanas, e um pequeno aumento na última semana de cultivo. Com isso, os valores para as três amostras praticamente se igualam na última análise. Com o decaimento da atividade fitorremediadora e a maior disponibilidade de matéria orgânica, há um aumento também de substrato para o crescimento de bactérias, justificando assim a sua elevação na fase final do cultivo. Entretanto, fica evidente a eficácia das macrófitas, especialmente a Alface d'Água, na remoção de bactérias durante as primeiras semanas de tratamento.

Encerrando o grupo de parâmetros biológicos analisados, os resultados para o monitoramento da presença de coliformes totais e termotolerantes podem ser vistos a seguir (FIGURAS 18 e 19):



**Figura 18** - Evolução da presença de coliformes totais na água durante o período de cultivo das macrófitas



**Figura 19** - Evolução da presença de coliformes termotolerantes na água durante o período de cultivo das macrófitas.

Como observado anteriormente, é possível perceber nos coliformes totais referentes ao cultivo da alface d'água a mesma tendência que se repete entre os outros parâmetros. Os valores medidos sofreram um decréscimo acentuado nas duas análises seguintes à medição inicial, indicando a ação dessa macrófita na melhoria da qualidade da água de cultivo. Entretanto, esses valores voltaram a aumentar na última semana de análises.

Em relação a esse parâmetro, no entanto, o aguapé apresentou resultados inicialmente lentos, seguidos de uma remoção acentuada nas últimas análises. A amostra de controle seguiu a mesma tendência do aguapé, mas com resultados menos positivos na última análise.

Quanto aos coliformes termotolerantes, que representam a maior probabilidade de contaminação da água por fezes, a remoção foi sempre crescente durante o período de cultivo das duas espécies, ao contrário da amostra de controle, que apresentou elevação dos valores na última semana de observações.

Em relação a esses parâmetros, os resultados para a amostra de controle não se apresentaram tão significativos quanto os observados para aquelas em que houve o cultivo das macrófitas, evidenciando a eficiência das duas espécies na desinfecção da água, com destaque para o aguapé, que apresentou a maior capacidade de remoção dos coliformes.

Mais uma vez, a decomposição das plantas, que ocorre no fim do seu ciclo de vida, pode ser indicada como justificativa para o padrão também observado nesses parâmetros, uma vez que ela provoca um aumento da disponibilidade de matéria orgânica na água, prejudicando sua qualidade em termos de DBO, elevando também os níveis de turbidez e fornecendo substrato para o crescimento de micro-organismos.

É importante destacar que o aguapé apresentou uma taxa de reprodução bastante lenta nas duas primeiras semanas de cultivo, havendo, entretanto, uma aceleração do seu crescimento na última semana, quando a quantidade de biomassa dessa espécie praticamente dobrou. Essa pode ser a explicação para que a sua atividade de desinfecção da água continuasse a melhorar até a última semana de análises. Ao passo que os espécimes mais antigos já estavam iniciando sua fase de decomposição, prejudicando assim os valores dos outros parâmetros analisados.

No entanto, apesar das diferenças na taxa inicial de reprodução, as duas espécies de algas apresentaram resultados muito semelhantes e também satisfatórios como agentes fitorremediadoras.

Testes prévios à pesquisa, utilizando aguapé e alface d'água no tratamento de água usada em viveiros de piscicultura, demonstraram a eficiência dessas espécies na diminuição da turbidez, da dureza e das concentrações de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) nas amostras, devendo-se destacar, também, os excelentes resultados alcançados pelo aguapé na remoção de coliformes termotolerantes da

água analisada (BARBOSA *et al.*, 2017). Os presentes resultados, utilizando água de rio, reafirmaram essa eficiência para as duas espécies.

Patel (2012) reportou uma redução de 80% na concentração de coliformes fecais e de 50% para a DBO em efluentes urbanos tratados com o cultivo de aguapé, além de melhorias no pH, turbidez, cor e odor desses efluentes. Os resultados aqui obtidos apontam uma eficiência de quase 100% para os coliformes termotolerantes e de aproximadamente 87% para a DBO, com o uso do aguapé, além de 92% de eficiência na remoção de bactérias heterotróficas e de 83% para a turbidez.

Em relação à alface d'água, Zimmels, Kirzhner e Malkovskaja (2006) registraram uma redução de 89% da DBO em um sistema de tratamento de esgoto utilizando essa macrófita, e de 96,6% do nível de turbidez. Resultados levemente superiores aos obtidos nesta pesquisa, onde se verificou aproximadamente 84% de redução nos valores da DBO e 82% da turbidez, completando com 91,4% de eficiência para bactérias heterotróficas e aproximadamente 100% para coliformes termotolerantes.

Além disso, diversos estudos (AKINBILE; YUSOFF, 2012, YASAR *et al.*, 2013, BUTA *et al.*, 2014, HONGJIE *et al.*, 2016) destacam a eficiência das duas espécies de macrófitas aquáticas na remoção de metais pesados e nutrientes - parâmetros esses não avaliados nesta pesquisa - reafirmando o potencial dessas espécies como agentes fitorremediadoras. Os resultados obtidos nesta pesquisa, em termos de eficiência na fitorremediação, estão resumidos a seguir (TABELA 4):

**Tabela 4** - Eficiência na fitorremediação para as amostras da água de cultivo do Aguapé e da Alface d'Água, e para a amostra de controle.

Amostras / %	Turbidez	Bactérias	Coli Termo	Coli Totais	DBO
Aguapé	83,25	92	99,72	96,72	86,88
Alface d'Água	82,25	91,36	99,72	58,18	83,75
Controle	97,13	92	86,36	86,36	85

Para águas doces de Classe 2, a Resolução CONAMA 357/05 estabelece os limites de 100 NTU para a turbidez, de 5 mg/L para a DBO e 1000 / 100ml para os coliformes termotolerantes, de modo que todas as amostras analisadas atingiram o padrão desejado.

É possível perceber uma semelhança nos resultados das três amostras para a maior parte dos parâmetros analisados. As diferenças são mais destacadas, no entanto, quando se trata da remoção de coliformes. Para os coliformes termotolerantes, a amostra de controle apresentou resultados visivelmente inferiores àqueles alcançados com os tratamentos usando macrófitas, os quais apresentaram resultados idênticos entre si.

Em relação aos coliformes totais, os melhores resultados foram para amostra tratada com o uso do aguapé, seguida da amostra de controle. Como já mencionado, os resultados para a alface d'água foram positivos até a penúltima análise, apresentando, então, um retrocesso na última semana. Isso pode indicar que a alface d'água apresenta um ciclo de vida mais curto que o do aguapé e, portanto, sua decomposição, e o fim da atividade fitorremediadora, ocorreram mais cedo, prejudicando seus resultados finais.

De forma geral, no entanto, quando comparadas nos seus picos de atividade, as duas espécies de macrófitas aquáticas apresentaram resultados semelhantes em relação a todos os parâmetros analisados, com destaque para a alface d'água em termos de quantidade de biomassa produzida.

#### 4.2. Análise imediata e potencial energético

As análises imediatas se iniciaram com a verificação do teor de umidade das algas logo após a sua colheita. Os valores encontrados foram bastante elevados, como já era esperado para plantas aquáticas. Os resultados obtidos podem ser verificados a seguir (TABELA 5):

**Tabela 5** - Teor de umidade encontrado para o Aguapé e a Alface d'Água após a sua colheita.

	Umidade (%)
Aguapé	64,20
Alface d'Água	89,10

Em seguida, prosseguiu-se com a análise da composição imediata dos briquetes, sendo utilizadas amostras das espécies de algas após secagem em estufa a 105°C. Os resultados são vistos a seguir (TABELA 6):

**Tabela 6** - Análise da composição imediata dos briquetes fabricados a partir da biomassa do Aguapé e da Alface d'Água.

	Umidade (%)	Voláteis (%)	Cinzas (%)	Carbono Fixo (%)
Aguapé	6,90	68,89	20,56	10,55
Alface d'Água	6,65	61,76	31,41	6,83

É possível perceber uma redução expressiva no teor de umidade dos briquetes, quando comparado àquele obtido para a biomassa após a colheita. Teores de umidade mais baixos são preferíveis para fins energéticos, com limites aceitáveis entre 10% e 15% para biocombustíveis sólidos, uma vez que percentuais mais elevados representam maior energia gasta para a evaporação da água durante a queima dos briquetes, além da possibilidade de quebra ou degradação biológica antes do seu uso (DIAS *et al.*, 2012, REZANIA *et al.*, 2016). Dias *et al.* (2012) mencionam também que teores de umidade abaixo dos 5% podem representar perda de material, quebra ou, ainda, geração de finos no transporte e armazenamento dos briquetes. Nesse sentido, os briquetes produzidos estão dentro do padrão desejado.

Deve-se destacar que os altos valores para o teor de umidade da biomassa após a colheita podem ser vistos como um empecilho para o seu aproveitamento energético, uma vez que o elevado consumo de energia para a sua secagem em estufa se contrapõe à energia a ser obtida a partir dos briquetes produzidos. Uma alternativa para contornar essa questão é a secagem das plantas ao sol

Os teores de materiais voláteis também se apresentaram dentro do esperado, com os resultados para a alface d'água estando apenas um pouco abaixo dos valores típicos para biomassa, que se encontram entre 65% - 85% (REZANIA *et al.*, 2016). Valores mais altos de materiais voláteis, como os observados na biomassa estudada, representam maior reatividade e velocidade de combustão do material. Munjeri *et al.* (2016) destacam que o poder calorífico de um combustível tende a aumentar de maneira proporcional ao teor de materiais voláteis presentes nele.

O teor de cinzas, por sua vez, se apresentou bastante elevado para os dois tipos de briquetes, sendo essa uma característica negativa em termos energéticos, uma vez que as cinzas se constituem de material não combustível e, portanto, não contribuem positivamente para o poder calorífico do briquete. Entretanto, para fins de comparação, os valores obtidos para o aguapé ainda foram mais baixos do que

aqueles observados comumente para o carvão (28,46%) (REZANIA *et al.*, 2016). Munjeri *et al.* (2016) também destacam que as cinzas representam o resíduo da oxidação dos componentes minerais presentes no briquete, podendo, então, serem empregadas como possível fonte de reposição desses elementos em plantações agrícolas.

Em relação ao teor de carbono fixo, os valores encontrados foram baixos para os dois briquetes. Baixos teores de carbono fixo representam maior reatividade do combustível, o que pode significar, no entanto, maior velocidade de combustão e menor eficiência energética.

Por fim, são apresentados a seguir os valores encontrados para o poder calorífico dos dois tipos de briquetes estudados (TABELA 7):

**Tabela 7** - Poder calorífico encontrado para os briquetes fabricados a partir da biomassa do Aguapé e da Alface d'Água.

	PCS (MJ/kg)
Aguapé	14,382
Alface d'Água	14,185

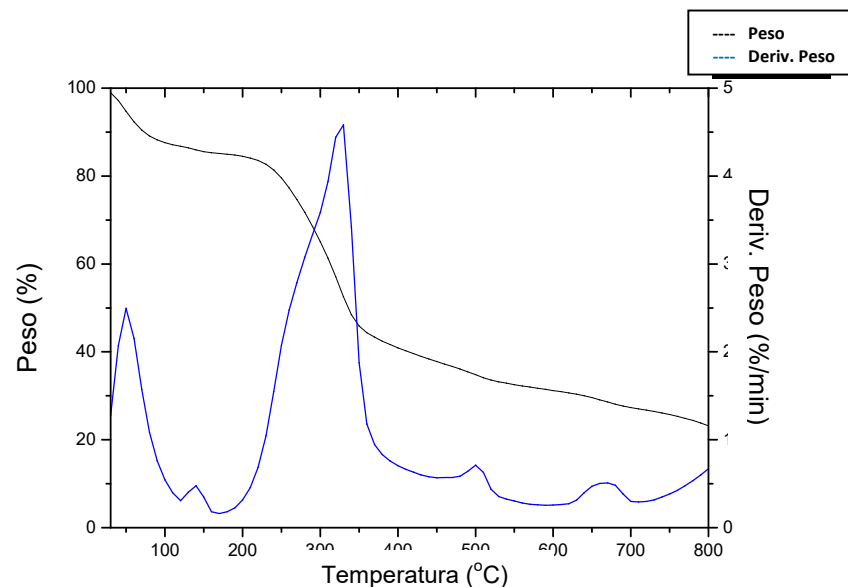
Não existem normas brasileiras que determinem o poder calorífico esperado para um briquete feito a partir de biomassa, e algumas das normas provenientes de outros países variam nas suas especificações. Baseando-se, então, na norma europeia, que unifica algumas delas, o poder calorífico mínimo requerido para bio-briquetes é determinado como sendo de 16,9 MJ/kg (DIAS *et al.*, 2012). Dessa forma, os briquetes produzidos encontram-se abaixo do padrão.

Entretanto, fazendo um comparativo com os valores encontrados para a madeira, que estão entre 14,4 – 17,4 MJ/kg, percebe-se o potencial de utilização dos briquetes feitos a partir de biomassa algal como substitutos da lenha, especialmente por comunidades ribeirinhas que possuam pouco acesso a outras fontes de energia (MUNJERI *et al.*, 2016).

Ademais, a produção de briquetes a partir da biomassa de plantas aquáticas evita o corte de árvore e a consequente emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera, sendo esse mais um fator positivo no quesito ambiental (MUNJERI *et al.*, 2016).

Além disso, uma possibilidade para se obter maior potencial energético de briquetes feitos a partir dessas algas é através da mistura com outras matérias primas. Rezania et al. (2016), por exemplo, obtiveram um poder calorífico de 17,17 MJ/kg para briquetes feitos a partir da mistura de Aguapé com resíduos da Palma, superior ao valor de 14,58 MJ/kg encontrado no mesmo estudo para briquetes feitos somente com aguapé.

Após a análise do poder calorífico dos briquetes, foi realizada, então, a análise térmica destes, através da sua curva termogravimétrica (TGA) e da curva da derivada termogravimétrica (DTG). As curvas obtidas para o aguapé e a alface d'água podem ser vistas nas Figuras 20 e 21, respectivamente.



**Figura 20** - Curva termogravimétrica (TGA) e da derivada termogravimétrica (DTG) da pirólise do aguapé.

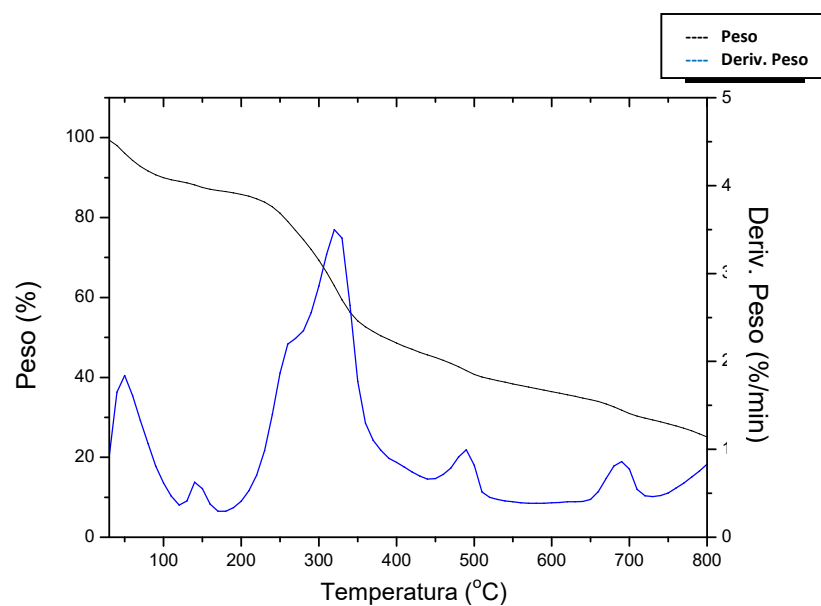
A Figura 20 representa uma curva TGA típica de uma biomassa, onde se verifica a liberação de hemicelulose, celulose e lignina (MANOZZO, 2016). Foi observada uma perda de massa total de 76,72% em relação à massa inicial de 9,997 mg, e três estágios de degradação, com a presença de dois picos principais.

O primeiro pico representa a liberação de umidade, na faixa de temperatura de 0° - 100°C. A maior curva, cuja temperatura de pico foi de 326.51°C, ocorreu na faixa de temperatura de 200° - 400°C, representando a degradação de hemicelulose e celulose. Foi observada a presença de um ombro, indicando a transição da degradação daquele componente para este último. A decomposição desses



componentes se deu a uma taxa de 0,3715 %/min, com uma porcentagem de perda de massa 44,05%. A degradação da lignina representa o último estágio do processo de pirólise do aguapé, tendo sido praticamente constante na faixa de temperatura de 400 - 800°C. Este último componente é o que apresenta relação mais direta com o poder calorífico (MANOZZO, 2016).

Assim como para o aguapé, a análise térmica referente à alface d'água (FIGURA 21) traz curvas TGA e DTG características de materiais lignocelulósicos, com três estágios de degradação e dois picos principais podendo ser observados.



**Figura 21** - Curva termogravimétrica (TGA) e da derivada termogravimétrica (DTG) da pirólise da alface d'água.

O primeiro pico, referente à liberação da umidade ainda presente na amostra, ocorreu na faixa de temperatura de 0° - 100°C. Novamente, a curva mais acentuada foi observada entre as temperaturas de 200°C e 400°C, representando a degradação de hemicelulose e da celulose, e com a presença de um ombro indicando a transição entre os processos de decomposição desses dois componentes. A temperatura de pico registrada para essa curva foi de 322,5°C, e perda de massa de 37,21% a uma taxa de 0,443 %/min. Por fim, ocorreu a degradação da lignina, de forma praticamente constante, também na faixa de temperatura de 400 - 800°C. A perda de massa total registrada para amostra de alface d'água foi de 74,78% em relação aos 10,447 mg iniciais.

Por fim, pelos resultados observados em relação ao poder calorífico, e às análises térmica e imediata, percebe-se que os briquetes produzidos a partir da biomassa do aguapé e da alface d'água, apesar de estarem um pouco abaixo dos padrões considerados nesta pesquisa, apresentam potencial energético para serem usados como fonte de calor.

No entanto, para uma produção comercial de briquetes feitos a partir das macrófitas estudadas, devem ser feitas avaliações econômicas, como os custos implicados na colheita mecânica da biomassa e na distribuição dos briquetes, por exemplo. Em relação a isso, Oliveira Júnior (2011) avaliou como sendo positivo o retorno econômico para o uso de briquetes de alface d'água juntamente com cavacos de madeira, em substituição ao Eucalipto em fornalhas industriais.

Em uma produção para consumo próprio, por sua vez, como seria o caso de comunidades ribeirinhas, praticamente não existem custos, uma vez que a colheita se dá de forma manual e próxima ao local de produção e utilização dos briquetes, representando um valor positivo em termos econômicos e ambientais.

## **5. CONCLUSÕES**

Os resultados obtidos, em termos de melhoria da qualidade da água de cultivo, confirmaram a capacidade do aguapé e da alface d'água para atuarem como espécies fitorremediadoras. De modo geral, os valores finais dos parâmetros observados não se apresentaram amplamente superiores àqueles obtidos para a amostra de controle, à qual não foi aplicado tratamento algum. No entanto, em se tratando da desinfecção da água analisada, o tratamento a base de algas apresentou grande destaque, com alta remoção de coliformes.

Em termos energéticos, a elevada taxa de crescimento vegetativo observada já nas primeiras semanas, especialmente para a alface d'água, representa um valor positivo para o uso das espécies estudadas como fonte de biomassa, para a produção de bioenergia em uma escala comercial. Os testes feitos apontaram que, apesar de os briquetes produzidos não apresentarem padrões elevados quanto ao teor de cinzas, de carbono fixo e ao poder calorífico, em relação aos parâmetros considerados, ainda assim possuem considerável valor energético e ambiental quando comparados ao uso da lenha, por exemplo, para a qual são vistos como possíveis substitutos.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Estudos mais aprofundados, em relação à remoção de nutrientes como Nitrogênio e Fósforo, por exemplo, ou ainda de metais pesados, podem ser feitos no intuito de atestar as vantagens do uso do aguapé e da alface d'água no tratamento de água. Os metais pesados não foram incluídos nesta pesquisa por não haver indícios da sua presença na água a ser analisada.

Além disso, o emprego de uma atmosfera de Oxigênio nas análises térmicas pode ser testado, no intuito de melhor verificar o comportamento dos briquetes fabricados quando submetidos à combustão direta.

Por fim, um posterior estudo da viabilidade econômica para a comercialização desses briquetes é recomendado, uma vez que algumas variáveis, como o custo da colheita e do transporte, devem ser consideradas. No entanto, em uma menor escala, o seu emprego é amplamente viável, pois a produção para consumo próprio por comunidades de baixa renda apresenta custo nulo, além de proporcionar fácil acesso a uma fonte de energia limpa e sustentável.

## REFERÊNCIAS

AKINBILE, C. O.; YUSOFF, M. S. Assessing water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) and lettuce (*Pistia stratiotes*) effectiveness in aquaculture wastewater treatment. **International Journal of Phytoremediation**. 2012. v. 14, p. 201-211.

ALVES, G. S.; Cruz, A. D.; CUNHA, C. V.; Sousa, T. R. Fitorremediação de águas residuais com *Eichhornia crassipes* em sistema hidropônico. In: Rigoberto Rodríguez Quirós. (Org.). **Tierra: Naturaleza, Biodiversidad y Sustentabilidad**. ed.1. San José: Jade, 2017, v. 1, p. 77-87.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. Ed. Washington D.C: APHA-AWWA-WEF, 2005. 1134p.

Andersson, V.; Viklund, S. B.; Hackl, R.; Karlsson, M.; Berntsson, T. Algae-based biofuel production as part of an industrial cluster. **Biomass Bioenerg.**, v. 71, p. 113-124. 2014.

ANDRADE, J.; TAVARES, S.; MAHLER, C. Fitorremediação, o uso de plantas na melhoria da qualidade ambiental, **Oficina de Textos**, São Paulo, Brasil, 176 p. 2007.

ARESTA, M.; DIBENEDETTO, A.; BARBERIO, G. **Utilization of macro-algae for enhanced CO<sub>2</sub> fixation and biofuels production**: Development of a computing software for an LCA study. 2005. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2005.01.016>>. Acesso em: 20 Nov. 2017.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL – ASTM. **Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke**: D3172-89. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1997.

\_\_\_\_\_. **Standard test method for gross calorific value of coal and coke**: D 5865. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.

\_\_\_\_\_. **Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels**: ASTM E872-82. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013.

\_\_\_\_\_. **Standard Test Method for Ash in Biomass**: E1755-0. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2015.

BARBOSA, E. C. A.; FIGUEIREDO, S. A.; LOPES, R. M. B. P.; BARBOSA, G. S. Utilização de macrofitas para o tratamento da água de piscicultura. Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – Congestas 2017. **Anais eletrônicos...** João Pessoa, 2017.

BHL. Biodiversity Heritage Library. *Eichhornia crassipes*. **Nova genera et species plantarum**. Monachii [Munich]: Impensis Auctoris, 1824-1829 [i.e. 1824-32]. Disponível em: <[biodiversitylibrary.org/page/741932](http://biodiversitylibrary.org/page/741932)>. Acesso em 15 jan. 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. – Brasília : ANEEL, 2002. 153 p. Disponível em: < [http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro\\_atlas.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf)>. Acesso em: 14 de jul. 2017

BRASIL. Balanço Energético Nacional. **Relatório final 2017**. BEN. 2017. Disponível em: <[https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4117038/mod\\_resource/content/1/QFL1601%20-%20Aula%204%20v.2017.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4117038/mod_resource/content/1/QFL1601%20-%20Aula%204%20v.2017.pdf)>. Acesso em: 18 Nov. 2017.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. **Resolução nº 420**, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Brasília, DF, 2009.

BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Resolução nº357**, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Brasília, DF, 2005.

BUTA, E.; TOROK, A.; CSOG, A.; ZONGO, B.; CANTOR, M.; BUTA, M.; MAJDIK, C. Comparative Studies of the Phytoextraction Capacity of Five Aquatic Plants in Heavy Metal Contaminated Water. **Not. Bot. Horti. Agrobi.**, 2014, v. 42, p. 173-179.

CAMPOS, C. F.; VITORINO, H. S.; SOUZA, G. S. F.; SANTANA, D. C.; MARTINS, D. Translocação dos herbicidas glyphosate e imazamox em plantas de aguapé. **Arq. Inst. Biol.**, São Paulo, v.80, n.2, p.177-182, 2013.

CARDOSO, B. M. Uso da Biomassa como Alternativa Energética. Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2012. 94 p. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005044.pdf>>. Acesso em 16 jul. 2017

CARDOSO, J. E. T.; LODI, P. C.; BARROS, A. M. T. C. Técnicas Associadas de Remediação de Contaminação da Água e do Solo por Hidrocarbonetos: Estudo de Caso em Posto de Combustível. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, [S.l.], v. 5, n. 36, dez. 2017. ISSN 2318-8472.

CHIST, Y. **Biodiesel from microalgae**. Disponível em:< <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0734975007000262?via%3Dihub>>. Acesso em: 18 Nov. 2017.

COLE, A. J.; NYS, R.; PAUL, N. A. Removing Constraints on the Biomass Production of Freshwater Macroalgae by Manipulating Water Exchange to Manage Nutrient Flux. **PLoS ONE**9 (7): e101284. 2014. Disponível em: <<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101284>>. Acesso em: 14 fev. 2018.

COSTA, D. F.; DANTAS, E. W. Diversity of phytoplankton community in different urban aquatic ecosystems in metropolitan João Pessoa, state of Paraíba, Brazil. **Acta Limnol. Bras.**, Rio Claro, v. 23, n. 4, p. 394-405, 2011.

DIAS, J. M. C. S.; SOUZA, D. T.; BRAGA, M.; ONOYAMA, M. M.; MIRANDA, C. H. B.; BARBOSA, P. F. D.; ROCHA, J. D. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2012. 130 p. ISSN 2177- 4439

DIEB, M. A.; MARTINS, P. D. O Rio Jaguaribe e a história urbana de João Pessoa/PB: da harmonia ao conflito. XVII Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Planejamento Urbano e Regional – ENAMPUR. **Anais eletrônicos...** São Paulo. 2017. Disponível em: <[http://anpur.org.br/xviienanpur/principal/publicacoes/XVII.ENANPUR\\_Anais/ST\\_Sessoes\\_Tematicas/ST%207/ST%207.8/ST%207.8-03.pdf](http://anpur.org.br/xviienanpur/principal/publicacoes/XVII.ENANPUR_Anais/ST_Sessoes_Tematicas/ST%207/ST%207.8/ST%207.8-03.pdf)>. Acesso em: 15 fev. 2018

FAVARO, S. P.; MIRANDA, C. H. B. **Aproveitamento de Espécies Nativas e seus Coprodutos no Contexto de Biorrefinaria**. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2013. 38 p. ISSN 2177-4439. Disponível em: <<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/974421/1/doc14FINAL.pdf>>. Acesso em: 19 Nov. 2017.

FERNANDES, A. J. D.; OLIVEIRA, J. R. A.; GOMES, E. L. S.; FERREIRA, M. L. M.; SANTOS, C. C.; LÚCIO, M. M. L. M. Avaliação de parâmetros físico-químicos da água dos maceiós do Bessa e Intermares / PB. **Principia**, João Pessoa, n. 36, p. 29-42, 2017.

FIGUEIREDO, S. A.; BARBOSA, E. C. A.; LOPES, R. M. B. P. Rios eutrofizados como fonte de obtenção de biomassa para a produção de biocombustíveis. Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – Congestas 2017. **Anais eletrônicos...** João Pessoa, 2017.

GALVÃO, M. V.; OLIVEIRA, A. R.; BATOSTELLA FILHO, F.; PUGLIESE, L. **O Programa Nacional de Produção e uso do Biodiesel e a Agricultura Familiar**. 2016. Disponível em:<<http://www.citec.fatecjab.edu.br/index.php/files/article/view/1072>>. Acesso em : 20 nov. 2017.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento**. EDUSP, São Paulo, Ed. 3, Brasil (2008).

HONGJIE, Q.; ZHIYONG, Z.; MINHUI, L.; HAIQIN, L.; YAN, W.; XUEZHENG, W.; YINGYING, Z.; SHAOHUA, Y. Site test of phytoremediation of an open pond contaminated with domestic sewage using water hyacinth and water lettuce. **Ecological Engineering**. 2016. v. 95, p. 753-762.

IONASHIRO, M. **Giolito: Fundamentos da Termogravimetria, Análise Térmica Diferencial e Calorimetria Exploratória Diferencial**. São Paulo: Giz Editorial, 2004, 82 p.

IRENA. **Installed Capacity Trends** – Bioenergy. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2018.

LEMAIRE, C.; *et al.* Pistia stratiotes. **Flore des serres et des jardins de l'Europe**, 1851, volume 6. Cromolitografia finalizada a mão, 160 x 240 mm. Disponível em: <<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=6267287>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

LIAO, S.W.; CHANG, W.L. Heavy metal phytoremediation by water hyacinth at constructed wetlands in Taiwan. **J. Aquat. Plant Manage.**, 42 (2004), pp. 60-68

LIMA, S. D. et al. Gerenciamento de áreas contaminadas por postos de combustíveis em Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. **Rev. Ambient. Água**, Taubaté, v. 12, n. 2, p. 299-315, abr. 2017.

MANOZZO, V. **Estudo cinético da pirólise das macrófitas: Pistia stratiotes e Eichhornia crassipes**. 2016. 92 f. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Toledo, 2016.

MUNJERI, K.; ZIUKU, S.; MAGANGA, H. ; SIACHINGOMA, B.; NDLOVU, S. On the potential of water hyacinth as a biomass briquette for heating applications. **Int J Energy Environ Eng**. 2016. v. 7, p. 37-43.

OLIVEIRA JUNIOR, M. J. 2011. **Uso de macrófitas da espécie Pistia stratiotes (alface d'água) como combustível sólido para fornalhas industriais, uma análise de viabilidade técnica e econômica**. Dissertação (MPAGRO) - Escola de Economia de São Paulo. 56 f. 2011.

PANWAR, N.L.; KAUSHIK, S.C.; KOTHARI, S. Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1513–1524. 2011. Disponível em: <<http://www.beren.sakarya.edu.tr/sites/beren.sakarya.edu.tr/file/1380752545-07-RenewEn.pdf.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2018.

PATEL, S. Threats, management and envisaged utilizations of aquatic weed *Eichhornia crassipes*: an overview. **Rev Environ Sci Biotechnol**. 2012. v. 11, p. 249-259.

PEREIRA, F. S. G. **Viabilidade sustentável de biomassas de Moringa oleifera para produção de biodiesel e briquetes**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco - Recife. 2015. 141f. Disponível em: <<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/17160>>. Acesso em 15 fev. 2018.

PEREIRA, F. J. **Características anatômicas e fisiológicas de aguapé e índice de fitorremediação de alface d'água cultivados na presença de arsênio, cádmio e chumbo**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Lavras, 2010. 116 p.

REZANIA, S.; DIN, M.F.M.; KAMARUDDIN, S.F.; TAIB, S.M.; SINGH, L.; YONG, E.L.; DAHALAN, F.A. Evaluation of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as a potential raw material source for briquette production. **Energy**, 2016. v.111, p. 768-773.

ROBLES-PLIEGO, M.; OLGUÍN, E. J.; HERNÁNDEZ-LANDA, J.; GONZÁLEZ-PORTELA, R. E.; SÁNCHEZ-GALVÁN, G.; CUERVO-LÓPEZ, F. (2015). Dual Purpose System for Water Treatment from a Polluted River and the Production of *Pistia stratiotes* Biomass within a Biorefinery. **Clean Soil Air Water**, 43: 1514–1521.

SANTOS, C. L.; SOUZA, A. S; VITAL, S. R. O; GIRÃO, O.; WANDERLEY. L. S. A. Impactos da urbanização em bacias hidrográficas: o caso da bacia do rio Jaguaribe, cidade de João Pessoa/PB. **REGNE**, Vol. 2. Nº Especial. 2016. Disponível em: <<https://periodicos.ufrn.br/revistadoregne/article/view/10565/7482>>. Acesso em: 12 fev. 2018.

SILVA, A. D. R. ; et al . Eficiência do aguapé sobre variáveis limnológicas em canais de abastecimento utilizados no cultivo de tambaqui. **Acta Amaz.**, Manaus, v. 44, n. 2, p. 255-262, jun. 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S0044-59672014000200011>>. Acesso em 13 fev. 2018.

SILVA, J. W. F.; CARNEIRO, R. A. F.; LOPES, J. M. Da biomassa residual ao briquete: viabilidade técnica para produção de briquetes na microrregião de Dourados – MS. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v.6, n.4, p.624-646, 2017. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/rber/article/view/46401/pdf>>. Acesso em 16 fev. 2018.

SWAIN, G.; ADHIKARI, S.; MOHANTY, P. Phytoremediation of copper and cadmium from water using water hyacinth, *Eichhornia Crassipes*. **Int J Agric Sci Technol**, v. 2, p. 1–7. 2014.

YASAR, A.; KHAN, M.; TABINDA, A. B.; HAYYAT, M. U.; ZAHEER, A. Percentage uptake of heavy metals of different macrophytes in stagnant and flowing textile effluent. **JAPS: Journal of Animal & Plant Sciences**. 2013, v. 23, ed. 6, p. 1709-1713.

ZIMMELS, Y.; KIRZHNER, F.; MALKOVSKAJA, A. Application of *Eichhornia crassipes* and *Pistia stratiotes* for treatment of urban sewage in Israel. **Journal of Environmental Management**. 2006. v. 81, p. 420-428.