



**Universidade Federal do Tocantins**  
**Campus Universitário de Palmas**  
**Programa de Pós-Graduação em Agroenergia (PPGA)**

**WILLIAN MATEUS DE SOUSA ALMEIDA**

**ESTUDO DO BALANÇO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE PIRÓLISE DE LODO  
DE ESGOTO EM ESCALA LABORATORIAL**

PALMAS - TO  
2019



**Universidade Federal do Tocantins**  
**Campus Universitário de Palmas**  
**Programa de Pós-Graduação em Agroenergia (PPGA)**

**WILLIAN MATEUS DE SOUSA ALMEIDA**

**ESTUDO DO BALANÇO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE PIRÓLISE DE LODO  
DE ESGOTO EM ESCALA LABORATORIAL**

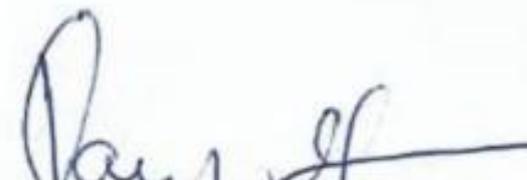
Projeto Apresentado para defesa no mestrado de  
Agroenergia da Universidade Federal do Tocantins.  
Orientadora. Profa: Dra. Gláucia Eliza Gama Viera

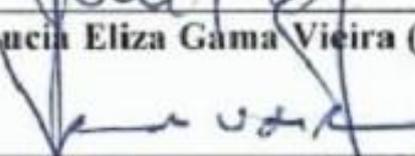
PALMAS - TO  
2019

**WILLIAN MATEUS DE SOUSA ALMEIDA**

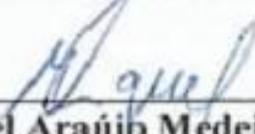
**ESTUDO DO BALANÇO ENERGÉTICO DO PROCESSO DE PIRÓLISE DE LODO  
DE ESGOTO EM ESCALA LABORATORIAL**

**COMISSÃO EXAMINADORA**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dra. Glaucia Eliza Gama Vieira (PPGA-UFT) (presidente e orientadora)**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dra. Yolanda Vieira De Abreu (PPGA-UFT) (examinadora interna)**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Emerson Adriano Guarda (PPGA-UFT) (examinadora interna)**

  
\_\_\_\_\_  
**Prof. Dr. Miguel Araújo Medeiros (UFT) (examinador externo)**

**Data da Defesa: 18/10/2019**

As sugestões da Comissão Examinadora e as Normas PGA para o formato da  
Dissertação  
foram contempladas

## DEDICATÓRIA

*À Deus; Meu filho; Minha esposa; Meus pais; Meus irmãos; Toda minha família e a todos aqueles que de certa forma acreditaram ou não em meu potencial.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus meu grande amigo e criador que me escolheu para vim à este mundo fazer a diferença, que me amou, me transformou e me ensinou que a vida é o maior presente que podemos ter;

A Meu Pai Mateus Parente de Almeida, homem que mais admiro neste mundo, pessoa de uma índole invejável, de uma sabedoria grandiosa, que com seus ensinamentos me ensinou a ser homem, que me incentivou à estar aonde estou, que sempre esteve ao meu lado nos momentos difíceis da vida, que trabalhou duro para sustentar 3 filhos e que hoje tem a honra de vê-los formando na profissão que sempre foi seu sonho;

A Minha Mãe Solimar Magalhães de Souza Almeida, mulher guerreira, que tenho um carinho e apresso grandioso, que sempre esteve ao meu lado nos momentos mais importantes da vida, que sempre me conduziu pelo caminho certo, presando pelos meus estudos e priorizando minha honestidade;

Aos meus irmãos Willians Davith de Souza Almeida e Lorhayne Well de Souza Almeida, que sempre serviram de apoio e consolo quando o irmão mais velho falhava, que sempre acreditaram no meu potencial e defenderam os ensinamentos ensinados por nossos pais, vocês são os melhores irmãos que um homem pode ter, desejo toda felicidade e que sejam os melhores engenheiros que este mundo já viu;

A minha esposa Natalia Tavares Cardoso de Almeida, pelo apoio e incentivo quando eu pensava em desistir, por acreditar em minha potencialidade e me incentivar a sempre estar entre os melhores. Por está aos meus lados nos melhores e piores momentos da vida, por sempre me ajudar e acreditar em meus sonhos. Por muitas vezes se abdicar de si para poder seguir juntamente comigo os meus caminhos;

Ao meu Filho José Mateus Tavares de Almeida, uma criança amável, admirável, inteligente, alegre e que mesmo com 3 anos de idade já tem me ensinado muitas coisas. Tem me tornado um homem a cada dia melhor. Obrigado meu filho por você existir. Você foi a melhor coisa que aconteceu na minha vida. Papai te ama.

A todos os meus amigos, colegas e companheiros que me deram a honra de ser um ser humano melhor, com diversos amigos;

A Universidade Federal do Tocantins, pela oportunidade de poder fazer a diferença nesta faculdade e poder aprender neste mestrado de Agroenergia;

Ao meu querido amigo e orientador de graduação Me. Leonardo Alves Lopes, pessoa admirável, com conhecimentos únicos, que sempre buscou ajudar e incentivar a sermos cada dia melhores, que me sugeriu o tema e me incentivou a entrar neste mestrado.

A minha Orientadora Gláucia Eliza Gama Viera, por todos os ensinamentos repassados, pela paciência e sabedoria, por acreditar em meu potencial e por compreender todos os momentos difíceis neste mestrado.

Aos professores em especial, Yolanda Viera Abrel, Emerson Guarda e Miguel Araujo, por fazerem parte da minha banca e me ajudarem a melhorar ainda mais essa pesquisa.

A todos os professores e professoras que passaram ao decorrer da minha, especialmente os professores do mestrado pelos ensinamentos transmitidos, um agradecimento especial ao professor Joenes. A disciplina de estatística ajudou muito.

Aos meus colegas de mestrado que junto comigo batalharam para estar aqui, tendo a honra de poder representar uma classe de vitoriosos que lutaram desde o começo para poderem concluir o Mestrado.

Aos amigos do Laboratório LEDBIO, Carla, Fernandes, Artur, Jefersson e todos os demais, pela parceria e companheirismo nas pesquisas;

Agradeço a todos e a todas que acreditaram em meu potencial, me estimulando a vencer e mostrar aquilo que realmente sou;

E por último agradeço a todos aqueles que duvidaram, falaram mal desta pesquisa, que não acreditaram nos resultados, quero dizer que graças à vocês fiz deste trabalho uma honra, busquei o meu melhor para provar que tudo é possível. Obrigado por duvidarem de mim, pois as dúvidas são adubos para o meu crescimento.

## EPÍGRAFE

*“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, porque o mundo pertence a quem se atreve e a vida é muito para ser insignificante.”*

Charles Chaplin

## RESUMO

Gera-se toneladas de Lodo de Esgoto nas ETE's pelo Brasil a fora, e a tendência é cada vez mais aumentar, devido o acesso ao saneamento básico quem vem crescendo pelo Brasil. Um dos maiores problemas relacionados ao lodo de ETE é o seu descarte, uma vez que é de costume depositá-lo em aterros sanitários, que muitas das vezes se encontram com uma superlotação. Além de possuir uma grande quantidade de elementos patógenos, o que contamina o solo, também tem um alto teor de combustão, o que tem gerado acidentes em aterros sanitários por todo o Brasil. Diante disso alternativas estão sendo traçadas mundialmente para poder conter este problema, pesquisas novas surgem a cada dia procurando uma solução para o Lodo de ETE. Dentre as soluções se encontra a pirólise, que possui vantagens na geração de subprodutos que agregam valor ao lodo . Visando novas utilizações do Lodo de ETE, o presente trabalho tem como objetivo analisar a viabilidade economia e o balanço energético de produtos obtidos na pirólise do lodo de esgoto em escala laboratorial. O processo de pirólise foi realizado em condições de temperatura a (450°C ), com uma taxa de aquecimento de ( 30°C/min) e em diferentes tempos (90 min – 120 min – 150 min – 180 min) a fim de avaliar a melhor condição de processo para obtenção de maior rendimento do bio-óleo, bio-char, bio-gás e fração aquosa, visando o menor consumo de energia possível. O bio-óleo e o Biochar obtidos foram caracterizados, determinados o teor de N,H,C,S e o Poder calorífico Superior. Os resultados mostram um valor de poder calorífico superior de 11,783 Mj/kg para o biochar e 34,35 Mj/kg para o bio-óleo. A análise estatística do delineamento inteiramente casualizado com o teste F de regressão, concluiu que o tempo, tanto a fração aquosa quanto a fração sólida ,não tem significância estatisticamente. O consumo de energia para pirólise em diferentes tempos variou de 6 kWh e 12 kWh, para o menor e maior tempo respectivamente. O Valor encontrado para o Bio-Óleo foi de U\$ 0,35 o kilograma, para o Biochar foi de U\$ 0,013 o kilograma, considerando o preço para revenda como matéria prima. Observou-se que o menor tempo de pirólise, 90 minutos, é o mais vantajoso economicamente, devido gastar menos energia para produção dos subprodutos. O valor em reais gasto em energia na pirólise de 90 minutos foi de R\$3,60, rendeu um valor de R\$ 0,00189 de biochar, bio-óleo e biogás para revenda como matéria prima, diminuindo o déficit para R\$ -3,5811. Já para utilização do biochar , bio-óleo e biogás em transformação de energia o valor obtido

foi de R\$ 0,0699, gerando um déficit menor do que o de revenda, R\$ - 3,5301. Pode-se concluir que a pirólise com o tempo de 90 minutos é a mais vantajosa, porém mesmo assim o valor gasto é superior ao valor obtido com os subprodutos, todavia os valores do biogás e da fração aquosa não foram considerados nessa pesquisa, mas o preço justifica-se pela redução do custo com operação do lodo de esgoto em aterro sanitário e da economia ambiental causada pelo processo de pirólise em relação ao lodo depositado em locais inadequados.

**Palavras-chave:** Lodo de esgoto, Bio-óleo, Bio-char, Bio-gás, Balanço energético.

## ABSTRACT

Tons of sewage sludge are generated in the WWTP across Brazil, and the trend is increasing, due to the access to basic sanitation that has been growing in Brazil. One of the biggest problems related to the WWTP sludge is its disposal, as it is customary to dispose of it in landfills, which are often overcrowded. In addition to having a large amount of pathogens, which contaminates the soil, also has a high combustion content, which has caused accidents in landfills throughout Brazil. Given that alternatives are being mapped worldwide to contain this problem, new research is emerging every day looking for a solution for the WWTP sludge. Among the solutions is pyrolysis, which has advantages in the generation of by-products that add value to the sludge. Aiming at new uses of the WWTP sludge, the present work aims to analyze the economical viability and the energy balance of products obtained in the sewage sludge pyrolysis at laboratory scale. The pyrolysis process was performed under temperature conditions at (450°C), with a heating rate of (30°C / min) and at different times (90 min - 120 min - 150 min - 180 min) in order to evaluate the best condition. of process to obtain higher yield of bio-oil, bio-char, bio-gas and aqueous fraction, aiming at the lowest possible energy consumption. The obtained bio-oil and Biochar were characterized, determined the content of N, H, C, S and the superior calorific value. The results show a higher calorific value of 11,783 Mj / kg for biochar and 34,35 Mj / kg for bio-oil. Statistical analysis of the completely randomized design with the F regression test concluded that the time, both the aqueous fraction and the solid fraction, was not statistically significant. Energy consumption for pyrolysis at different times ranged from 6 kWh and 12 kWh to the shortest and longest respectively. The value found for Bio-Oil was \$ 0.35 per kilogram, for Biochar was \$ 0.013 per kilogram, considering the resale price as raw material. It was observed that the shortest pyrolysis time, 90 minutes, is the most economically advantageous because it uses less energy to produce the byproducts. The amount in reais spent on energy in the 90-minute pyrolysis was R \$ 3.60, yielding a value of R \$ 0.00189 of biochar, bio-oil and biogas for resale as raw material, reducing the deficit to R \$ -3. , 5811. For the use of biochar, bio-oil and biogas in energy transformation, the value obtained was R \$ 0.0699, generating a smaller deficit than the resale, R \$ - 3.5301. It can be concluded that pyrolysis with 90 minutes time is the most advantageous, but even so the value spent is higher than the value obtained with the byproducts, however the biogas and aqueous

fraction values were not considered in this research, but the The price is justified by the reduction in the cost of operating sewage sludge in landfill and the environmental savings caused by the pyrolysis process in relation to sludge deposited in inappropriate places.

**Key words:** Sewage sludge, Bio-oil, Bio-char, Bio-gas, Energy balance.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Vista Aérea da ETE Prata .....	24
<b>Figura 2:</b> Esquema da unidade de pirólise em escala laboratorial Fonte: TEIXEIRA , 2014. ....	29
<b>Figura 3:</b> Diagrama de funcionamento de uma ETE (Estação de Tratamento de Esgotos) localizada em Palmas-TO .....	41
<b>Figura 4:</b> Variantes do processo de pirólise .....	44
<b>Figura 5:</b> Bio-óleo obtido do processo de pirólise do lodo de esgoto .....	45
<b>Figura 6:</b> Comparação da Matriz Elétrica 2013 e 2018. ....	48
<b>Figura 7:</b> Consumo de Energia na Indústria .....	49
<b>Figura 8:</b> Gráfico da regressão linear e quadrática para fração aquosa.....	60
<b>Figura 9:</b> Gráfico da regressão Linear para fração do bio-óleo .....	62
<b>Figura 10:</b> Gráfico da regressão para fração gasosa .....	64
<b>Figura 11:</b> Gráfico da regressão quadrática para fração sólida.....	66

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Métodos e fórmulas utilizadas nas análises imediatas das amostras de lodo de Esgoto .....	25
<b>Tabela 2:</b> Fórmulas para cálculo dos rendimentos dos produtos da pirólise de lodo de esgoto.....	30
<b>Tabela 3:</b> Temperaturas e número de repetições organizados em Blocos Inteira-mente Casualizados.....	30
<b>Tabela 4:</b> Dados do mercado de commodities para cálculo do custo de produção de bio-óleo por pirólise em escala laboratorial.....	32
<b>Tabela 5:</b> Cálculo do valor estimado do Biochar.....	33
<b>Tabela 6:</b> Valor do KWh dos Produtos.....	35
<b>Tabela 7:</b> Comparação do Valor do kWh .....	36
<b>Tabela 8:</b> Comparação do gasto com a pirólise e o valor dos produtos obtidos.....	37
<b>Tabela 9:</b> Teor de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo do lodo de esgoto.....	51
<b>Tabela 10:</b> Densidade, Poder calorífico e pH do lodo de esgoto.....	53
<b>Tabela 11:</b> Valores médios obtidos da análise elementar do lodo de esgoto .....	55
<b>Tabela 12:</b> Valores médios obtidos da análise elementar do Biochar.....	56
<b>Tabela 13:</b> Valores médios obtidos da análise elementar do Bio-Óleo.....	57
<b>Tabela 14:</b> Valores do Rendimento de cada tempo e repetições.....	58
<b>Tabela 15:</b> Análise de variância para produção de fração aquosa a partir da pirólise de lodo de Esgoto .....	59
<b>Tabela 16:</b> Análise de variância para produção de fração aquosa a partir da pirólise de lodo de Esgoto - Regressão .....	59
<b>Tabela 17:</b> Análise de variância para produção de fração do bio-óleo a partir da pirólise de lodo de Esgoto .....	61
<b>Tabela 18:</b> Análise de variância para produção de fração do bio-óleo a partir da pirólise de lodo de Esgoto - Regressão.....	61
<b>Tabela 19:</b> Análise de variância para produção de fração gasosa a partir da pirólise de lodo de Esgoto .....	63
<b>Tabela 20:</b> Análise de variância para produção de fração gasosa a partir da pirólise de lodo de Esgoto - Regressão .....	63

<b>Tabela 21:</b> Análise de variância para produção de fração sólida a partir da pirólise de lodo de Esgoto .....	65
<b>Tabela 22:</b> Análise de variância para produção de fração sólida a partir da pirólise de lodo de Esgoto- Regressão .....	65
<b>Tabela 23:</b> Consumo total da pirólise em diferentes tempos. ....	69
<b>Tabela 24:</b> Valor do Bio-Óleo.....	70
<b>Tabela 25:</b> Valor do Biochar .....	71
<b>Tabela 26:</b> Valor do Bio-óleo e biochar em energia .....	72
<b>Tabela 27:</b> Valor Comparação dos valores dos Subprodutos .....	73
<b>Tabela 28:</b> Comparação entre o gasto energético e o valor produzido pela pirólise.	74
<b>Tabela 29:</b> Diferença entre o gasto energético da pirólise e o valor dos produtos produzidos pela pirólise.....	75
<b>Tabela 30:</b> Diferença entre o gasto energético e o valor dos subprodutos produzido pela pirólise. ....	76

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO I</b> .....	<b>18</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>CAPÍTULO II</b> .....	<b>21</b>
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	<b>22</b>
1.1 ESPECÍFICOS.....	22
<b>CAPÍTULO III</b> .....	<b>23</b>
<b>1. METODOLOGIA</b> .....	<b>24</b>
1.1 ÁREA DO ESTUDO.....	24
1.2 PREPARO DAS AMOSTRAS.....	25
1.3 ÁLISES IMEDIATAS.....	25
1.3.1 TEOR DE UMIDADE.....	25
1.3.2 TEOR DE SÓLIDOS VOLÁTEIS.....	26
1.3.3 TEOR DE CINZAS.....	26
1.3.4 TEOR DE CARBONO FIXO.....	26
1.4 DENSIDADE DO LODO.....	27
1.5 PH DO LODO.....	27
1.6 PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO LODO DE ESGOTO, DO CARVÃO ATIVADO E DO BIO-ÓLEO (PCS)	27
1.7 ANÁLISE ELEMENTAR DO LODO, DO ECOCARVÃO ATIVADO E DO BIO-ÓLEO.....	28
1.8 PIRÓLISE.....	28
1.8.1 PROCESSO DE PIRÓLISE.....	28
1.9 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	30
1.10 AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DA PIRÓLISE.....	31
1.10.1 AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA NA PIRÓLISE.....	31
1.11 VALOR DOS PRODUTOS.....	31
1.11.1 VALOR DO BIO-ÓLEO.....	31
1.11.2 VALOR DO BIOCHAR.....	32
1.11.3 VALOR DO BIOGÁS.....	34
1.11.4 VALOR TOTAL.....	34
1.12 BALANÇO ENERGÉTICO.....	35
1.13 GASTO COM A PIRÓLISE.....	36
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>39</b>

<b>1. REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>40</b>
1.1 ESGOTO SANITÁRIO .....	40
1.2 CARACTERÍSTICA DO LODO DE ESGOTO .....	41
1.3 PIRÓLISE .....	42
1.3.1 UTILIZAÇÃO DA PIRÓLISE.....	43
1.4 BIO-ÓLEO .....	45
1.5 BIOGÁS.....	46
1.6 BIOCHAR .....	46
1.7 CONSUMO DE ENERGIA NO BRASIL .....	47
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>50</b>
<b>1. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>51</b>
1.1 ANÁLISES IMEDIATAS .....	51
1.2 DENSIDADE , PODER CALORÍFICO SUPERIOR E PH.....	53
1.2.1 PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO BIOCHAR.....	53
1.2.2 PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO BIO-ÓLEO.....	54
1.2.3 PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO BIOGÁS .....	54
1.3 ANÁLISE ELEMENTAR .....	55
1.3.1 ANÁLISE ELEMENTAR DO LODO DE ESGOTO .....	55
1.3.2 ANÁLISE ELEMENTAR DO BIOCHAR .....	56
1.3.3 ANÁLISE ELEMENTAR DO BIO-ÓLEO .....	57
1.4 RENDIMENTOS DOS PRODUTOS DA PIRÓLISE .....	57
1.4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA FRAÇÃO AQUOSA .....	58
1.4.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA FRAÇÃO DO BIO-ÓLEO.....	60
1.4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA FRAÇÃO GASOSA .....	62
1.4.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA FRAÇÃO SÓLIDA.....	64
1.5 AVALIAÇÃO DO GASTO ENERGÉTICO.....	67
1.5.1 CONSUMO DE ENERGIA NA PIRÓLISE.....	67
1.6 VALOR DOS PRODUTOS.....	69
1.6.1 VALOR DO BIO-ÓLEO .....	69
1.6.2 VALOR DO BIOCHAR .....	70
1.6.3 VALOR DO BIOGÁS .....	71
1.6.4 VALOR TOTAL DOS SUBPRODUTOS .....	72
1.7 BALANÇO ENERGÉTICO .....	72
1.8 GASTO COM A PIRÓLISE .....	74

<b>CAPÍTULO VI.....</b>	<b>77</b>
<b>1. CONCLUSÕES .....</b>	<b>78</b>
<b>CAPÍTULO VII.....</b>	<b>80</b>
<b>1. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>81</b>

## CAPÍTULO I

## 1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento incessante da indústria e do consumo, a sociedade tende a produzir cada vez mais dejetos nas redes coletoras de esgoto. Com o crescimento das cidades, e do saneamento básico, cada vez mais famílias estão tendo acesso ao processo de tratamento de dejetos oriundos do esgotamento sanitário. A gestão dos resíduos sólidos é essencial para a qualidade do meio ambiente e à saúde pública. (CUNHA *et al.*, 2019).

O tratamento do Esgoto Sanitário teve início no século XIX, nesta época já era eminente a degradação de corpos hídricos. Devido a urbanização e o crescimento populacional, bem como a criação de novas indústrias. (VIEIRA, REGÔ E TEIXEIRA, 2017).

Com isso houve um aumento de dejetos para serem tratados nas estações de tratamento. Sendo o Lodo o principal subproduto em termos de volume. A sua natureza depende do processo empregado no tratamento do esgoto e da fonte geradora. (FONTES, 2011).

Geralmente é formado por uma junção de materiais sólidos orgânicos e minerais, que sofreram alterações químicas, físicas e até mesmo biológicas. Podendo ou não conter uma significativa parcela de substâncias tóxicas, como por exemplo metais pesados e microrganismos patogênicos. (TRAZZI *et al.*, 2018)

Sendo assim a eliminação do Lodo é um problema não somente nacional, mas como mundial. Muitas empresas o depositam nos aterros sanitários, porém este material é de fácil combustão, o que pode acarretar em sérios problemas. (MOURA, 2015).

Tecnologias estão sendo desenvolvidas ao longo dos anos para solucionar este problema, uma delas é a pirólise do lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETE). Que é um processo termoquímico que envolve a degradação térmica na ausência de oxigênio, e pode ser utilizada para transformar a biomassa em produtos de grande interesse. A técnica tem sido estudada como uma alternativa promissora para o lodo, já que os óleos e gorduras, provenientes da alimentação, podem ser transformados em óleos combustíveis. (XIN *et al.*, 2014).

Com o crescimento populacional o lodo tem crescido conseqüentemente. E os devidos cuidados com sua destinação final não têm levado em consideração as implicações ambientais. O que pode ocorrer a contaminação de solos, água, ar e do meio ambiente como um todo. Desta forma, é necessário que haja a utilização de procedimentos e métodos que sanem estes problemas. A pirólise é uma técnica que pode auxiliar no tratamento destes resíduos, além de produzir energia e óleos combustíveis. (MADEIRA, 2017; FONTS et al., 2012; BRIDGWATER, 2012; SHAO et al., 2010).

O presente estudo tem a finalidade de discutir a utilização da pirólise como alternativa para produção de energia e óleos combustíveis a partir do lodo de esgoto. Uma vez que este é um problema mundial e vem crescendo consideravelmente ao longo dos tempos. Visa também realizar um levantamento do balanço energético dos subprodutos gerados na pirólise, e o consumo de energia no processo de obtenção destes subprodutos.

## CAPÍTULO II

## 1. OBJETIVOS

Analisar a o balanço energético do processo de pirólise de lodo de esgoto em escala laboratorial e estimar o preço dos produtos, bio-óleo, biochar e biogás.

### 1.1 ESPECÍFICOS

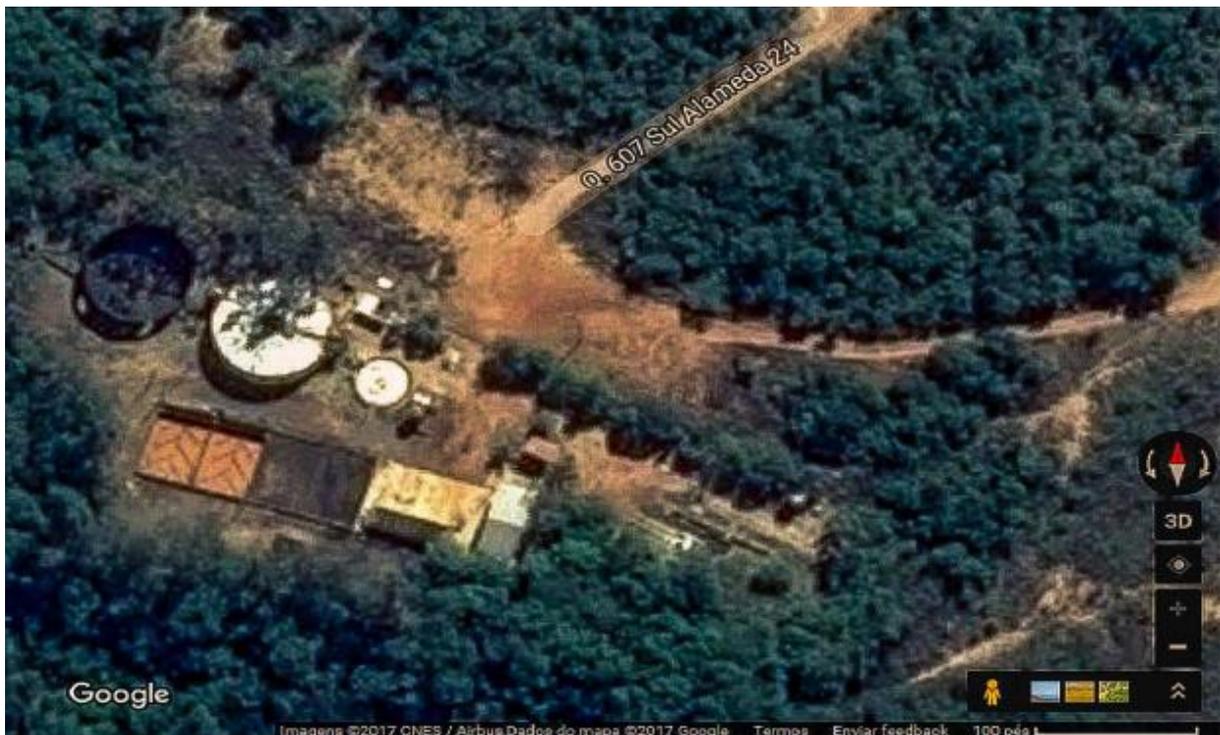
- Analisar as características físico-químicas do lodo de esgoto anaeróbio;
- Analisar o consumo energético da máquina de pirólise em diferentes tempos de residência;
- Caracterizar o bio-óleo e o bio-char do pontos de vista físico-químico;
- Avaliar o custo de produção do bio-óleo e bio-char em escala laboratorial;
- Estimar o preço do bio-óleo e biochar apli

### **CAPÍTULO III**

## 1. METODOLOGIA

### 1.1 ÁREA DO ESTUDO

As Amostras foram coletadas na Estação de Tratamento de Esgoto Prata – ETE PRATA, na cidade de Palmas-TO, localizada nas Quadras 607 Sul e 709 Sul, próximo a Avenida LO-15, conforme figura 01. Foram coletadas em (julho/agosto/setembro de 2016) para o trabalho de Madeira (2017) e Sousa (2017), e depositadas no depósito do Laboratório de Ensaio e Desenvolvimento em Biomassa e Biocombustíveis – LEDBIO, em sacos herméticos. O Sistema da ETE Prata é constituído por um processo de tratamento que consiste de reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA), seguido de Flotador de Ar Dissolvido (FAD), com uma capacidade instalada de 70 L/s. O efluente tratado pela ETE e depositado no córrego Prata. Os resíduos sólidos gerados pelo tratamento da água do município, é tratado com cal virgem, desidratado por centrifugação e encaminhados ao leito de secagem natural. levado ao Laboratório de Ensaio e Desenvolvimento em Biomassa e Biocombustíveis (LEDBIO) da Universidade Federal do Tocantins. Foram armazenadas em sacos Plásticos para manter a umidade constante.



**Figura 1:** Vista Aérea da ETE Prata

Fonte : Google Earth, (2017).

## 1.2 PREPARO DAS AMOSTRAS

As amostras foram coletadas em (julho/agosto/setembro de 2016) para o trabalho de Madeira (2017) e Sousa (2017), e depositadas no depósito do Laboratório de Ensaio e Desenvolvimento em Biomassa e Biocombustíveis – LEDBIO, na Universidade Federal do Tocantins - UFT. Foram previamente secas em forno solar artesanal, antes de serem armazenadas em sacos plásticos. Em Maio de 2019 essas amostras foram trituradas no Triturador Moinho de Marca Marconi , Modelo MA 630/1. Foram homogeneizadas em peneira TYLER com abertura de 0,59 mm (mesh 28).

## 1.3 ÁLISES IMEDIATAS

As análises imediatas realizadas, seus respectivos métodos e fórmulas utilizadas para cálculo estão apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1:** Métodos e fórmulas utilizadas nas análises imediatas das amostras de lodo de Esgoto

ANÁLISE	MÉTODO	FÓRMULA PARA CÁLCULO	
Teor de Umidade	ASTM D3173-85	$U (\%) = (PA - PS)/A \times 100$	Eq. 01
Teor de sólidos Voláteis	ASTM D2415-66	$V (\%) = (PA - PS)/A \times 100$	Eq. 02
Teor de Cinzas	ASTM D2415-66	$C (\%) = (PS - PC)/A \times 100$	Eq. 03
Teor de Carbono Fixo	Salgado (2005)	$F (\%) = 100 - (U + C + V)$	Eq. 04

Legenda : PA = peso do cadinho (g) + peso da amostra (g) ; PS= Peso da Cadinho (g) + peso da amostra após aquecimento ; PC = Peso da Cadinho vazio (g) ; A = Peso da Amostra (g)

Fonte : Autor (2019)

### 1.3.1 Teor de umidade

Para determinação do teor de umidade foi pesado em triplicata 1g do lodo de esgoto triturado , adicionado a um cadinho de porcelana com peso constante já pré-determinado e aquecido em estufa, à uma temperatura constante de 110 c<sup>o</sup> durante o período de 1 hora. Em sequencia foi transferido ao dessecador por um período de 30 minutos , logo em seguida foi pesado em balança. O procedimento foi repetido até chegar a massa constante. A equação para a determinação do teor de umidade é a primeira da tabela 1.

### **1.3.2 Teor de sólidos voláteis**

Para determinação do teor de sólidos voláteis foi pesado em triplicata 1g do lodo de esgoto triturado , adicionado a um cadinho de porcelana com peso constante já pré-determinado e aquecido em forno mufla, à uma temperatura constante de 550 c<sup>o</sup> durante o período de 1 hora. Em sequencia foi transferido ao dessecador por um período de 30 minutos , logo em seguida foi pesado em balança. O procedimento foi repetido até chegar a massa constante. A equação para a determinação do teor de umidade é a segunda da tabela 1.

### **1.3.3 Teor de cinzas**

Para determinação do teor de cinzas foi pesado em triplicata 4g do lodo de esgoto triturado , adicionado a um cadinho de porcelana com peso constante já pré-determinado e aquecido em forno mufla, à uma temperatura constante de 900 c<sup>o</sup> durante o período de 1 hora. Em sequencia foi transferido ao dessecador por um período de 30 minutos , logo em seguida foi pesado em balança. O procedimento foi repetido até chegar a massa constante. A equação para a determinação do teor de umidade é a terceira da tabela 1.

### **1.3.4 Teor de carbono fixo**

O teor de carbono fixo foi calculado por diferença, de forma simultânea ao andamento das análises através de medida indireta direcionada por Salgado (2005), segundo a equação 4 da Tabela 1.

#### 1.4 DENSIDADE DO LODO

O método utilizado foi adaptado do método de análise de solos (EMBRAPA SOLOS, 1997). Adicionou-se 20 g em triplicata da amostra sólida de lodo em um balão volumétrico de 50 ml. Em seguida foi acrescentado álcool 70 % e agitado até que a amostra ficou completamente coberta. Após este procedimento a amostra ficou em repouso por 15 min. Logo após completou-se o balão com álcool até atingir 50 mL. A densidade do lodo digerido foi obtida a partir do cálculo abaixo, eq. 5:

$$Dr = m/(Vb-Va) \quad (\text{eq.5})$$

Onde:

Dr = Densidade real (g/mL)

m = massa da amostra (g)

Vb = volume do balão volumétrico (mL)

Va = volume de álcool gasto para completar o balão volumétrico (mL)

#### 1.5 PH DO LODO

O pH do lodo de esgoto foi medido em suspensão de uma mistura lodo : água nas proporções 1:5, m:v, para isto 1g de lodo digerido foi adicionada a um Becker de 10 mL, completando o mesmo com água destilada, após o tempo de estabilização o pH foi quantificado com auxílio do pHmetro da marca Marte, modelo MB10, com eletrodo combinado Ag/AgCl e precisão relativa de 0,01% (Fe), de acordo YUAN *et al.*, (2011).

#### 1.6 PODER CALORÍFICO SUPERIOR DO LODO DE ESGOTO, DO CARVÃO ATIVADO E DO BIO-ÓLEO (PCS)

O PCS das amostras foi determinado em bomba calorimétrica da marca IKA, modelo C200, composto por um vaso termicamente isolado do ambiente (adiabático), preenchido com água, com volume de 2L, dotado de um dispositivo de ignição através de corrente elétrica. A combustão foi efetuada em excesso de O<sub>2</sub> e pressão de 30 bar. Assim determinou-se, o poder calorífico superior das seguintes amostras: lodo de

esgoto e ecocarvão ativado, para isso, uma amostra de 1g de cada amostra foi posta em um cadinho de quartzo montado dentro de um recipiente metálico (bomba calorimétrica). Após a instalação das amostras, o recipiente foi hermeticamente fechado e pressurizado em excesso de oxigênio e pressão de 30bar, de acordo com o método ASTM D-240.

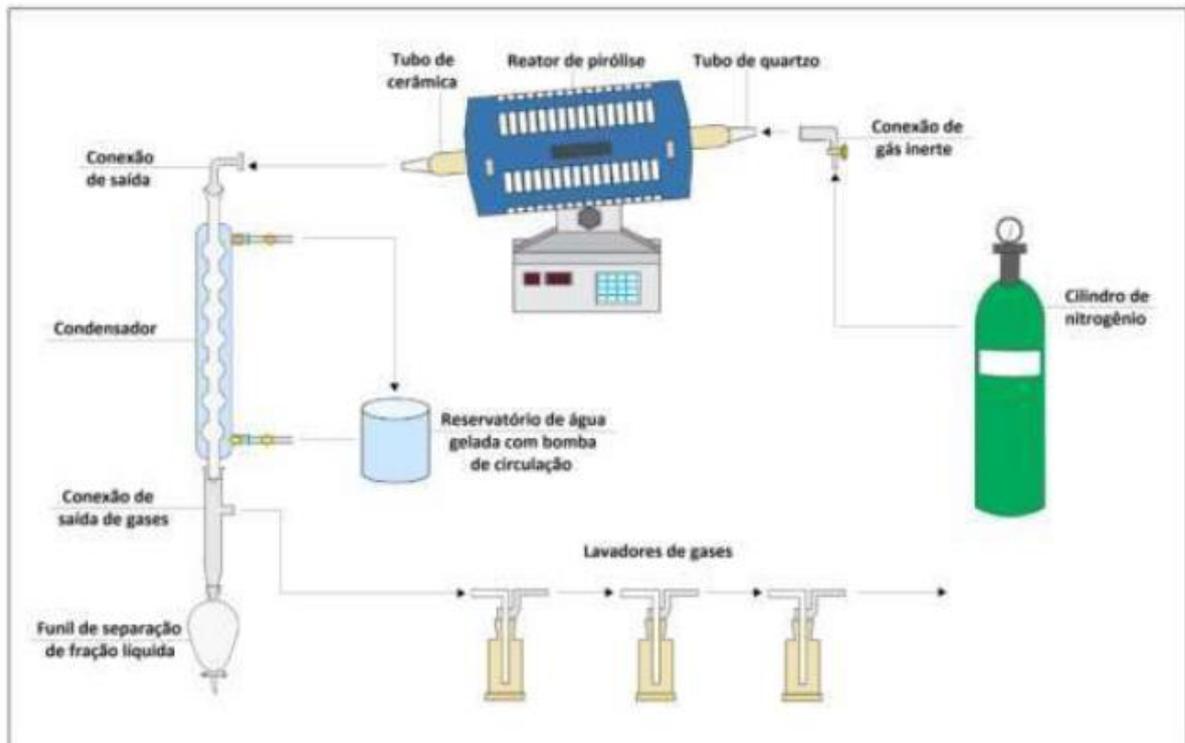
## 1.7 ANÁLISE ELEMENTAR DO LODO, DO ECOCARVÃO ATIVADO E DO BIO-ÓLEO

Os teores de Carbono, Hidrogênio, Nitrogênio e Enxofre (C,H,N,S) das amostras foram determinados com auxílio de um analisador elementar CHNS, marca: VARIO, modelo: MACRO Vario Cube. Os ensaios foram realizados em triplicata de acordo com a ASTM D5373-16, a qual se baseia na queima individual das amostras em ambiente oxidante ao passar por dois fornos, um de combustão e outro de redução, com temperaturas de 1150°C e 850°C respectivamente.

## 1.8 PIRÓLISE

### 1.8.1 Processo de pirólise

O processo em batelada foi realizado na unidade de pirólise em escala laboratorial do Laboratório de Ensaio e Desenvolvimento em Biomassa e Biocombustíveis (LEDBIO), constituída por: reator de leito fixo da marca EDG Modelo FTHI Bipartido, tubo de cerâmica, tubo de quartzo, sistema de alimentação de gás inerte, sistema de condensação, sistema de separação de fração líquida e lavadores de gases, conforme Figura 2.



**Figura 2:** Esquema da unidade de pirólise em escala laboratorial  
 Fonte: TEIXEIRA , 2014.

Uma alíquota de 40 gramas da amostra composta por lodo de esgoto e catalisador foi inserida no interior do tubo de quartzo e isolada em suas extremidades por lâ de quartzo. Em seguida o tubo foi introduzido no reator e acoplado a uma conexão ligada a linha de gás nitrogênio, com a finalidade de se obter um processo em atmosfera inerte. A outra extremidade do tubo de quartzo foi unida através de um conector ao condensador. Após o condensador, foi utilizado um tubo de conexão responsável pela saída dos gases não condensáveis, direcionados a três lavadores de gases, cujos dois primeiros continham água destilada e o último uma solução de hidróxido de sódio a 10% (p/v). Ao final do processo, a fração sólida retida dentro do tubo de quartzo foi coletada. A fração líquida, composta pelo bio-óleo e a fração aquosa, foi recuperada através de um funil de separação de fases. O bio-óleo residual aderido às vidrarias durante o processo foi obtido através de lavagem com hexano, em seguida recuperado em um evaporador rotativo. As frações coletadas foram pesadas para cálculo de rendimentos de acordo com as formulas da tabela 2.

**Tabela 2:** Fórmulas para cálculo dos rendimentos dos produtos da pirólise de lodo de esgoto

Frações Obtidas (%)	Fórmulas	
Fração Aquosa	$FA\% = Ag/C \times 100$	EQ.6
Fração Bio-Óleo	$FB\% = Bg/C \times 100$	EQ.7
Fração Sólida	$FS\% = Sg/C \times 100$	EQ.8
Fração Gasosa	$FG\% = 100 - (FA\% + FB\% + FS\%)$	EQ.9

Onde: Ag = massa em gramas da fração aquosa obtida (g); Bg = massa em gramas da fração bio-óleo obtida (g); Sg = massa em gramas da fração sólida obtida (g); C = massa da amostra adicionada ao reator (g); FA% = Porcentagem de fração aquosa obtida; FB% = Porcentagem de Bio-Óleo obtida ; FS% = Porcentagem de fração sólida obtida; FG% = porcentagem de fração gasosa obtida.

Fonte : Autor (2019)

### 1.9 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para realização dos experimentos foi adotado o DELINEAMENTO INTEIRAMENTE CASUALIZADO (DIC) com 4 tempos de pirólise diferentes, cada um com 4 repetições. O experimento visa obter 4 tipos de elementos diferentes para cada tratamento e repetições (fração sólida, gasosa, aquosa e bio-óleo) em relação aos parâmetros de processo. Os fatores utilizados no processo foram: temperatura (°C) fixa em 450 °C, taxa de aquecimento (°C.min<sup>-1</sup>) fixa em 30° e tempo (min), que a variável. Os níveis para cada fator são descritos a seguir na Tabela 3.

**Tabela 3:** Temperaturas e número de repetições organizados em Blocos Inteiramente Casualizados.

REPETIÇÕES	TEMPOS			
	90 min	120 min	150 min	180 min
1	X1	Y1	Z1	W1
2	X2	Y2	Z2	W2
3	X3	Y3	Z3	W3
4	X4	Y4	Z4	W4

Fonte: Autor (2019)

X1, X2, X3 E X4 representam os valores dos 4 ensaios realizados na tempo de 90 minutos, Seguindo assim esta sequência para os demais tempos. Serão

realizados 4 Delineamentos inteiramente casualizados, juntamente com a ANOVA e o Teste de Regressão. Onde cada Delineamento tratará de um subproduto, sendo eles: fração sólida, gasosa, aquosa e bio-óleo. Logo após será feita a análise se o tempo de permanência na pirólise influencia estatisticamente na produção de cada subproduto.

## 1.10 AVALIAÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA DA PIRÓLISE

### 1.10.1 Avaliação do consumo de energia na pirólise

A Fórmula usada no cálculo do processo de pirólise, uma vez que o material foi seco em forno elétrico, o que aumenta o consumo de Energia. Desta forma Foi analisado o consumo de Energia da máquina de pirólise tipo Forno FT – HI/40 10P Bipartido, sendo de 4000 Watts de potência conforme o fabricante EDG equipamentos. Onde gerou-se a fórmula 10 a seguir.

$$Q_{\text{pirólise}} = \text{Pot. pir} \times h \quad (\text{Eq.10})$$

Onde: Pot.pir é a potência da máquina de pirólise em Kw, que neste caso é de 4 kW. E h é o tempo em horas de duração da pirólise.

## 1.11 VALOR DOS PRODUTOS

### 1.11.1 Valor do Bio-óleo

Para o cálculo do valor comercial do bio-óleo foi utilizado dados do mercado de commodities conforme (tabela 4), onde pegou-se o valor do barril de petróleo Brent internacional e calculou o valor do barril de bio-óleo, uma vez que é adotado para o bio-óleo 70% do valor do óleo bruto convencional comercializado (GARY & HANDWERK, 1984; KIM & PARKER, 2008). Perry & Chiltons (1984) atribuíram um valor de densidade de 0,9 kg/dm<sup>3</sup> para o bio-óleo obtido através de pirólise de lodo. A Densidade do petróleo tipo leve é de 0,87 kg/dm<sup>3</sup>, conforme a Agência Nacional de Petróleo (ANP). O valor do kWh conforme tabela da Energisa (2018) para classe

Residencial sem Benefício é de 0,60008 R\$/kWh. Sendo assim Foi elaborada a Tabela 4 para determinação do valor do Bio-óleo por litro e por kilograma. Onde no final foi comparado com o valor da Energia em kWh. Todos os dados da tabela foram usados valores de referência como ano de 2018.

**Tabela 4:** Dados do mercado de commodities para cálculo do custo de produção de bio-óleo por pirólise em escala laboratorial.

Dados do petróleo		Dados do bio-óleo	
Valor do barril de Petróleo (\$)	\$ -	Valor do barril Bio-óleo	VBB = VBP * 0,7
Volume do barril (L)	158,987	Volume do barril (L)	158,987
Densidade do Petróleo Kg/dm <sup>3</sup>	0,87	Densidade do Bio-óleo Kg/dm <sup>3</sup>	0,9
Massa do barril	M = V x D	Massa do barril	M = V x D
Preço por litro petróleo (\$)	PLP = VBP / V	Preço por litro Bio-óleo	PLB = VBB / V
Preço por kg petróleo	PKP = VBP / M	Preço por kg Bio-óleo	PKB = VBB / M
Cotação do dólar	\$ -	Cotação do dólar	\$ -
Preço do kWh (R\$/KWH)	0,600008	Preço do kWh (R\$/KWH)	0,600008

Legenda : VBP = Valor do Barril de Petróleo ; VBB = Valor do Barril de Bio-óleo; V = Volume do barril ; M = Massa do barril; D = Densidade ; PLP = Preço por Litro de Petróleo ; PKP = Preço por Kg de Petróleo; PLB = Preço por Litro de Bio-óleo ; PKB = Preço por Kg de Bio-óleo

Fonte: Autor (2019)

Na tabela o preço do Bio-óleo em Kilogramas é dado em dólares, sendo assim o valor foi transformado para reais através da equação:

$$PBK = PKB \text{ tabela} * \text{Cotação do dólar} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde PBK é o Preço do Bio-óleo em reais por quilograma e cotação do dólar é o valor do dólar em reais tendo como referência o ano de 2018.

### 1.11.2 Valor do BioChar

Conforme Trazzi *et al.* (2018) O biocarvão pode ser utilizado para correção de pH do solo e melhoramento da fertilidade, também é utilizado para tratamento de corpos hídricos. Novotny *et al.* (2015) afirma que o biochar é um substituto para o calcário, pois apresenta boas propriedades de correção de pH do solo.

Segundo Blackwell (2010), em uma pesquisa realizada na Austrália, o Biochar tem o potencial de reduzir a necessidade de fertilizantes, podendo aumentar o rendimento das culturas cultivadas. O autor conclui através de um fluxo de caixa que o biochar pode ter um custo inicial AU \$ de 40 a 90 / há. Concluiu que o Biochar pode resultar em um aumento de 10% no rendimento do plantio e gerar uma economia de 50% de Fertilizantes, como por Exemplo o Fósforo. Em sua pesquisa concluiu que a melhor aplicação era de 6 toneladas de biochar por hectare, o que reduziria a aplicação de 50 toneladas por hectare de fertilizante, representando 50% da quantidade total de fertilizantes que seriam aplicadas, ou seja, 100 toneladas por hectare. Conforme o autor o custo total máximo de biochar é de AU \$ 170/ha.

Uma fórmula foi desenvolvida com base em Trazzi *et al.* (2018), Novotny *et al.* (2015) e Blackwell (2010), para poder estipular o custo do biochar. Tendo como base o valor mínimo e máximo de aplicação do Biochar, conforme a pesquisa de Blackwell (2010). A tabela 5 nos mostra o passo-a-passo.

**Tabela 5:** Cálculo do valor estimado do Biochar

<b>Dados do biochar (Blackwell (2010))</b>	
Preço mínimo de aplicação do bio char (AU\$)/há	\$ 40,00
Preço máximo de aplicação do bio char (AU\$)/há	\$ 170,00
cotação de AU\$ em dólar (2018)	\$ 0,7441
toneladas de biochar por hectare	6
Preço mínimo do biochar por toneladas (\$)	$PMB = (PMAB \times C) / T$
Preço máximo do biochar por toneladas (\$)	$PMXB = (PMXAB \times C) / T$
Preço médio do biochar por toneladas (\$)	$Pmédio = (PMB + PMXAB) / 2$

Legenda : PMB = Preço mínimo do biochar por toneladas (\$) ; PMXB = Preço máximo de biochar por toneladas (\$) ; PMAB = Preço mínimo de aplicação do biochar (AU\$/há); PMXAB = Preço máximo de aplicação do biochar (AU\$/há); C = Cotação de AU\$ em dólar, ano de referência 2018; T = toneladas de biochar po hectare; Pmédio = Preço médio do biochar por toneladas (\$)

Conforme essa tabela foi gerada a seguinte fórmula:

$$PBK = (P_{\text{médio}} / 1000) \times \text{cotação do dólar em reais} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

PBK é o preço do Biochar em Reais por quilogramas e  $P_{\text{médio}}$  é o preço médio do Biochar em Toneladas.

### 1.11.3 Valor do Biogás

O valor do biogás foi determinado por equivalência, conforme a literatura brasileira, autores como Oliveira (2009), Lima e Passamani (2012) e Saiki (2018), afirmam que 1m<sup>3</sup> de biogás equivale a 0,55 litros de óleo diesel. Conforme Honório (2009) a densidade do biogás é de 0,72 kg/m<sup>3</sup>. Dividindo 1m<sup>3</sup> de Biogás por 0,72 kg/m<sup>3</sup> encontramos o valor de 1,39 m<sup>3</sup> de Biogás em 1 kg de Biogás. Multiplicando 1,39 m<sup>3</sup> de Biogás por 0,55 litros de Diesel, obtemos o valor de 0,7645 litros de Diesel por quilograma de Biogás. Com base nessa informação a seguinte equação foi formulada.

$$PBG = 0,7645 \times P_{\text{médioD}} \quad (\text{Eq. 13})$$

Onde:

PBG é o preço do Biogás em Reais por Quilogramas e  $P_{\text{médioD}}$  é o preço médio do Biodiesel tendo como referência o ano de 2018.

### 1.11.4 Valor Total

O valor total dos produtos será calculado com a seguinte fórmula:

$$PT = PBK + PKB + PBG \quad (\text{Eq. 14})$$

Onde: PT é o preço total, PBK é o preço do Biochar em Reais por Quilogramas, PKB é o preço em Reais por quilogramas de Bio-óleo, e PBG é o preço do Biogás em Reais por Quilograma..

## 1.12 BALANÇO ENERGÉTICO

O balanço energético da pirólise foi calculado conforme o poder calorífico dos seus produtos, conforme a tabela a seguir. O Valor de kWh foi concebido conforme tabela da Energisa referente ao ano de 2018. Os cálculos utilizados estão apresentados na tabela 06.

**Tabela 6:** Valor do kWh dos Produtos

Produtos	Valor calculado R\$/kg	Poder Calorífico (Mj/kg)	Equivalencia em energia kWh	Valor do kWh - (Reator LEDBIO)	Valor do kWh (Energisa)	Valor em reais por kg de produtos (Energisa)
Bio-óleo	VCBO	PCB	E.BIO-ÓLEO = PCB * 0,277778	VKBO = VCBO / E.BIO-ÓLEO	0,600008	Valor do Bio-óleo = E.BIO-ÓLEO * 0,600008
Biochar	VCBC	PCBC	E.BIOCHAR = PCBC * 0,277779	VKBC = VCBC / E.BIOCHAR	0,600008	Valor do BioCHAR = E.BIOCHAR * 0,600009
Biogás	VCBG	PCBG	E.BIOGÁS = PCBG * 0,277780	VKBG = VCBG / E.BIOGÁS	0,600008	Valor do Biogás = E.BIOGÁS * 0,600010
<b>TOTAL</b>	<b>VCT</b>		-			<b>SOMATÓRIA TOTAL</b>

Legenda : PCB = Poder Calorífico do Bio-óleo em Mj/kg, PCBC = Poder Calorífico do Biochar em Mj/kg, PCBG = Poder Calorífico do Biogás em Mj/M<sup>3</sup>; VCBO = Valor Calculado do bio-óleo; VCBC = Valor calculado do biochar; VCBG = Valor calculado do biogás; VCT = Valor calculado total; VKBO = Valor do kWh do bio-óleo; VKBC = Valor do kWh do biochar; VKBG = Valor do kWh do biogás; 0,277778 = coeficiente de transformação de Mj para kWh.

Fonte: Autor (2019)

O poder calorífico do Bio-Óleo e do biochar foram determinados no ensaio de laboratório, já o Poder calorífico do Biogás foi estima conforme pesquisa de Barry *et al.*, (2018), onde o mesmo analisou o poder calorífico do biogás da pirólise do lodo de esgoto municipal no Canadá e encontrou o valor de 5,4 Mj/m<sup>3</sup>. Valores bem próximos ao pesquisado por Oliveira (2009) que ao analisar o biogás de dejetos de abatedouro encontrou o valor de 6 Mj/m<sup>3</sup>. Pedroza (2011) afirma que o principal componente do biogás é o metano, sendo este o principal influenciado no poder calorífico, por isso os valores tendem a ser bem próximos.

Conforme Honório (2009) a densidade do biogás é de 0,72 kg/m<sup>3</sup>. Sendo assim em 1m<sup>3</sup> de biogás existe 0,72 kilogramas. Fazendo uma simples regra de três , dividindo o poder calorífico do biogás adotado , que é de 5,4 Mj/m<sup>3</sup>, dividido por 0,72 kg/m<sup>3</sup>, encontra-se o valor de 7,5 Mj/kg de biogás. Valor este adotado na tabela.

A tabela 07 apresenta o comparativo entre o valor dos produtos encontrados, com referência ao valor dos produtos de Kwh transformados para reais conforme valor da Energisa. Apresenta também a economia referente ao processo.

**Tabela 7:** Comparação do Valor do kWh

<b>Produtos</b>	<b>Valor em reais por kg de produtos (Reator LEDBIO)</b>	<b>Valor em reais por kg de produtos (Energisa)</b>	<b>Economia</b>
<b>Bio-Óleo</b>	Valor do Bio-Óleo (Reator LEDBIO)	Valor do Bio-Óleo (Energisa)	DIFERENÇA DE UM MENOS O OUTRO
<b>Biochar</b>	Valor do Biochar (Reator LEDBIO)	Valor do Biochar (Energisa)	DIFERENÇA DE UM MENOS O OUTRO
<b>Biogás</b>	Valor do Biogás (Reator LEDBIO)	Valor do Biogás (Energisa)	DIFERENÇA DE UM MENOS O OUTRO
<b>TOTAL</b>	<b>SOMA TOTAL</b>	<b>SOMA TOTAL</b>	<b>SOMA TOTAL</b>

Fonte: Autor (2019)

### 1.13 GASTO COM A PIRÓLISE

Após calculado o Valor do Kwh de cada produto, e conhecendo seu rendimento, será calculado o valor em Reais que a pirólise conseguiu render, e depois comparado com o valor em Reais gasto para realização da pirólise. Verificando assim se é rentável. A tabela 08 descreve todos os cálculos realizados para obtenção de cada resultado.

**Tabela 8:** Comparação do gasto com a pirólise e o valor dos produtos obtidos

Tempo	Produtos	Rendimento %	Rendimento em Gramas	Rendimento em Kg	Valor em R\$/kg - LEDBIO	Valor em R\$/kg - Energisa	Custo do processo de pirólise
90 minutos	Bio-Óleo	RBO	$RBOG = RBO \times 40/100$	$RBOK = RBOG/1000$	$RBOK \times \text{Valor do Bio-Óleo}$	$RBOK \times \text{Valor do Bio-Óleo}$	= Qpirólise x 0,600008
	Biochar	RBC	$RBCG = RBC \times 40/100$	$RBCK = RBCG/1000$	$RBCK \times \text{Valor do Biochar}$	$RBCK \times \text{Valor do Biochar}$	= Qpirólise x 0,600008
	Biogás	RBG	$RBGG = RBG \times 40/100$	$RBGK = RBGG/100$	$RBGK \times \text{Valor do Biogás}$	$RBGK \times \text{Valor do Biogás}$	= Qpirólise x 0,600008
120 minutos	Bio-Óleo	RBO	$RBOG = RBO \times 40/100$	$RBOK = RBOG/1001$	$RBOK \times \text{Valor do Bio-Óleo}$	$RBOK \times \text{Valor do Bio-Óleo}$	= Qpirólise x 0,600008
	Biochar	RBC	$RBCG = RBC \times 40/100$	$RBCK = RBCG/1001$	$RBCK \times \text{Valor do Biochar}$	$RBCK \times \text{Valor do Biochar}$	= Qpirólise x 0,600008
	Biogás	RBG	$RBGG = RBG \times 40/100$	$RBGK = RBGG/101$	$RBGK \times \text{Valor do Biogás}$	$RBGK \times \text{Valor do Biogás}$	= Qpirólise x 0,600008
150 minutos	Bio-Óleo	RBO	$RBOG = RBO \times 40/100$	$RBOK = RBOG/1002$	$RBOK \times \text{Valor do Bio-Óleo}$	$RBOK \times \text{Valor do Bio-Óleo}$	= Qpirólise x 0,600008
	Biochar	RBC	$RBCG = RBC \times 40/100$	$RBCK = RBCG/1002$	$RBCK \times \text{Valor do Biochar}$	$RBCK \times \text{Valor do Biochar}$	= Qpirólise x 0,600008
	Biogás	RBG	$RBGG = RBG \times 40/100$	$RBGK = RBGG/102$	$RBGK \times \text{Valor do Biogás}$	$RBGK \times \text{Valor do Biogás}$	= Qpirólise x 0,600008
180 minutos	Bio-Óleo	RBO	$RBOG = RBO \times 40/100$	$RBOK = RBOG/1003$	$RBOK \times \text{Valor do Bio-Óleo}$	$RBOK \times \text{Valor do Bio-Óleo}$	= Qpirólise x 0,600008
	Biochar	RBC	$RBCG = RBC \times 40/100$	$RBCK = RBCG/1003$	$RBCK \times \text{Valor do Biochar}$	$RBCK \times \text{Valor do Biochar}$	= Qpirólise x 0,600008
	Biogás	RBG	$RBGG = RBG \times 40/100$	$RBGK = RBGG/103$	$RBGK \times \text{Valor do Biogás}$	$RBGK \times \text{Valor do Biogás}$	= Qpirólise x 0,600008

Legenda : RBO = Rendimento do bio-óleo em %; RBC = Rendimento do Biochar em %; RBG = Rendimento do Biogás em %; RBOG = Rendimento do Bio-óleo em gramas; RBCG = Rendimento do Biochar em gramas; RBGG = Rendimento do Biogás em gramas; RBOK = Rendimento do Bio-óleo em quilogramas; RBCK = Rendimento do Biochar em quilogramas; RBGK = Rendimento do Biogás em quilogramas; Qpirólise= Valor em kwh gasto no processo de pirólise em cada tempo.

Fonte: Autor (2019)

Logo após foi realizado um valor de eficiência da pirólise, onde pegou-se o valor de cada produto em reais obtidos na tabela 04, equação 12 e 13. Somou-se todos os valores, tendo conhecido o gasto da pirólise em cada temperatura, obtidos na equação 10, foi possível calcular a diferença em reais do valor gasto com energia no processo de pirólise, e do valor obtido com cada produto conforme seu respectivo rendimento.

## CAPÍTULO IV

## 1. REVISÃO DE LITERATURA

### 1.1 ESGOTO SANITÁRIO

Os esgotos sanitários se subdividem em dois grupos, sendo os esgotos sanitários Domésticos e industriais. O primeiro é constituído de despejos domésticos na rede coletora de esgoto. São compostos essencialmente por água de banho, urina, fezes, papel, resto de comida, detergentes, e uma parcela não significativa de despejos industriais. (MOCELIN, 2007).

As estações de tratamento de efluentes (ETEs), em sua grande maioria, são projetadas para remover sólidos sedimentáveis e matéria orgânica, havendo assim uma certa dificuldade na remoção de nutrientes como por exemplo o fósforo. O que hoje é um grande desafio no Brasil, pesquisadores de diversas áreas tem desenvolvido pesquisas para que este tratamento seja de forma completa e eficiente. (NETO E COSTA, 2011).

Alguns Subprodutos são gerados no tratamento do Esgoto Doméstico, sendo eles : Areia, espuma, Material Degradado, Lodo Primário e Lodo químico quando se tem o tratamento físico-químico. Sendo o Lodo Primário a maior problema entre os subprodutos, devido ao seu alto teor de combustão , e também ao seu gerenciamento de descarte. (TEIXEIRA, 2014).

Existem diferentes tipos de sistemas de tratamento de Esgoto, que por consequência geram um Lodo com características diferente, que podem ser Anaeróbio ou Aeróbio. O sistema mais utilizado no Brasil, devido a sua eficiência e custo, é o sistema de digestão anaeróbico, realizado com Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente (RAFA), conhecido também como sistema UASB (Up flow anaerobic sludge blanket), onde possuem a capacidade de até 70% da redução da demanda bioquímica de oxigênio. (MOCELIN, 2007 ; ALEXANDRE 2013 ; TEIXEIRA, 2014 ; MADEIRA , 2017).

## 1.2 CARACTERÍSTICA DO LODO DE ESGOTO

A característica do lodo de ETE está diretamente ligada ao tipo do efluente tratado, uma vez que é uma mistura diversa de microrganismos ativos e inativos, matéria orgânica, água e macronutrientes. Os produtos químicos também podem influenciar na característica do lodo de esgoto doméstico. Por mais que o tratamento seja o mesmo, as características do lodo podem variar de região para região. (ALEXANDRE 2013 ; TEIXEIRA, 2014). A figura 3 nos mostra as etapas de funcionamento de uma ETE.



**Figura 3:** Diagrama de funcionamento de uma ETE (Estação de Tratamento de Esgotos) localizada em Palmas-TO

Fonte: TEIXEIRA, 2014

O processo físico de secagem do lodo é feito em 4 etapas, sendo: Adensamento, Desidratação mecânica, Condicionamento e Secagem. Sendo que a quantidade de água é reduzida sequencialmente. (WERTHER & OGADA, 1999 *Apud* ALEXANDRE 2013).

A grande produção de Lodo de Esgoto, vem gerando diversos problemas para as empresas, uma vez que sua disposição em aterros sanitários tem gerado diversos transtornos. Sendo assim o uso de tecnologias vem sendo incentivado ao longo dos anos, sendo a pirólise uma dessas alternativas, produzindo bio-óleo, bio-char, e

biogás através do lodo de esgoto que se torna uma matéria prima. (VIEIRA et al., 2011 ; DEVI & SAROHA, 2013; MADEIRA , 2017).

### 1.3 PIRÓLISE

A pirólise é um processo termoquímico, que decorre da degradação térmica de material orgânico na ausência de oxigênio. Com base em parâmetros de temperatura o processo da pirólise obtém densidade energética e ocorre a carbonização da biomassa do material orgânico (PEDROZA *et al*, 2010).

Sua principal aplicação é o tratamento e a destinação final de resíduos sólidos. Existem dois principais tipos de pirólise: a pirólise analítica e a pirólise aplicada. A pirólise analítica visa à caracterização da amostra original, pela análise dos produtos de pirólise. A pirólise aplicada tem o propósito de gerar produtos de pirólise para um objetivo específico (CASSINI, 2003).

A pirólise aplicada tem sido largamente empregada como tecnologia de conversão de biomassa em combustíveis gasosos, líquidos e sólidos entre outros processos de conversão termoquímica (MOCELIN, 2007).

O processo da pirólise deu-se início século 19, por volta de 1897, quando Max Plank demonstrou que há uma conexão fechada entre a Segunda lei da Termodinâmica e o conceito de Irreversibilidade. Mais exatamente em 1909, um cientista chamado C. Caratheodory, revisando os estudos de Max Planck, reestruturou a termodinâmica estabelecendo um importante conceito, a Parede Adiabática, que trata da transferência de calor através de substâncias isolantes. A compreensão desta teoria permitiu a construção de sistemas térmicos mais eficientes como por exemplo os reatores, as caldeiras, incluindo-se também o famoso processo conhecido como pirólise, pois seu elemento principal é um reator (FROEHLICH, 2010; TEIXEIRA et al., 2016 ; MADEIRA , 2017).

Já em 1967, nos Estados Unidos, iniciaram as primeiras pesquisas com a carbonização de carvão através de reatores pirolíticos. A partir de então, utilizaram no reator da pirólise, resíduos de pneus e resíduos sólidos em experimentos, o que gerou resultados positivos. Desde então, a técnica de pirólise vem sendo realizada em todo o mundo. O reator pirolítico faz com que a matéria orgânica passe por diversas etapas.

A primeira é a secagem, cuja temperatura varia de 100°C a 150°C. Depois, na zona de pirólise ocorrem reações químicas como a oxidação e fusão, onde são retirados compostos como alcatrão e álcoois, logo após, o material orgânico sofre resfriamento, onde são coletados os produtos como o bio-óleo. (PEDROZA *et al*, 2010; VIEIRA *et al.*, 2011 ).

### 1.3.1 Utilização da pirólise

Segundo Cassini (2003) um dos maiores desafios da sociedade contemporânea, inclusive dos países desenvolvidos, é propor e manter soluções para a correta destinação dos resíduos sólidos urbanos, que só crescem com o avanço tecnológico e industrial.

A Pirólise é um dos processos de destinação final de resíduos sólidos mais eficiente que já foi descoberto pelo homem, porém face ao processo ser ainda custoso no que tange à sua manutenção, necessita de maior aprimoramento tecnológico (Aires *et al*, 2003)

Para tanto, o processo pirolítico, que é feito com base na degradação térmica de qualquer material orgânico com concentração de oxigênio. A pirólise ocorre com o regime de gaseificação, sendo um processo de decomposição térmica por meio da exposição de altas temperaturas (PEDROZA *et al*, 2010).

A pirólise em relação as tecnologias de conversão térmica de biomassa, pode ser considerada a mais promissora, dada a grande flexibilidade do processo. Através desse método pirolítico é adquirido alguns subprodutos (carvão vegetal, bio-óleo, gás combustível e dependendo do processo de pirólise alguns produtos químicos, a figura 4 nos mostra as variantes deste processo. (TEIXEIRA *et al.*, 2016 apud Pedroza *et al.*, 2010).

Variantes do processo	Tempo de residência	Temperatura do processo, °C	Produtos obtidos
carbonização	horas/dia	400 – 450	carvão vegetal
convencional	5 – 30 min	até 600	bio-óleo, carvão e gás
rápida	0,5 – 5 s	500 – 550	bio-óleo
flash-líquido	< 1 s	< 650	bio-óleo
flash-gás	< 1 s	> 650	gás combustível
vácuo	2 – 30 s	400	bio-óleo
metano-pirólise	< 10 s	>700	produtos químicos
hidro-pirólise	< 10 s	<500	bio-óleo e produtos químicos

Tabela 3 - Variantes do processo de pirólise  
Fonte: Adaptado de Gómez, (2002).

**Figura 4:** Variantes do processo de pirólise

Fonte: (Adaptado por VIEIRA, et al., 2011. apud GÓMEZ, 2002)

A pirólise pode ser classificada pelo tempo de residência em dois tipos: pirólise lenta e pirólise rápida. Na pirólise rápida, a temperatura varia de 500 a 550 °C, Através desta, a biomassa sólida é transformada em um líquido semi-sólido conhecido como bio-óleo, o tempo de residência varia de 0,5 a 5 segundos. (VIEIRA, ALEXANDRE., 2014. apud VIEIRA et al., 2011).

O sistema de pirólise possui vantagens e desvantagens. No Brasil existem poucas usinas de pirólise e sua utilização vem evoluindo em busca de resultados positivos e com menor custo, para atrair mais adeptos e minimizar a utilização de aterros sanitários, onde geralmente o lodo da estação de tratamento de Esgoto é depositado. Assim é certo afirmar que o tratamento feito pela pirólise, apesar do alto custo de investimento tem mais vantagens, já que uma vez utilizado, não acarreta danos ambientais e sociais (AIRES *et al*, 2003).

Conforme Madeira (2017), a pirólise possui vantagem em meio à outros processo, como a incineração, reciclagem e compostagem. Todavia não substitui por total o aterro sanitário, apesar de diminuir grandemente o volume de resíduos. Diminuindo também o custo de operacionalização de aterros sanitários, que em muitas cidades Brasileiras chega a ser exorbitante.

A Pirólise é uma alternativa correta, ambientalmente falando, devido as frações líquidas e gasosas obtidas durante este processo, que por apresentarem alto poder calorífico, torna o reaproveitamento do processo pirólítico viável. Além de ser uma

prática que pode ser empregado em todo o processo de aproveitamento do lodo de esgoto, aonde gera-se óleos, gases e carvão, o que é utilizado em larga escala como combustível em alguns processos industriais. (Vieira, *et al.* 2011).

#### 1.4 BIO-ÓLEO

De acordo com Silva et al, (2015) o bio-óleo é um material viscoelástico, e após tratamento térmico tem uma viscosidade semelhante a muitos tipos de óleos combustíveis. Além disso, Vieira e Alexandre (2014) relatam que o bio-óleo se apresenta como alternativa ao petróleo, devido a sua composição heterogênea e rica em compostos orgânicos. A figura 5 nos mostra um exemplo de bio-óleo.



**Figura 5:** Bio-óleo obtido do processo de pirólise do lodo de esgoto  
Fonte: IPT (2018)

O Bio-óleo é composto por uma diversidade de substâncias químicas e orgânicas que estão diretamente ligadas a composição da sua biomassa. Em sua composição química o Bio-óleo possui hidrocarbonetos, tais como alcenos, alcanos, alquinos e aromáticos. Podendo conter também uma grande quantidade de produtos nitrogenados. (PARK et al, 2010 ; VIEIRA, REGÔ E TEIXEIRA, 2017).

A composição química do Bio-óleo varia conforme a temperatura da pirólise, podendo ser ricos em alifáticos, o que potencializa seu uso como combustível. Quanto maior a temperatura da pirólise maior a formação de organonitrogênas aromáticas

(desidrogenação e condensação), contendo também altos teores de nitrogênio. (XIN *et al* , 2014).

## 1.5 BIOGÁS

O Biogás é considerado uma fonte de energia renovável, podendo ser usado na alimentação de motores, energia, cozinha e diversos outros locais. Sua composição pode variar dependendo da biomassa, mas em grande maioria é composto por metano, dióxido de carbono, ácido sulfídrico, entre outros. (QUEIROZ, *et al.*, 2018).

É Bastante utilizado na geração de energia elétrica através de biodigestores, mas sua produção por meio da pirólise tem se tornado cada vez mais eficiente. Reduz os níveis de emissões de gases prejudiciais ao meio ambiente, como por exemplo o metano. Além de reduzir a demanda de recursos naturais esgotáveis, como o gás natural. (XIN *et al* , 2014; BARROS, 2015).

Todavia, para aumentar o poder calorífico do biogás é necessário secá-lo e remover elementos nocivos para evitar danos aos equipamentos, como por exemplo H<sub>2</sub>S e Siloxanos. O biogás é seco por meio de um resfriamento que provoca a condensação da umidade contida. Após a secagem o gás passa por um filtro de carvão ativado, para só então passar a produzir energia (BARROS, 2015).

## 1.6 BIOCHAR

O carvão produzido pela pirólise tem alto poder calorífico, coloração escura, alto índice de carbono e grau de aromaticidade, gerando assim um alto nível de racalcitrância. Hoje é bastante utilizado para fixação de carbono no solo e aumento de pH. Sua composição química e estrutural é altamente heterogênea. (NOVAK *et al.*, 2014; TRAZZI *et al.*, 2018; GONZAGA *et al.*, 2018)

Segundo Morali *et al.* (2016) o biochar produzido a partir da pirólise lenta tem um grande potencial para aplicação como combustível e no tratamento de corpos hídricos. Podendo ter o poder calorífico superior a alguns combustíveis sólidos presentes no mercado.

Dentre suas principais características estão a capacidade de retenção de água, aumento do pH do solo, teor de cinzas e voláteis, entre outras. Sendo que cada característica pode ser influenciada pelo tempo e temperatura da pirólise. (SOHI et al., 2010 ; TRAZZI et al., 2018).

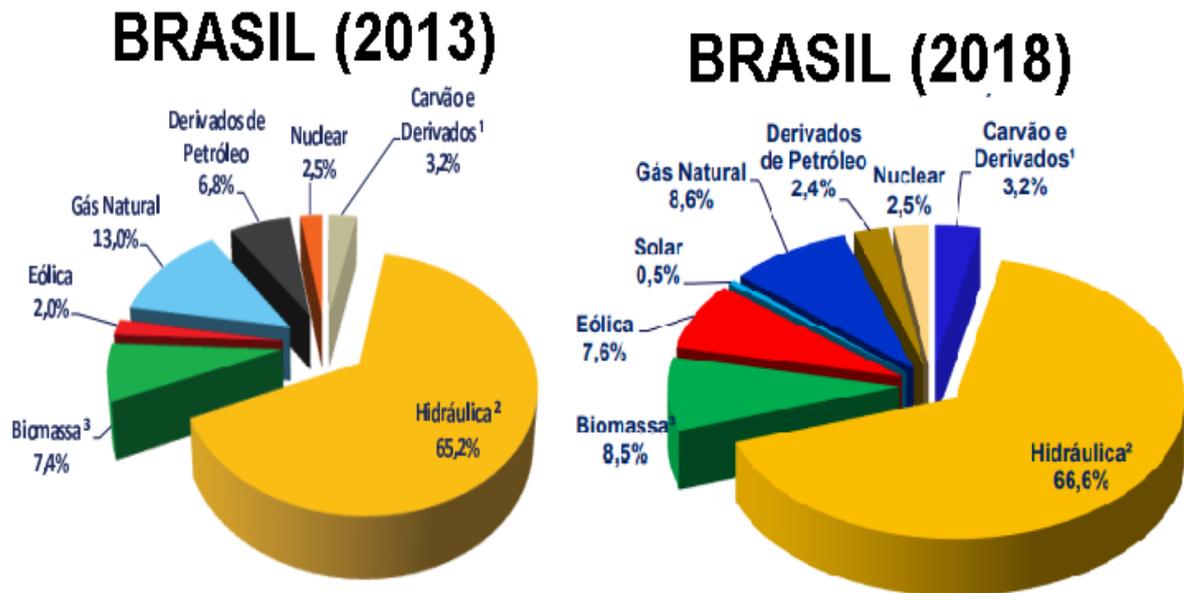
Em um trabalho realizado por Brewer et al. (2011), com 17 bio-char's, encontraram que houve aumento do pH do solo após oito semanas de avaliação. Além da toca de cátions, K, Ca, e carbono total. Concluíram também com base nos dados da pesquisa de Zwieten et al. (2010) que o biochar reduz a acidez trocável e aumenta a absorção de N por plantas de trigo.

O Biochar foi citado no quinto relatório do IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas). Apresentado como uma tecnologia capaz de contribuir com a mitigação de gases do efeito estufa , pincipalmente em setores como agricultura, entretanto sua real eficácia ainda é limitada devido falta de pesquisas mais aprofundadas. (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, 2014).

## 1.7 CONSUMO DE ENERGIA NO BRASIL

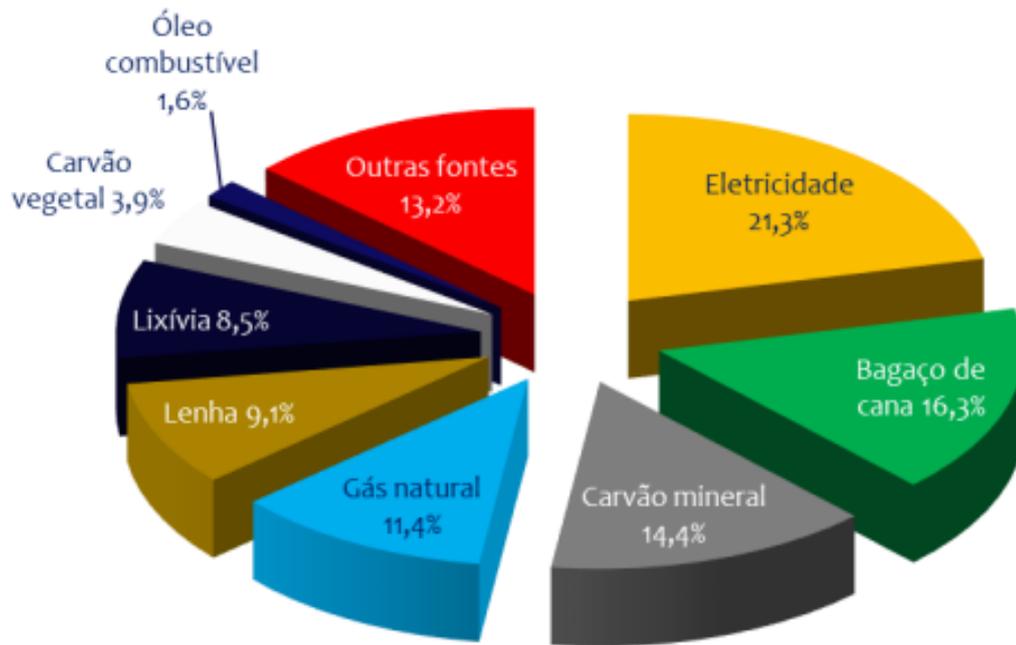
A oferta total de Energia elétrica no Brasil no ano de 2018 foi de 636,4TWh. Já a oferta interna de energia (total de energia disponibilizada no país) atingiu 288,4 Mtep, registrando um acréscimo de 1,7% em relação ao ano anterior. Tendo uma diminuição de 8% em relação a 2017 somente na geração de energia termoelétrica, considerada uma das mais caras no custo de produção (EPE , 2019).

Sabe que hoje a maioria da Energia elétrica produzida no Brasil advém das Hidroelétricas, Seguidas de Gás natural. Nas últimas décadas o Brasil tem avançado bastante na produção de Energia através de biomassa, só no ano de 2018 a biomassa representa 8,5% na matriz elétrica Brasileira, o relatório da Empresa de Pesquisas Energéticas inclui como biomassa, lenha, bagaço de cana, lixívia, biodiesel e outras fontes primárias. A figura 06 mostra o avanço da produção de energia através de biomassa entre os anos de 2013 e 2018. (FILHO et al., 2018 ; EPE,2019).



**Figura 6:** Comparação da Matriz Elétrica 2013 e 2018.  
 Fonte : Cunha ET al , 2019 (adaptado)

O Brasil tem se tornado um importante país na produção de Energia Limpa e renovável, dados do Relatório Energético Nacional de 2019 apontam que em 2018 45,3 % da oferta interna de energia produzida no Brasil foi através de fontes renováveis. O relatório ainda aponta que 31,7% da energia consumida no Brasil é por Industriais e apenas 9,9% por residências. A figura 07 mostra o consumo de energia na indústria (FILHO et al., 2018 ; EPE,2019).



**Figura 7:** Consumo de Energia na Indústria

Fonte : EPE , 2019

O consumo de Energia no Brasil e no mundo tende a aumentar com o passar dos anos, sendo assim novas tecnologias devem surgir para poder suprir a demanda energética. Uma vez que as fontes comumente utilizadas para produção de energia estão se esgotando cada vez mais. Sendo assim a Pirólise se torna uma alternativa viável para produção de Energia. (XIN *et al* , 2014; VIEIRA, REGÔ E TEIXEIRA, 2017; FILHO *et al.*, 2018)

## CAPÍTULO V

## 1. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A característica físico-química é de suma importância para que haja a verificação da viabilidade da biomassa, uma vez que o tipo de esgoto, tratamento e até mesmo o município influenciam diretamente no processo termoquímico e na obtenção dos produtos.

### 1.1 ANÁLISES IMEDIATAS

As análises imediatas são fundamentais para o estudo do processo de pirólise, uma vez que se conhece o teor de produção de cada subproduto, pode-se traçar diretrizes para o reaproveitamento dos resíduos. Na tabela 07 estão apresentados os dados obtidos na análise imediata, pode-se observar que a amostra de lodo apresentou alta quantidade de sólidos voláteis 58,21% (m/m) e cinzas 39,69% (m/m) e baixos teores de umidade 1,31% (m/m) e carbono fixo 0,71% (m/m), conforme dados apresentados na tabela 09.

**Tabela 9:** Teor de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo do lodo de esgoto.

Literatura	Umidade (%) (m/m)	Voláteis (%) (m/m)	Cinzas (%) (m/m)	Carbono Fixo (%) (m/m)
Presente Estudo	1,31 (bs) 8,86 (bu)	58,21	39,69	0,71
Pedroza (2011)	6	56	32,01	5
Alexandre (2013)	6,5	58,8	34,7	-
Teixeira (2014)	6,85	54,99	33,33	4,83
Rego (2016)	7,43	58,1	33,03	1,43
Aliakbaria et al. (2017)	7,3	57,9	30,4	4,2
Madeira (2017)	1,23	58,53	39,46	0,77

\* bs: base seca; bu: base úmida

Fonte : Autor (2019)

O teor de umidade inicial médio do lodo de esgoto foi de 8,86% (m/m), bem próximo aos valores encontrados por Rego (2016) , Aliakbaria et. al., (2017) e Madeira (2017) para lodo de esgoto domestico. Sabendo que, segundo Souza (2010), a umidade é uma das principais variáveis associadas com as características do sólido, tendo grande influência no processo térmico de pirólise. Madeira (2017) utilizou o

mesmo Lodo de Esgoto deste trabalho, coletado em 2016, o mesmo ficou armazenado em sacos herméticos até o presente momento, nota-se um pequeno aumento de umidade, o que demandou um pouco mais de tempo na estufa secando para chegar a umidade próxima a desejada. Assim o teor de umidade médio após a secagem prévia foi de 1,31%(m/m), valor considerado ótimo, visto que de acordo com Madeira (2017), menor será o gasto energético, implicando em uma redução no custo do processo de pirólise.

O teor de sólidos voláteis de 58,21% na amostra indica a carga orgânica presente no lodo de esgoto, esse valor próximo aos encontrados na literatura 58,10%, 58,8%, 58,53 (REGO, 2016; ALEXANDRE, 2013; MADEIRA, 2017). O teor de material volátil em lodos usados em processos de pirólise se mostra interessante por influenciar a obtenção do bio-óleo, sendo assim as substâncias orgânicas constituintes da fração de material volátil sofrem desorção do lodo na primeira etapa da pirólise, e posteriormente sofrem craqueamento e rearranjo químico, formando novos compostos químicos que constituirão o bio-óleo ao serem condensados (FONTS et al., 2009; VIEIRA, 2004).

O teor de cinzas encontrado foi de 39,69 %, relativamente maior do que os demais valores encontrados na literatura, porém se aproximou bastante aos valores de Madeira (2017) que utilizou o material da mesma estação de tratamento. O valor de cinzas indica a presença de substâncias inorgânicas, sendo uma variável de grande importância nos estudos de pirólise do lodo de esgoto conforme Morali *et al.* (2016).

O teor de Carbono fixo foi baixo, 0,71 %, se comparado com o valor de Teixeira (2014) que apresentou 4,83%, onde analisou a amostra do lodo de esgoto obtido na ETE norte do município de Palmas – TO. O baixo valor de carbono fixo se justifica pelo alto teor de voláteis e cinzas.

## 1.2 DENSIDADE , PODER CALORÍFICO SUPERIOR E PH

A densidade média do lodo de esgoto foi de 1,83 % (m/m), conforme tabela 10, considerada ideal, uma vez que quanto mais densas as partículas mais dificultosa é o processo de quebra na pirólise. O poder calorífico Superior do Lodo de esgoto foi de 14,78 MJ/kg<sup>1</sup>, um valor dentro dos demais pesquisados, Segundo a literatura Madeira (2017) encontrou 14,34 MJ/kg<sup>1</sup> para o Lodo de Esgoto da mesma estação de tratamento, Park et al, (2017) trabalhou com lodo de esgoto de uma ETE na Coreia e encontrou poder calorífico de 14,35 MJ/kg<sup>1</sup>; Wang et al., 2015 encontrou valor de 14,25 MJ/kg<sup>1</sup> para lodo de uma ETE na China. A tabela 8 apresenta os valores obtidos neste estudo.

**Tabela 10:** Densidade, Poder calorífico e pH do lodo de esgoto.

Parâmetros	% (m/m)
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,83
Poder Calorífico Superior (Mj/Kg <sup>1</sup> )	14,78
pH	2,41

Fonte: Autor (2019)

O valor encontrado de pH para este estudo foi bastante ácido, o que se explica por ser oriundo de estação de tratamento por flotação. O valor do presente estudo foi bem próximo ao de Sousa (2017) que encontrou 2,34 analisando as amostras de Lodo da mesma estação de tratamento deste estudo, ETE Prata. Eid et al (2017) encontrou o pH de 6,38 para lodo doméstico.

### 1.2.1 Poder Calorífico Superior do BioChar

O poder calorífico superior é uma propriedade de suma importância, pois apresenta a quantidade de energia que este material libera ao ser submetido a um processo de queima. Pode variar do tipo de amostra, composição química, umidade

da amostra, teor de cinzas e matéria orgânica presente na amostra (SOUSA, 2017; TEIXEIRA, 2014; COLEN, 2011)

O poder calorífico superior do Biochar encontrado foi de 11,783 Mj/Kg, valores bem próximos ao de aos usados nas usinas Termoelétricas no Brasil, que variam de 11,513 MJ/Kg até 13,397 MJ/Kg, conforme Tolmasquim, 2016.

Todavia o biochar estudado apresenta um poder calorífico menor se comparado ao carvão vegetal estudado por Protásio *et al.*, 2011. Que justifica que alto teores de cinza reduzem o poder calorífico do Biochar, o que justifica o biochar do lodo de esgoto ter poder calorífico inferior ao vegetal, uma vez que o teor de cinzas apresentado é superior.

### **1.2.2 Poder Calorífico Superior do Bio-Óleo**

Uma das principais propriedades do Bio-óleo é o poder calorífico Superior, porque apresenta o valor em energia que este pode exercer ao ser queimado. O que é de fundamental importância para o balanço energético de uma pirólise, conforme Huang *et al.* (2014).

O poder calorífico obtido foi de 34,35 Mj/Kg, valores bem próximo ao do trabalho de Sousa (2017) que analisando o lodo de esgoto da mesma estação de tratamento obteve um bio-óleo com poder calorífico superior de 35,14 Mj/kg. Já Viera *et al.* Analisando um bio-óleo obtido na pirólise de lodo de indústria petroquímica encontrou um Poder calorífico superior de 40,30 Mj/Kg. O poder calorífico encontrado neste trabalho foi bem inferior em comparação com o trabalho de Azuara *et al* (2015) que obteve 43,1 Mj/Kg.

### **1.2.3 Poder Calorífico Superior do Biogás**

O Poder calorífico do Biogás foi estimado conforme pesquisa de Barry *et al.*, (2018), onde o mesmo analisou o poder calorífico do biogás da pirólise do lodo de esgoto municipal no Canadá e encontrou o valor de 5,4 Mj/m<sup>3</sup>. Valores bem próximos ao pesquisado por Oliveira (2009) que ao analisar o biogás de dejetos de abatedouro encontrou o valor de 6 Mj/m<sup>3</sup>. Pedroza (2011) afirma que o principal componente do

biogás é o metano, sendo este o principal influenciado no poder calorífico, por isso os valores tendem a ser bem próximos.

Conforme Honório (2009) a densidade do biogás é de 0,72 kg/m<sup>3</sup>. Sendo assim em 1m<sup>3</sup> de biogás existe 0,72 kilogramas. Fazendo uma simples regra de três , dividindo o poder calorífico do biogás adotado , que é de 5,4 Mj/m<sup>3</sup>, dividido por 0,72 kg/m<sup>3</sup>, encontra-se o valor de 7,5 Mj/kg de biogás.

### 1.3 ANÁLISE ELEMENTAR

A análise elementar é essencial para processos de pirólise de biomassa, pois com ela pode-se definir a quantidade de teores de Nitrogênio, Carbono , Hidrogênio e enxofre presentes em cada amostra. O que de certa forma influencia tanto no rendimento quanto no poder calorífico dos produtos. (XUE *et al.*, 2015; TEIXEIRA, 2014; SÁNCHEZ *et al.*, 2009)

#### 1.3.1 Análise Elementar do Lodo de Esgoto

Os teores (%) de nitrogênio, carbono, hidrogênio e enxofre elementar encontrados no lodo podem ser observados na tabela 11.

**Tabela 11:** Valores médios obtidos da análise elementar do lodo de esgoto

<b>N %</b>	<b>C%</b>	<b>H%</b>	<b>S%</b>
4,53	27,65	4,09	3,71

N = Nitrogênio; C = Carbono; H = Hidrogênio; S = Enxofre

Fonte: Autor (2019)

Nos valores encontrados neste presente estudo pode-se afirmar que o N apresentou concentração de 4,53%, valores bem próximos ao pesquisado por Park *et al.*, (2017) que encontrou 4,7% na sua pesquisa. Já Duan *et al.*, (2017) encontrou a concentração de nitrogênio de 0,6%. A quantidade de Nitrogênio em uma análise que deve ser realizada com bastante cuidado, uma vez que quanto maior a quantidade da concentração maior pode ser a possível emissão de gases poluentes , conforme Obernberger *et al.*, (2006).

Os valores de Carbono encontrado nesta pesquisa foram de 27,65%, um valor inferior se comparado a pesquisa de Xue *et al.*, (2015) que encontrou 38,63

analisando uma amostra de lodo em uma estação de tratamento na China. Wang *et al.*, (2015) encontrou um valor de 15,9%, bastante inferior se comparado com essa pesquisa.

O Hidrogênio encontrado foi de 4,09%, valores bem próximos ao de Sousa (2017) que encontrou 4,18, e de Xue *et al.*, (2015) que em sua pesquisa determinou 5,90%.

Em relação ao Enxofre, cujo resultado foi de 3,71%, foi bem próximo ao valor encontrado por Madeira (2017) de 3,63%, e bastante superior se comparado com os valores encontrados por Aliakbari *et al.* (2017) S: 1,7%. Segundo Sígolo e Pinheiro (2010), o Enxofre encontrado no Lodo de esgoto é proveniente das fezes humanas, e de fertilizantes, e em altas quantidades podem resultar em problemas ambientais se o material for submetido a combustão.

### 1.3.2 Análise Elementar do BioChar

**Tabela 12:** Valores médios obtidos da análise elementar do Biochar

N %	C%	H%	S%
1,76	21,75	1,13	4,75

N = Nitrogênio; C = Carbono; H = Hidrogênio; S = Enxofre

Fonte: Autor (2019)

Conforme se observa na tabela 12 os valores de Nitrogênio, Carbono e Hidrogênio foram inferiores ao do Lodo, porém o de Enxofre se mostrou ligeiramente superior em relação a biomassa de origem. Segundo Huang *et al.*,(2014) a composição elementar do bio-óleo e da fração sólida, dependem significativamente da temperatura de pirólise do Lodo. O que deve ser devido a desidrogenação, condensação (aromatização) e reações de craqueamento secundário que ocorre em altas temperaturas.

O valor de Hidrogênio encontrado, 1,13%, foi inferior ao estudado por Hu *et al.*, (2015), que encontrou 2,14%. Já os valores de Nitrogênio 1,76% e Enxofre 4,75% foram superiores ao encontrado por Hu *et al.*, (2015), onde obteve 1,14% e 0,63%, respectivamente.

### 1.3.3 Análise Elementar do Bio-Óleo

Os teores obtidos na análise elementar para o bio-óleo estão descritos na tabela 13.

**Tabela 13:** Valores médios obtidos da análise elementar do Bio-Óleo

N %	C%	H%	S%
5,68	66,14	7,94	1,03

N = Nitrogênio; C = Carbono; H = Hidrogênio; S = Enxofre

Fonte: Autor (2019)

O valor do carbono presente no Bio-Óleo foi de 66,14%, valores bem próximo a pesquisa feita por Malins et al. (2015) que encontrou um resultado de 66,03%. O teor de Hidrogênio foi de 7,94%, valores bem próximos se comparados com o da pesquisa de Alvarez et al. (2016) onde o resultado foi de 8,8%.

A quantidade de Nitrogênio encontrada nesta pesquisa foi de 5,67%, valores próximos a pesquisa de Sousa (2017) que obteve um valor de 4,61%. Já o valor de Enxofre foi de 1,03%, valor superior se comparado a pesquisa de Thangalazhy *et al.*, (2015) que encontrou 0,87%.

## 1.4 RENDIMENTOS DOS PRODUTOS DA PIRÓLISE

Foram realizadas pirólises em Quadruplicatas, com a temperatura fixa em 450 °C, a taxa de aquecimento fixa de 30 °C/mim, possuindo quatro variáveis de tempo, sendo 90 minutos, 120 minutos, 150 minutos e 180 minutos. O calculo dos rendimentos foram obtidos conforme equações 6, 7 , 8 e 9 e são apresentados na tabela 14.

**Tabela 14:** Valores do Rendimento de cada tempo e repetições.

REPETIÇÕES	TEMPO (MIM)	RENDIMENTOS (%)			
		FB	FS	FA	FG
1	90	6,5	62,51	18,4	12,58
2	90	6,67	61,48	18,9	12,94
3	90	6,68	58,92	19,93	14,46
4	90	6,98	61,35	19,05	12,63

REPETIÇÕES	TEMPO (MIM)	RENDIMENTOS (%)			
		FB	FS	FA	FG
1	120	6,8	63,7	14,64	14,88
2	120	8,94	63,94	14,81	12,32
3	120	7,84	64,99	15,87	11,3
4	120	8,83	64,18	14,25	12,76

REPETIÇÕES	TEMPO (MIM)	RENDIMENTOS (%)			
		FB	FS	FA	FG
1	150	7,89	63,42	14,5	14,2
2	150	8,63	62,89	14,89	13,6
3	150	8,65	62,29	14,56	14,5
4	150	8,42	62,01	14,98	14,6

REPETIÇÕES	TEMPO (MIM)	RENDIMENTOS (%)			
		FB	FS	FA	FG
1	180	10,5	58,6	14,75	16,18
2	180	9,51	64	15,6	10,89
3	180	8,49	62,34	14,72	14,44
4	180	9	62,44	14,93	13,63

Legenda: FB: fração bio-óleo; FA: fração aquosa; FS: fração sólida; FG: fração gasosa.

Fonte: Autor (2019)

#### 1.4.1 Análise estatística da Fração Aquosa

A tabela 15 apresenta a análise de variância (ANOVA) para o rendimento da fração aquosa nos diferentes tempos de pirólise. A aplicação do teste F mostra que houve significância ao nível de 1%.

**Tabela 15:** Análise de variância para produção de fração aquosa a partir da pirólise de lodo de Esgoto

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TEMPO	3	52,939	17,6463	63,546**	0
ERRO	12	3,33235	0,2777		
TOTALCORRIGIDO	15				

\*\* significativo ao nível de 1 % de probabilidade ( $p < 0,01$ )

\* significativo ao nível de 5 % de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ )

ns não significativo ( $p \geq 0,05$ ); ns = não significativo; S.Q.: Soma de quadrados; G.L.: Grau de liberdade; Q.M.: Quadrado médio

Fonte: Autor (2019)

A tabela 15 apresenta o efeito das variáveis, tempo de pirólise, sobre o rendimento da fração aquosa, para condições experimentais utilizadas no planejamento estatístico. O tempo de pirólise apresenta efeito significativo a 95% de confiança conforme teste F, sobre a produção da fração aquosa.

A tabela 16 apresenta a ANOVA reduzida da regressão e o coeficiente de variação obtido.

**Tabela 16:** Análise de variância para produção de fração aquosa a partir da pirólise de lodo de Esgoto - Regressão

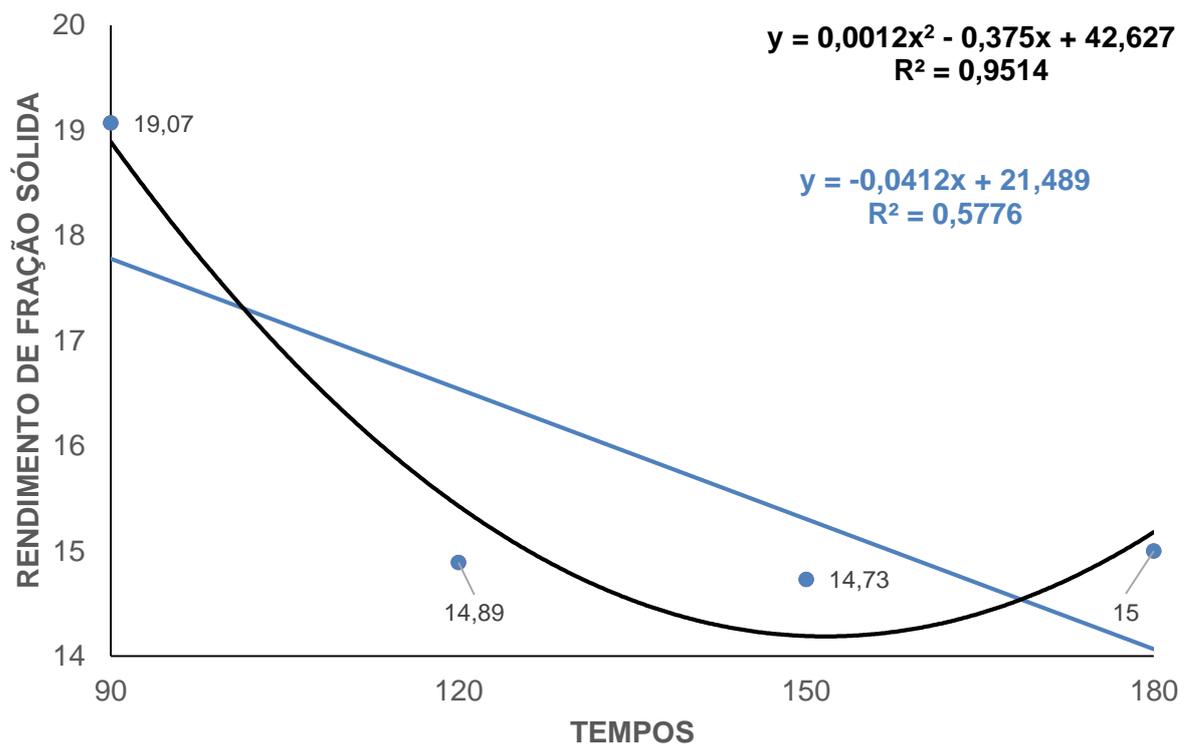
FONTES DE VARIÇÃO	GL	RENDIMENTO DA FA
REG LINEAR R <sup>2</sup>	1	57,81*
REG QUADRÁTICA R <sup>2</sup>	1	95,13*
TEMPOS	3	*
MÉDIAS		15,92
CV (%)		3,31

Legenda : \* = Significativo; ns = Não Significativo; FA = Fração Aquosa; GL = Grau de Liberdade; REG = Regressão

Fonte: Autor (2019)

A tabela 16 mostra que o coeficiente de variação foi de 3,31%, isso é ótimo para esta pesquisa, uma vez que conforme Sousa (2017) para pesquisa com biomassa o coeficiente de variação abaixo de 10% mostra um alto nível de confiabilidade.

Tanto a regressão linear quanto a regressão quadrática foram significativas, gerando assim o gráfico mostrado na figura 08.



**Figura 8:** Gráfico da regressão linear e quadrática para fração aquosa  
 Fonte: Autor (2019)

O gráfico mostra no eixo x os tempos de pirólise que variam de 90 a 180 minutos, no eixo y é mostrado o rendimento da fração aquosa. Observa-se que no menor tempo de pirólise foi produzida a maior taxa de fração aquosa. Isso se assemelha ao trabalho de Madeira (2017) que encontrou a maior produção de fração aquosa no menor tempo de pirólise pesquisado, sendo 15% a 120 minutos. Huang *et al.*, (2014) afirma que quanto maior a produção de fração aquosa menor é a produção do bio-óleo.

#### 1.4.2 Análise estatística da Fração do Bio-Óleo

A tabela 17 apresenta a análise de variância (ANOVA) para o rendimento da fração do bio-óleo nos diferentes tempos de pirólise. A aplicação do teste F mostra que houve significância ao nível de 5%.

**Tabela 17:** Análise de variância para produção de fração do bio-óleo a partir da pirólise de lodo de Esgoto

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
TEMPO	3	14,5795	4,85982	10,233 *	0,0012
ERRO	12	5,69913	0,47493		
TOTALCORRIGIDO	15				

\*\* significativo ao nível de 1 % de probabilidade ( $p < 0,01$ )  
 \* significativo ao nível de 5 % de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ )  
 ns não significativo ( $p \geq 0,05$ ); ns = não significativo; S.Q.: Soma de quadrados; G.L.: Grau de liberdade; Q.M.: Quadrado médio

Fonte: Autor (2019)

A tabela 17 apresenta o efeito das variáveis, tempo de pirólise, sobre o rendimento da fração do bio-óleo, para condições experimentais utilizadas no planejamento estatístico. O tempo de pirólise apresenta efeito significativo a 95% de confiança conforme teste F, sobre a produção da fração do bio-óleo.

A tabela 18 apresenta a ANOVA reduzida da regressão e o coeficiente de variação obtido.

**Tabela 18:** Análise de variância para produção de fração do bio-óleo a partir da pirólise de lodo de Esgoto - Regressão

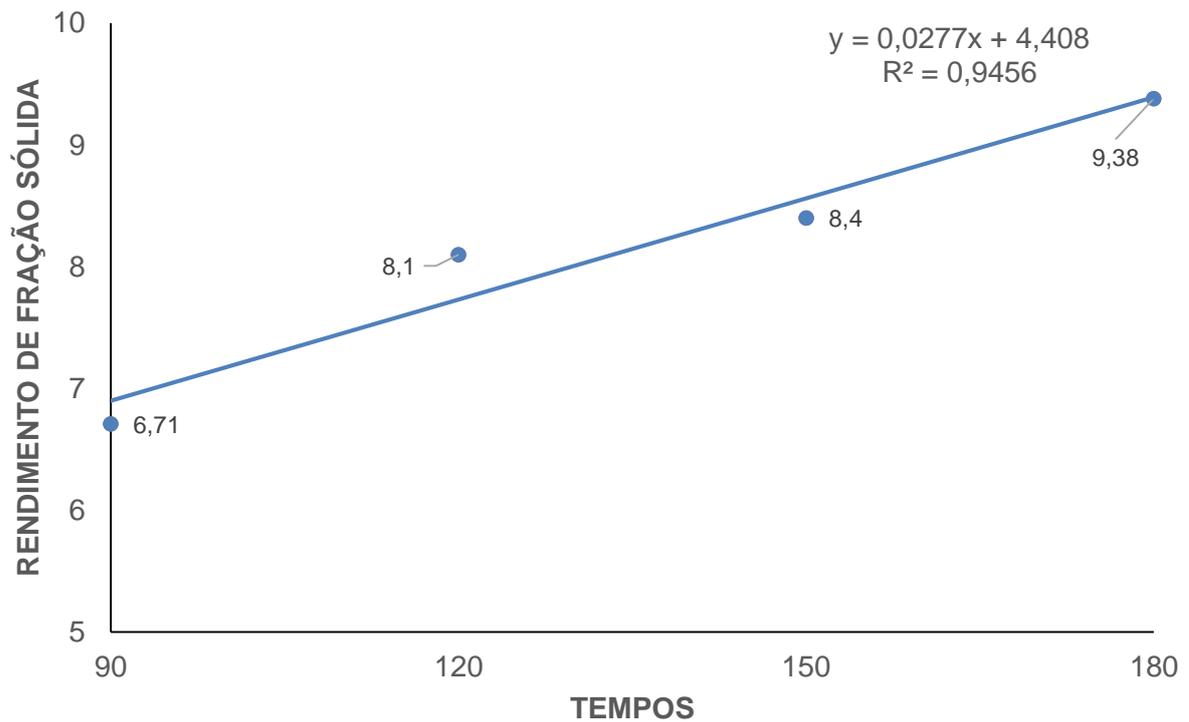
FONTES DE VARIÇÃO	GL	RENDIMENTO DA FA
REG LINEAR R <sup>2</sup>	1	94,45*
REG QUADRÁTICA R <sup>2</sup>	1	95,64ns
TEMPOS	3	*
MÉDIAS		8,15
CV (%)		8,46

Legenda : \* = Significativo; ns = Não Significativo; FA = Fração Aquosa; GL = Grau de Liberdade; REG = Regressão

Fonte: Autor (2019)

A tabela 18 mostra que o coeficiente de variação foi de 8,46%, isso é ótimo para esta pesquisa, uma vez que conforme Barry *et al.*, (2018) para pesquisa com biomassa o coeficiente de variação abaixo de 10% mostra um alto nível de confiabilidade.

A regressão linear foi significativa nesta pesquisa, a tabela 18 mostra que a regressão quadrática deu não significativo. Foi gerado um gráfico com conforme mostra a figura 09.



**Figura 9:** Gráfico da regressão Linear para fração do bio-óleo  
Fonte: Autor (2019)

O gráfico mostra no eixo x os tempos de pirólise que variam de 90 a 180 minutos, no eixo y é mostrado o rendimento da fração do bio-óleo. Observa-se que no menor tempo de pirólise foi produzida a menor taxa de fração do bio-óleo. Isso se assemelha ao trabalho de Thangalazhy *et al.*, (2015) que encontrou a maior produção de fração de bio-óleo no maior tempo e temperatura da pirólise pesquisada.

#### 1.4.3 Análise estatística da Fração Gasosa

A tabela 19 apresenta a análise de variância (ANOVA) para o rendimento da fração gasosa nos diferentes tempos de pirólise. A aplicação do teste F mostra que não houve significância ao nível de 5%.

**Tabela 19:** Análise de variância para produção de fração gasosa a partir da pirólise de lodo de Esgoto

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
				0,787	
TEMPO	3	4,7868	1,59561	ns	0,5241
ERRO	12	24,34058	2,02838		
TOTALCORRIGIDO	15				

\*\* significativo ao nível de 1 % de probabilidade ( $p < 0,01$ )

\* significativo ao nível de 5 % de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ )

ns não significativo ( $p \geq 0,05$ ); ns = não significativo; S.Q.: Soma de quadrados; G.L.: Grau de liberdade; Q.M.: Quadrado médio

Fonte: Autor (2019)

A tabela 19 apresenta o efeito das variáveis, tempo de pirólise, sobre o rendimento da fração do bio-óleo, para condições experimentais utilizadas no planejamento estatístico. O tempo de pirólise não apresenta efeito significativo a 95% de confiança conforme teste F, sobre a produção da fração gasosa.

A tabela 20 apresenta a ANOVA reduzida da regressão e o coeficiente de variação obtido.

**Tabela 20:** Análise de variância para produção de fração gasosa a partir da pirólise de lodo de Esgoto - Regressão

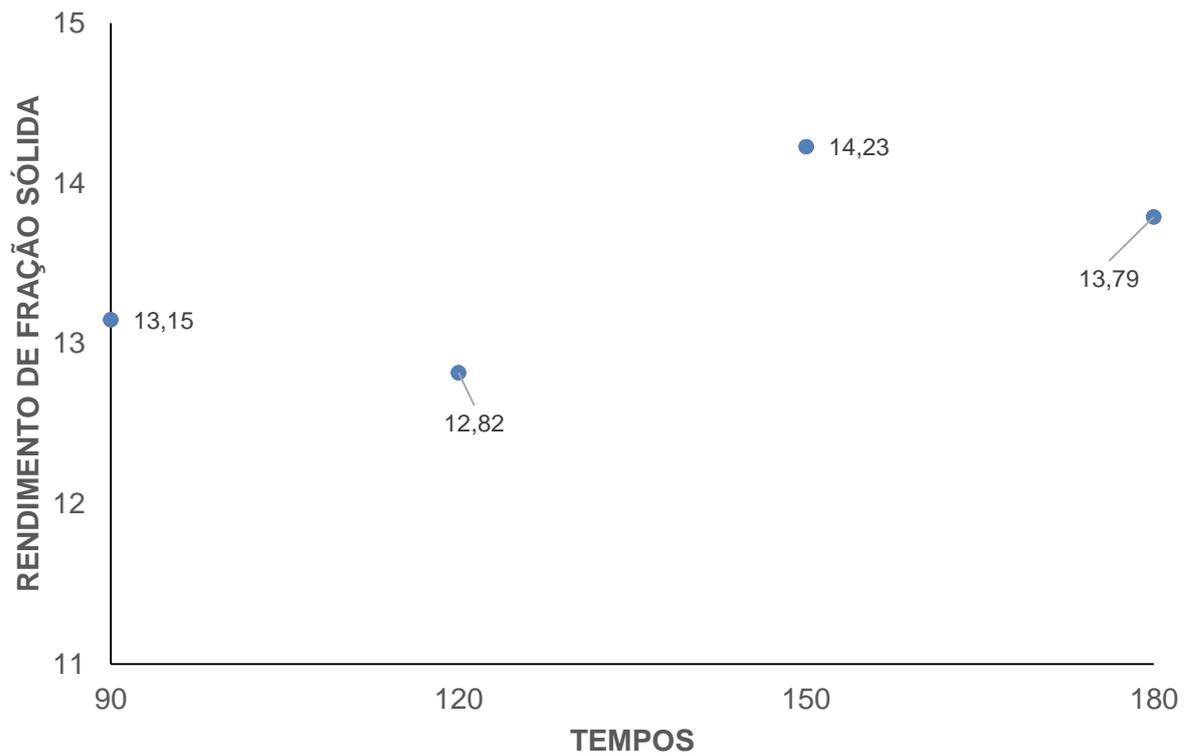
FONTES DE VARIÇÃO	GL	RENDIMENTO DA FA
REG LINEAR R <sup>2</sup>	1	45,71ns
REG QUADRATICA R <sup>2</sup>	1	45,93ns
TEMPOS	3	ns
MÉDIAS		13,49
CV (%)		10,55

Legenda : \* = Significativo; ns = Não Significativo; FA = Fração Aquosa; GL = Grau de Liberdade; REG = Regressão

Fonte: Autor (2019)

A tabela 20 mostra que o coeficiente de variação foi de 13,49% isso é bom para esta pesquisa, uma vez que conforme Barry *et al.*, (2018) para pesquisa com biomassa o coeficiente de variação abaixo de 10% mostra um alto nível de confiabilidade, e entre 10 a 15% o nível de confiabilidade é bom. O CV deu acima de 10% uma vez que não foi possível coletar os gases para análise, sendo calculados por diferença conforme eq. 09.

Nem a regressão linear e nem a regressão quadrática foram significativas nesta pesquisa, Foi gerado um gráfico com conforme mostra a figura 10, apresentando os valores das frações conforme cada tempo de pirólise.



**Figura 10:** Gráfico da regressão para fração gasosa  
Fonte: Autor (2019)

O gráfico mostra no eixo x os tempos de pirólise que variam de 90 a 180 minutos, no eixo y é mostrado o rendimento da fração do bio-óleo. Observa-se que a temperatura não influenciou tanto na produção da fração gasosa, os valores foram bem próximos, por tal motivo não foi significativa conforme nos mostrou a ANOVA. Isso se assemelha ao trabalho de Madeira (2017) que encontrou valores muito próximos em diferentes tempos e temperaturas de pirólise.

#### 1.4.4 Análise estatística da Fração Sólida

A tabela 21 apresenta a análise de variância (ANOVA) para o rendimento da fração sólida nos diferentes tempos de pirólise. A aplicação do teste F mostra que não houve significância ao nível de 5%.

**Tabela 21:** Análise de variância para produção de fração sólida a partir da pirólise de lodo de Esgoto

<b>FV</b>	<b>GL</b>	<b>SQ</b>	<b>QM</b>	<b>Fc</b>	<b>Pr&gt;Fc</b>
				3,475	
TEMPO	3	21,5848	7,19494	ns	0,0506
ERRO	12	24,8474	2,07061		
TOTALCORRIGIDO	15				

\*\* significativo ao nível de 1 % de probabilidade ( $p < 0,01$ )  
 \* significativo ao nível de 5 % de probabilidade ( $0,01 \leq p < 0,05$ )  
 ns não significativo ( $p \geq 0,05$ ); ns = não significativo; S.Q.: Soma de quadrados; G.L.: Grau de liberdade; Q.M.: Quadrado médio

Fonte: Autor (2019)

A tabela 21 apresenta o efeito das variáveis, tempo de pirólise, sobre o rendimento da fração sólida, para condições experimentais utilizadas no planejamento estatístico. O tempo de pirólise não apresenta efeito significativo a 95% de confiança conforme teste F, sobre a produção da fração sólida.

A tabela 22 apresenta a ANOVA reduzida da regressão e o coeficiente de variação obtido.

**Tabela 22:** Análise de variância para produção de fração sólida a partir da pirólise de lodo de Esgoto- Regressão

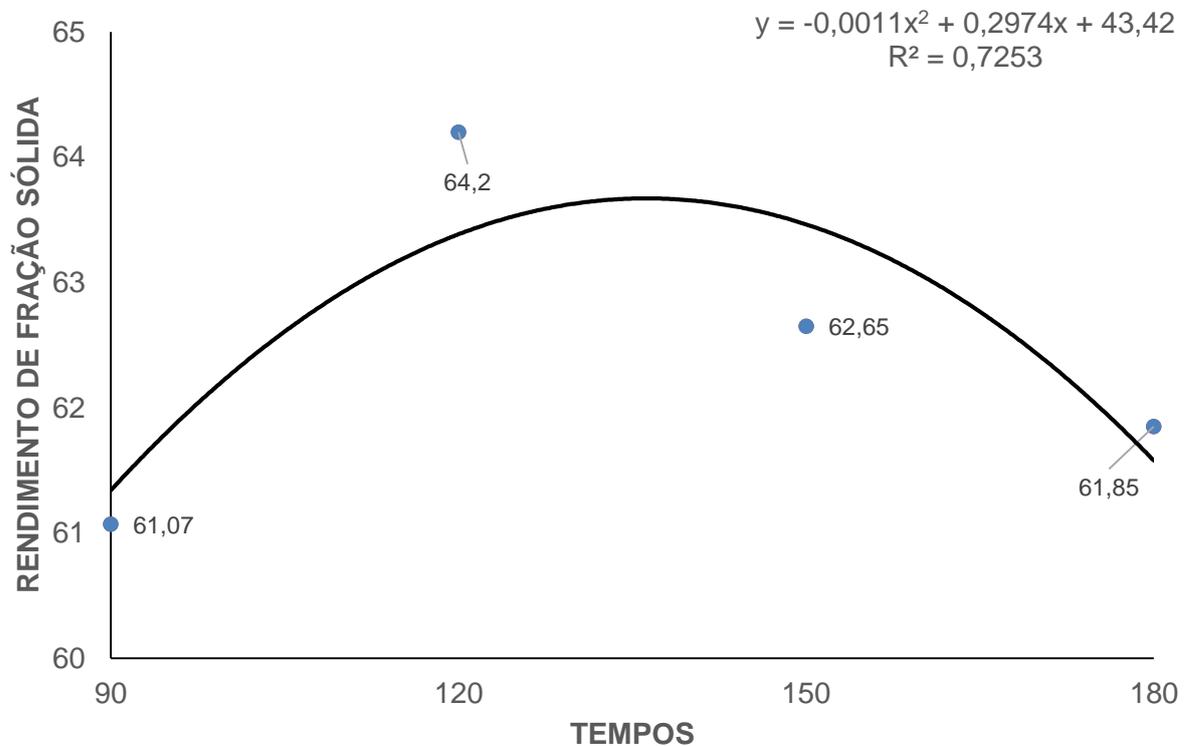
<b>FONTES DE VARIAÇÃO</b>	<b>GL</b>	<b>RENDIMENTO DA FA</b>
REG LINEAR R <sup>2</sup>	1	0,58ns
REG QUADRATICA R <sup>2</sup>	1	72,68*
TEMPOS	3	ns
MÉDIAS		62,44
CV (%)		2,3

Legenda : \* = Significativo; ns = Não Significativo; FA = Fração Aquosa; GL = Grau de Liberdade; REG = Regressão

Fonte: Autor (2019)

A tabela 22 mostra que o coeficiente de variação foi de 2,3% isso é ótimo para esta pesquisa, uma vez que conforme Barry *et al.*, (2018) para pesquisa com biomassa o coeficiente de variação abaixo de 10% mostra um alto nível de confiabilidade.

A regressão Quadrática foi significativa nesta pesquisa, a tabela 22 mostra que a regressão linear não foi significativa. Foi gerado um gráfico com conforme mostra a figura 11.



**Figura 11:** Gráfico da regressão quadrática para fração sólida  
Fonte: Autor (2019)

O gráfico mostra no eixo x os tempos de pirólise que variam de 90 a 180 minutos, no eixo y é mostrado o rendimento da fração do bio-óleo. Observa-se que a temperatura não influenciou tanto na produção da fração gasosa, os valores foram bem próximos, por tal motivo não foi significativa conforme nos mostrou a ANOVA. Isso se assemelha ao trabalho de Xue *et al.*, (2015) que encontrou valores muito próximos em diferentes tempos e temperaturas de pirólise.

## 1.5 AVALIAÇÃO DO GASTO ENERGÉTICO

### 1.5.1 Consumo de energia na pirólise

O consumo de energia na pirólise foi calculado pela equação 10. Para os 4 diferentes tempo de pirólise. Uma vez que o tempo da pirólise influencia diretamente no consumo de energia.

#### 1.5.1.1 tempo de 90 minutos

Uma vez encontrado o consumo de energia dos equipamentos, foi determinado o consumo da pirólise para o tempo de 90 minutos , achando assim o consumo de energia total para esse tempo, conforme equações abaixo.

$$Q_{\text{pirólise}} = 4 \times 1,5 \quad (\text{Eq.10})$$

$$Q_{\text{pirólise}} = 6 \text{ kWh}$$

Onde: Pot.pir é a potência da máquina de pirólise em Kw, que neste caso é de 4 Kh. E h é o tempo em horas de duração da pirólise, onde 90 minutos representa 1,5 horas.

#### 1.5.1.2 tempo de 120 minutos

Uma vez encontrado o consumo de energia dos equipamentos, foi determinado o consumo da pirólise para o tempo de 120 minutos , achando assim o consumo de energia total para esse tempo, conforme equações abaixo.

$$Q_{\text{pirólise}} = 4 \times 2 \quad (\text{Eq.10})$$

$$Q_{\text{pirólise}} = 8 \text{ kWh}$$

Onde: Pot.pir é a potência da máquina de pirólise em Kw, que neste caso é de 4 Kh. E h é o tempo em horas de duração da pirólise, onde 120 minutos representa 2 horas.

### 1.5.1.3 tempo de 150 minutos

Uma vez encontrado o consumo de energia dos equipamentos, foi determinado o consumo da pirólise para o tempo de 150 minutos , achando assim o consumo de energia total para esse tempo, conforme equações abaixo.

$$Q_{\text{pirólise}} = 4 \times 2,5 \quad (\text{Eq.10})$$

$$Q_{\text{pirólise}} = 10 \text{ kWh}$$

Onde: Pot.pir é a potência da máquina de pirólise em Kw, que neste caso é de 4 Kh. E h é o tempo em horas de duração da pirólise, onde 150 minutos representa 2,5 horas.

### 1.5.1.4 tempo de 180 minutos

Uma vez encontrado o consumo de energia dos equipamentos, foi determinado o consumo da pirólise para o tempo de 180 minutos , achando assim o consumo de energia total para esse tempo, conforme equações abaixo.

$$Q_{\text{pirólise}} = 4 \times 3 \quad (\text{Eq.10})$$

$$Q_{\text{pirólise}} = 12 \text{ kWh}$$

Onde: Pot.pir é a potência da máquina de pirólise em Kw, que neste caso é de 4 Kh. E h é o tempo em horas de duração da pirólise, onde 180 minutos representa 3 horas.

### 1.5.1.5 Consumo total da pirólise

A tabela 23 mostra o consumo total de pirólise em cada tempo diferente.

**Tabela 23:** Consumo total da pirólise em diferentes tempos.

<b>Tempo (minutos)</b>	<b>Qpirólise (kWh)</b>
90	6
120	8
150	10
180	12

Fonte: Autor (2019)

Observa-se que quanto mais tempo teve de pirólise, maior foi o consumo de energia. Isso se dá pelo motivo do gasto energético para quebra de partículas no reator pirolítico. Para realização de tais cálculos foi considerado a potência de operação máxima do reator pirolítico, ou seja, foi analisado apenas o tempo de permanência do equipamento ligado e não a temperatura.

## 1.6 VALOR DOS PRODUTOS

### 1.6.1 valor do Bio-Óleo

O valor do Bio-óleo foi calculado conforme tabela 4, utilizando valores como ano de referência de 2018. O valor do barril de petróleo foi usado como referência o petróleo Brent, devido suas características de densidade serem leves, bem próximas ao bio-óleo estudado, o valor conforme o site Investing (2018) foi de U\$ 71,64. O volume do barril para este petróleo de referência é de 158,987 conforme Alexandre (2013). A densidade do bio-óleo conforme Perry & Chiltons (1984) de 0,9 kg/dm<sup>3</sup>, valores bem próximos ao encontrado por Sousa (2017) que analisando o lodo da estação de tratamento do ETE prata, mesma dessa pesquisa, encontrou 0,98 kg/dm<sup>3</sup>.

Devido a falta de pesquisa nesta área na literatura por todo o mundo foi adotado o valor do Bio-óleo 70% do valor do petróleo, conforme pesquisa feita por (GARY & HANDWERK, 1984; KIM & PARKER, 2008). A tabela 24 apresenta o valor do Bio-óleo.

**Tabela 24:** Valor do Bio-Óleo

Dados do petróleo		Dados do bio-óleo	
Valor do barril de Petróleo (\$)	\$ 71,64	Valor do barril Bio-óleo	\$ 50,15
Volume do barril (L)	158,987	Volume do barril (L)	158,987
Densidade do Petróleo Kg/dm <sup>3</sup>	0,87	Densidade do Bio-óleo Kg/dm <sup>3</sup>	0,9
Massa do barril	138,31869	Massa do barril	143,0883
Preço por litro petróleo (\$)	\$ 0,45	Preço por litro Bio-óleo	\$ 0,32
Preço por kg petróleo	\$ 0,52	Preço por kg Bio-óleo	\$ 0,35
Cotação do dólar	\$ 3,68	Cotação do dólar	\$ 3,68
Preço do kWh (R\$/kWh)	0,600008	Preço do kWh (R\$/kWh)	0,600008

Fonte: Autor (2019)

Observa-se que o valor por Kg de Bio-Óleo é de U\$ 0,35, comparado com U\$ 0,52 referente ao preço por kg do petróleo Brent. Valores bem próximos ao encontrado por Alexandre (2013) que analisando o bio-óleo da pirólise do Lodo de Esgoto do município de Palmas chegou ao valor de U\$ 0,53 por Kg de Bio-óleo. Os valores variaram devido a cotação do barril de petróleo ser em anos diferentes, o que influencia diretamente no valor do Bio-óleo.

Conforme a Equação 11 o valor do Biochar em Reais é de :

$$PBK = 0,35 * 3,68 \text{ (Eq. 11)}$$

$$PBK = R\$ 1,288 \text{ por quilograma de Bio-óleo}$$

### 1.6.2 valor do Biochar

Conforme uma pesquisa feita por Trazzi *et, al.* (2018), Novotny et al. (2015) e Blackwell (2010), para poder estipular o custo do biochar, foi desenvolvida formulas descritas na tabela 05. Tendo como base o valor mínimo e máximo de aplicação do Biochar, conforme a pesquisa de Blackwell (2010). Foi encontrado o seguinte valor médio para o biochar, conforme dados referentes ao ano de 2018.

Segundo o Site Investing (2018) 1 dolar americano equivale a 0,7441 dolare australiano, tendo como referência o ano de 2018. A tabela 25 apresenta o valor do Biochar por toneladas.

**Tabela 25:** Valor do Biochar

<b>Dados do biochar (Blackwell (2010))</b>	
Preço mínimo de aplicação do bio char (AU\$)/há	\$ 40,00
Preço máximo de aplicação do bio char (AU\$)/há	\$ 170,00
cotação de AU\$ em dólar	\$ 0,74
toneladas de biochar por hectare	6
Preço mínimo do biochar por toneladas (\$)	\$ 4,96
Preço máximo do biochar por toneladas (\$)	\$ 21,08
Preço médio do biochar por toneladas (\$)	\$ 13,02

Fonte: Autor (2019)

Conforme a pesquisa feita por Blackwell (2010), onde aplicou biochar de diferentes biomassas no solo e estimou o gasto para isso, foi calculado o valor do biochar, tendo como base sua aplicação no solo, que além de ser um substituto para o calcário, aumenta a produtividade das culturas.

O valor do biochar encontrado foi de U\$ 13,02 a tonelada. Ao utilizarmos a equação 12, encontramos o valor do biochar em R\$/kg.

$$PBK = (13,02 / 1000) \times 3,68 \quad (\text{Eq. 12})$$

$$PBK = \text{R\$ } 0,05 \text{ por quilograma de Biochar}$$

### 1.6.3 valor do Biogás

O valor do biogás foi determinado por equivalência, conforme a literatura brasileira, autores como Oliveira (2009), Lima e Passamani (2012) e Saiki (2018), afirmam que 1m<sup>3</sup> de biogás equivale a 0,55 litros de óleo diesel. Diante disso calculou-se o valor do biogás através da equação 13. Levando em consideração dados da ANP referente ao preço médio do Diesel, tendo como base o ano de 2018, no valor de R\$ 3,54.

$$PBG = 0,7645 \times 3,54 \quad (\text{Eq. 13})$$

$$PBG = \text{R\$ } 2,706 \text{ por quilograma de Biogás}$$

### 1.6.4 valor total dos subprodutos

O valor total dos subprodutos foi calculado pela equação 14, obtendo o seguinte resultado.

$$PT = PBK + PKB + PBG \quad (\text{Eq. 14})$$

$$PT = 0,05 + 1,288 + 2,706$$

$$PT = 4,044 \text{ R\$/kg de produtos}$$

O valor total dos produtos, Biochar, Bio-óleo e Biogás foi de R\$ 4,044 por quilograma de produto.

## 1.7 BALANÇO ENERGÉTICO

O balanço energético da pirólise foi calculado conforme o poder calorífico dos seus produtos. O poder calorífico do biochar e Bio-óleo foi encontrado em laboratório, o do Biogás foi estimado conforme literatura devido não ter sido possível a realização dos ensaios por falta de equipamentos. O Valor de kWh foi concebido conforme tabela da Energisa referente ao ano de 2018.

**Tabela 26:** Valor do Bio-óleo e biochar em energia

Produtos	Valor calculado R\$/kg	Poder Calorífico (Mj/kg)	Equivalencia em energia kWh	Valor do kWh - (Reator LEDBIO)	Valor do kWh (Energisa)	Valor em reais por kg de produtos (Energisa)
Bio-óleo	R\$ 1,288	34,35	9,5416743	R\$ 0,135	0,600008	R\$ 5,73
Biochar	R\$ 0,05	11,783	3,273058174	R\$ 0,015	0,600008	R\$ 1,96
Biogás	R\$ 2,706	7,5	2,083335	R\$ 1,299	0,600008	R\$ 1,25
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 4,04</b>			-		<b>R\$ 8,94</b>

Fonte: Autor (2019)

Conforme mostra a tabela 26, 1 quilograma de bio-óleo rende R\$ 5,73 em energia elétrica. E 1 quilograma de biochar rende R\$ 1,96 em energia elétrica, e 1 quilograma de Biogás rende R\$ 1,25 em energia elétrica, tudo conforme valor do kWh da Energisa.

Se compararmos o valor do kWh por cada quilograma de produtos e o valor para produção de energia elétrica com a tarifa da Energisa com cada quilograma de produtos, obtemos a seguinte tabela. Considerando o valor do Dolar em Reais sendo 3,68, conforme o Site Investing (2018), tendo como base o ano de 2018.

**Tabela 27:** Valor Comparação dos valores dos Subprodutos

<b>Produtos</b>	<b>Valor em reais por kg de produtos (Reator LEDBIO)</b>		<b>Valor em reais por kg de produtos (Energisa)</b>		<b>Economia</b>
<b>Bio-Óleo</b>	R\$	1,288	R\$	5,73	R\$ 4,437
<b>Biochar</b>	R\$	0,050	R\$	1,96	R\$ 1,914
<b>Biogás</b>	R\$	2,706	R\$	1,25	-R\$ 1,456
<b>TOTAL</b>	<b>R\$</b>	<b>4,044</b>	<b>R\$</b>	<b>8,939</b>	<b>R\$ 4,895</b>

Fonte: Autor (2019)

Observa-se que 1 quilograma de bio-óleo representa R\$ 1,288 em kWh, 1 quilograma de Biochar representa R\$ 0,05 em kWh e 1 quilograma de biogás representa R\$ 2,706 em kWh. Comparados com o valor do kWh da energisa cada quilograma dos produtos, bio-óleo, biochar, e biogás, representam R\$ 5,73, R\$ 1,96 e R\$ 1,25 respectivamente.

Ao analisarmos tal fator, identificamos que o kWh para 1 quilograma de Bio-óleo e para 1 quilograma de bio-char se mostram mais vantajosos economicamente do que o valor do kWh da energisa para cada quilograma deste produtos. Gerando uma economia de R\$ 4,437 com o bio-óleo e de R\$ 1,914 para o Biochar.

O Biogás demonstrou desvantagem econômica ao comparado com o valor do kWh da Energisa. Tendo um valor negativo de – R\$ 1,456. Isso se dá devido ao seu baixo poder calorífico se comparado com o bio-óleo.

## 1.8 GASTO COM A PIRÓLISE

A pirólise possui um gasto de energia para produção dos produtos, conforme foi relatado na tabela 23. Os produtos possuem um valor calculado como matéria prima e outro para produção de energia elétrica, conforme o valor referencia da Energisa em kWh, conforme tabela 26. A tabela 14 apresentou os rendimentos das frações sólidas, aquosa, gasosa e do bio-óleo. Nesta pesquisa desconsiderou o valor da fração aquosa pelo fato de ainda não se ter tantas pesquisas sobre o assunto na literatura e pela falta de equipamentos necessários para tal.

A tabela 28 mostra o rendimento dos produtos em cada tempo, tanto em porcentagem, quanto em gramas e quilogramas. O valor calculado em Valor em R\$/kg e o valor de geração de energia conforme preço do kWh no estado do Tocantins. Foi calculado também o gasto energético da pirólise para produção dos produtos.

**Tabela 28:** Comparação entre o gasto energético e o valor produzido pela pirólise.

Tempo	Produtos	Rendimento %	Rendimento em Gramas	Rendimento em Kg	Valor em R\$/kg - LEDBIO	Valor em R\$/kg - Energisa	Gasto Energético da pirólise R\$
90 minutos	Bio-Óleo	6,71	2,684	0,002684	R\$ 0,0035	R\$ 0,0154	3,600048
	Biochar	61,07	24,428	0,024428	R\$ 0,0012	R\$ 0,0480	
	Biogás	13,15	5,26	0,00526	R\$ 0,0142	R\$ 0,0066	
120 minutos	Bio-Óleo	8,1	3,24	0,00324	R\$ 0,0042	R\$ 0,0185	4,800064
	Biochar	64,2	25,68	0,02568	R\$ 0,0013	R\$ 0,0504	
	Biogás	12,81	5,124	0,005124	R\$ 0,0139	R\$ 0,0064	
150 minutos	Bio-Óleo	8,4	3,36	0,00336	R\$ 0,0043	R\$ 0,0192	6,00008
	Biochar	62,65	25,06	0,02506	R\$ 0,0013	R\$ 0,0492	
	Biogás	14,22	5,688	0,005688	R\$ 0,0154	R\$ 0,0071	
180 minutos	Bio-Óleo	9,38	3,752	0,003752	R\$ 0,0048	R\$ 0,0215	7,200096
	Biochar	61,85	24,74	0,02474	R\$ 0,0012	R\$ 0,0486	
	Biogás	13,79	5,516	0,005516	R\$ 0,0149	R\$ 0,0069	

Fonte: Autor (2019)

Nesta tabela percebe-se o rendimento em porcentagem de cada produto nos quatro tipos de tempos diferentes. Logo depois analisa-se o rendimento em quilogramas de cada produto em cada tempo diferente, e o gasto energético da pirólise de cada tempo diferente.

Os maiores valores em R\$/kg de bio-óleo se deu na maior temperatura, porém nesta também foi o maior gasto de energia com a pirólise. O maior valor de R\$/kg para o biochar se deu no tempo de 120 minutos. E o maior valor de R\$/kg para o biogás se deu no tempo de 150 minutos. Todavia o tempo de 90 minutos foi o que menos consumiu energia na pirólise, comparado aos demais.

Com isso chegou-se a tabela 29 , que apresenta o valor total gasto para produzir os produtos e o valor calculado em R\$/kg destes produtos, obtendo assim a diferença em reais.

**Tabela 29:** Diferença entre o gasto energético da pirólise e o valor dos produtos produzidos pela pirólise.

VALOR DOS PRODUTOS - LEDBIO						
TEMPO	Valor do BIO-ÓLEO	Valor do BIOCHAR	Valor do BIOGÁS	Valor TOTAL	Gasto Energético da pirólise R\$	DIFERENÇA R\$
90 minutos	R\$ 0,0035	R\$ 0,0012	R\$ 0,0142	R\$ 0,0189	R\$ 3,60	<b>-R\$ 3,5811</b>
120 minutos	R\$ 0,0042	R\$ 0,0013	R\$ 0,0139	R\$ 0,0193	R\$ 4,80	<b>-R\$ 4,7807</b>
150 minutos	R\$ 0,0043	R\$ 0,0013	R\$ 0,0154	R\$ 0,0210	R\$ 6,00	<b>-R\$ 5,9791</b>
180 minutos	R\$ 0,0048	R\$ 0,0012	R\$ 0,0149	R\$ 0,0210	R\$ 7,20	<b>-R\$ 7,1791</b>

Fonte: Autor (2019)

Observa-se que a menor diferença foi em relação ao tempo de 90 minutos, ou seja, a que demonstrou ser a mais vantajosa. Já o tempo de 180 minutos apresentou o maior diferença, sendo assim, o maior gasto de produção com o menor retorno.

A tabela 30 apresenta os mesmo dados, porém comparando o valor dos produtos para produção de energia conforme valores do kWh da tabela da Energisa.

**Tabela 30:** Diferença entre o gasto energético e o valor dos subprodutos produzido pela pirólise.

VALOR DOS PRODUTOS - LEDBIO							
TEMPO	Valor do BIO-ÓLEO	Valor do BIOCHAR	Valor do BIOGÁS	Valor TOTAL	Gasto Energético da pirólise R\$	DIFERENÇA R\$	
90 minutos	R\$ 0,0154	R\$ 0,0480	R\$ 0,0066	R\$ 0,0699	R\$ 3,60	<b>-R\$</b>	<b>3,5301</b>
120 minutos	R\$ 0,0185	R\$ 0,0504	R\$ 0,0064	R\$ 0,0754	R\$ 4,80	<b>-R\$</b>	<b>4,7247</b>
150 minutos	R\$ 0,0192	R\$ 0,0492	R\$ 0,0071	R\$ 0,0756	R\$ 6,00	<b>-R\$</b>	<b>5,9245</b>
180 minutos	R\$ 0,0215	R\$ 0,0486	R\$ 0,0069	R\$ 0,0770	R\$ 7,20	<b>-R\$</b>	<b>7,1231</b>

Fonte: Autor (2019)

Observa-se que a menor diferença foi em relação ao tempo de 90 minutos, ou seja, a que demonstrou ser a mais vantajosa. Já o tempo de 180 minutos apresentou o maior diferença, sendo assim, o maior gasto de produção com o menor retorno. O valor da diferença dos produtos para produção de energia se torna mais vantajoso do que o valor de produção como matéria prima, Todavia deve-se considerar os gastos na produção de energia.

## CAPÍTULO VI

## 1. CONCLUSÕES

A pirólise do Lodo de Esgoto se mostra uma alternativa sustentável tanto ecologicamente, quanto energeticamente. Uma vez que utiliza um resíduo para produzir novos produtos que apresentam poder calorífico ideais para produção de energia elétrica, e agregam valor a venda como matéria prima.

O estudo mostrou que a máxima produção da fração aquosa foi obtido no menor tempo de pirólise, 90 minutos, o que de certa forma influencia diretamente na produção dos demais subprodutos.

A análise estatística mostrou que para a produção da fração gasosa o tempo não influencia estatisticamente. Todavia foi observado que a maior produção da fração gasosa se deu no tempo de 150 minutos. Porém tais dados obtidos foram por meio de equações de diferença, devido não ser possível coletar os gases produzidos para uma real análise de rendimento.

O melhor rendimento do bio-óleo se deu na maior temperatura, isto porque na menor temperatura maior foi a fração aquosa o que diminui a produção do bio-óleo. A análise estatística apresentou que o tempo influencia diretamente na produção do bio-óleo, porém quanto maior o tempo maior é o consumo de energia. Conforme as tabelas 28,29 e 30 pode-se concluir que o tempo mais favorável economicamente para produção do bio-óleo é o de 90 minutos a uma temperatura de 450 °c e uma taxa de aquecimento de 30 °C/mim. Isso porque quanto menor o tempo menor foi o consumo de energia para produção do bio-óleo, o que influencia diretamente nos gastos, gerando assim uma menor diferença.

O valor do bio-char foi encontrado conforme cálculos de produtividade de uma fazenda na Australia. Sendo assim chegou a conclusão que o valor médio do biochar foi de U\$ 0,013 o kilograma. Conforme a análise estatística, o tempo não teve significância na produção do biochar, sendo os valores obtidos muito próximos. Porém conforme análise observou-se que o menor tempo é o economicamente mais vantajoso, devido o fato de que quanto mais tempo a biomassa passa no reator pirolítico maior é o consumo de energia, tornando assim cada vez mais inviável.

O menor gasto de pirólise foi o de 90 minutos, representando um gasto em reais de R\$3,6. Ao adicionar 40 gramas da biomassa do lodo de esgoto no reator pirolítico a 90 minutos pode-se obter 2,684 gramas de bio-óleo, 24,428 gramas de Biochar e 5,26 gramas de Biogás. Isso representa um valor de R\$ 0,0189 gerados com a pirólise de 90 minutos e de R\$ 0,0699 para produção de energia conforme preço do kWh da energisa. Diminuindo o gasto para produção dos produtos pelo valor agregado do produto, observamos que existe um déficit de R\$ 3,5811 reais. Ou seja. O gasto para produção da pirólise é maior do que o valor agregado dos subprodutos.

Porém, não estão inclusos nestes cálculos o valor da fração aquosa. Bem como observa-se que o valor pesquisado refere-se a apenas 40g de material adicionado no reator pirolítico. E quanto maior for a quantidade de biomassa, maior tende a ser a redução no custo de produção.

Sugere-se que novas pesquisas sejam feitas correlacionando os valores obtidos, com uma maior quantidade adicionada ao reator pirolítico, bem como um reator pirolítico em escala industrial, analisando o potência do mesmo.

O valor gasto com o lodo de esgoto depositado em aterros sanitários pode ser alto, o que torna a pirólise viável, tanto na parte econômica quanto ambiental. Porém pesquisas devem ser feitas para que valores precisos sejam determinados.

## **CAPÍTULO VII**

## 1. REFERENCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE CALCÁRIO AGRÍCOLA (Abracal). Disponível em : < <https://www.abracal.com.br/estatisticas>> Acesso em : 03 de Setembro de 2019.

AGÊNCIAFINANCEIRA.<http://www.agenciafinanceira.iol.pt/economia/crudepetroleobrent/12888044058.html>. Acesso em: 30.6.2019.

AIRES, R. D.; et al. **Pirólise**. III Fórum de Estudos Contábeis 2003, Faculdades Integradas Claretianas – Rio Claro – SP – Brasil, 2003.

ALEXANDRE, P. G. **AVALIAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIO-ÓLEO POR TERMOCATÁLISE COM ÓXIDO DE CÁLCIO DE LODO DE ESGOTO DOMÉSTICO**. 2013. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2013.

BARROS, D. COGERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOGÁS A PARTIR DE LODO BIOLÓGICO. **10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural**. Universidade de São Paulo – USP – São Paulo, 2015.

BRASIL. Consulta Pública – Versão Preliminar para Consulta Pública do Plano Nacional de Resíduos Sólidos – **Ministério da Meio Ambiente** - Brasília - Setembro de 2011.

BREWER, Catherine E. et al. Criteria to select biochars for field studies based on biochar chemical properties. **Bioenergy Research**, v. 4, n. 4, p. 312-323, 2011.

CABALLERO, J. A. et al., Characterization of sewage sludge by primary and secondary pyrolysis. **J. Anal. App. Pyrolysis**, v. 40-41, p. 433-450, 1997.

CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, 2003, 210 p.

CUNHA, E. A. A. et al., ASPECTOS HISTÓRICOS DA ENERGIA EÓLICA NO BRASIL E NO MUNDO. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 8, n. 4, 2019.

DEVI, P.; SAROHA, A. K. Effect of temperature on biochar properties during paper mill sludge pyrolysis. **International Journal of ChemTech Research**, v. 5, n. 2, p. 682-687, 2013

ENERGISA. Tabela DE kwh. Disponível em :  
<<https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>>. Acessado em Setembro de 2019.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Balanco Energético de 2018**. Disponível em: <<http://epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2018>>. Acessado em: Janeiro de 2019.

FILHO, E. S.; et al. Análise da competitividade econômica do potencial de produção de energia elétrica a partir do biogás proveniente de dejetos bovinos em Alagoas. **Diversitas Journal**, v. 3, n. 2, p. 315-328, 2018.

FROEHLICH, P. L.; et al. CARACTERÍSTICAS DA CARBONIZAÇÃO DA ACÁCIA MEARSII DE WILD EM LABORATÓRIO. **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Campina Grande, 2010.

FROERNER, S. et, al. TRANSESTERIFICAÇÕES DE ÓLEOS VEGETAIS: CARACTERIZAÇÃO PRO CROMATOGRAFIA EM CAMADA DELGADA E DENSIDADE. **Quimica nova**. v. 30, n. 8, p. 2016, 2007.

GARY, J. H.; HANDWERK, G. E. **Petroleum refining technology and economics**. Marcel Dekker Inc. NY. 1984.

GONZAGA, M. I. S. et al. SEWAGE SLUDGE DERIVED BIOCHAR AND ITS EFFECT ON THE GROWTH AND. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 687-695, abr.- jun., 2018.

Hu, Qiang, et al. Effects of binders on the properties of bio-char pellets. **Applied Energy** xxx (2015) xxx–xxx.2015

Huang, J.-P. Cao, P. Shi, X.-Y. Zhao, X.-B. Feng, Y.-P. Zhao, X. Fan, X.-Y. Wei, T. Takarada, Influences of pyrolysis conditions on the production and chemical

composition of the bio-oils from fast pyrolysis of sewage sludge, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* (2014).

INVESTING. AGENCIA FINANCEIRA, COTAÇÃO DE DOLLAR E BARRIL DE PETRÓLEO. Disponível em: <<https://br.investing.com>>. Acesso em Março de 2019.

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Biocombustíveis em estudo:** Pesquisador do IPT realiza treinamento em instituição da Inglaterra para estudo de bio-óleo. Disponível em: <[http://www.ipt.br/noticias\\_interna](http://www.ipt.br/noticias_interna)>. 2016. Acesso em: out/2018.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change. Disponível em: <[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5\\_wg2\\_spmport-1.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wg2_spmport-1.pdf)>. 2014. Acessado em: Novembro de 2018.

KIM, Y.; PARKER, W. A technical and economic evaluation of the pyrolysis of sewage sludge for the production of bio-oil. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 1409–1416, 2008.

LEAL, E. R. M. **Aplicação do processo de pirólise lenta ao lodo de esgoto adicionado de óxido de cálcio e ferro para obtenção de bio-óleo combustível.** 2010. 257 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2010.

MADEIRA, C. S. P. **OBTENÇÃO DE ECOCARVÃO DE PIRÓLISE DO LODO DE ESGOTO PARA ADSORÇÃO DE POLUENTES EM MEIO AQUOSO.** 2017. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2017.

MORPHOLOGICAL TRAITS OF *Eucalyptus grandis* W.Hill ex Maiden SEEDLINGS

MOCELIN, C. **PIRÓLISE DE LODO DE ESGOTO SANITÁRIO: PRODUÇÃO DE ADSORVENTE E ÓLEOS COMBUSTÍVEIS.** Diss. Dissertação (Mestrado em Engenharia)-Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MORALI, U., YAVUZEL, N., SENSÖZ, S. Pyrolysis of hornbeam (*Carpinus betulus* L.) sawdust: Characterization of bio-oil and bio-char. **Bioresource Technology**. ONLINE, 2016.

NATALE, W. et. al. Dose Economica de calcário na produtividade de caramboleiras. **Revista Brasileira de Fruticultura**, p. 1294-1299, 2011.

NETO, L. G. L; COSTA, R. H. R. Tratamento de esgoto sanitário em reator híbrido em bateladas sequenciais: eficiência e estabilidade na remoção de matéria orgânica e nutrientes (N, P). **Eng. sanit. ambient**, v. 16, n. 4, Florianópolis, 2011.

NOVAK, J. M. et al. Designing relevant biochars as soil amendments using lignocellulosic-based and manure-based feedstocks. **Journal of Soils and Sediments**, Berlin, v. 14, p. 330-343, 2014.

PARK, H. J. et al. Clean bio-oil production from fast pyrolysis of sewage sludge: Effects of reaction conditions and metal oxide catalysts. **Bioresource Technology**. V. 101 , p. S83 – S85, 2010.

PEDROZA, M. M. et al. Produção e tratamento de lodo de esgoto: uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 11, p. 147-157, 2010.

PEDROZA, M. M. et al., Características Químicas de lodos de esgotos produzidos no Brasil. **Revista AIDS**. v. 4. n. 2. 35-47 p. 2011a.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Chemical Engineering Handbook**. McGraw-Hill, NewYork, NY. 1984.

QUEIROZ, C. K. et al. CARACTERIZAÇÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS A PARTIR DA BIODIGESTÃO DE LODO DE ESGOTO. **VII Congresso Brasileiro de Energia Solar** –Gramado, 17a 20deabrilde 2018.

SILVA, L. C. A. **Estudo do processo de pirólise de lodo de esgoto em reator de leito fixo em escala laboratorial**. 2012. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agroenergia). Universidade Federal do Tocantins. Palmas, 2015.

SOHI, S. P. et al. **Biochar, climate change and soil**: a review to guide future research. Camberra: CSIRO Land and Water Science Report, 2009. 64 p.

TEIXEIRA, L. F. **ESTUDO DO PROCESSO DE PIRÓLISE TERMOCATALÍTICA COMO ALTERNATIVA AO APROVEITAMENTO DO LODO DE ESGOTO DOMÉSTICO**. 2014. Dissertação (Mestrado em Agroenergia) - Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2014.

Thangalazhy, Suchithra. Et al. Utilization of palm oil sludge through pyrolysis for bio-oil and bio-char production. **Bioresource Technology** ed.178. pg. 65–69. 2015

TRAZZI, P. A. et al. BIOCARVÃO: REALIDADE E POTENCIAL DE USO NO MEIO FLORESTAL. **Ciência Florestal, Santa Maria**, v. 28, n. 2, p. 875-887, abr.- jun., 2018

TOCCHETTO, M. R. L.; Gerenciamento de resíduos sólidos industriais. Curso de Química Industrial. Universidade Federal de Santa Maria. **Departamento de Química-CCNE**, 2005

TONETTI, A. L.; et al. "Tratamento de esgoto e produção de água de reúso com o emprego de filtros de areia." **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 17, n. 3, pg. 287-294. Campinas, 2012.

VAN ZWIETEN, L. et al. A glasshouse study on the interaction of low mineral ash biochar with nitrogen in a sandy soil. **Soil research**, v. 48, n. 7, p. 569-576, 2010.

VIEIRA, G. E. G., Pedroza, M. M., SOUSA, J. D., Pedroza, C. M. O processo de pirólise como alternativa para o aproveitamento do potencial energético de lodo de esgoto—uma revisão. **Revista Liberato**, Novo Hamburgo, v. 12, n. 17, p. 81-95, 2011.

VIERA , G. E. V., REGÔ, F., TEIXEIRA, L. F. Green bio-oil obtained from digested sewage sludge: new substitute bio-fuel to diesel oil in thermoelectric plants. 4th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2017, 17-20 July 2017, Porto, Portugal. **Energy procedia**, v.136 p. 463-467, 2017.

WERTHER, J.; OGADA, T. Sewage sludge combustion. **Progress in Energy and Combustion Science**. v. 25. 55–116 p. 1999.

XIN. Huang, J.-P. Cao, P. Shi, X.-Y. Zhao, X.-B. Feng, Y.-P. Zhao, X. Fan, X.-Y. Wei, T. Takarada, Influences of pyrolysis conditions on the production and chemical composition of the bio-oils from fast pyrolysis of sewage sludge, **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis** (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2014.10.003>.

Xue, Xiangyu. Et al. Hydrothermal and Pyrolysis Treatment for Sewage Sludge: Choice from Product and from Energy Benefit. **Energy Procedia** ed. 66, pg. 301 – 304. 2015