

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CARLOS EDUARDO SILVA ABREU

**COMBUSTÃO *SMOULDERING*: INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA
CONFIGURAÇÃO DO LEITO NO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DO LODO DE
ESGOTO**

VITÓRIA - ES
2015

CARLOS EDUARDO SILVA ABREU

COMBUSTÃO *SMOULDERING*: INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA
CONFIGURAÇÃO DO LEITO NO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DO LODO DE
ESGOTO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração Ciências Mecânicas

Orientador: Prof. Dr. Marcio Ferreira Martins

VITÓRIA - ES
2015

CARLOS EDUARDO SILVA ABREU

**COMBUSTÃO *SMOULDERING*: INFLUÊNCIA DA UMIDADE E DA
CONFIGURAÇÃO DO LEITO NO TRATAMENTO TERMOQUÍMICO DO LODO DE
ESGOTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de concentração Ciências Mecânicas.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Marcio Ferreira Martins, *Ph.D*

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES
Orientador

Prof. Marcia Regina Pereira Lima *D.Sc*

Instituto Federal do Espírito Santo – IFES
Banca Examinadora Externa

Prof. Emanuel Negrão Macêdo *D.Sc.*

Universidade Federal do Para - UFPA
Banca Examinadora Externa

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos aqueles que me auxiliaram durante o processo de confecção deste trabalho.

À minha família, a qual sempre me deu suporte e condição para que pudesse me dedicar integralmente ao mestrado e apoiaram a minha decisão em seguir a carreira acadêmica.

Aos meus colegas de mestrado, em especial ao meu colega Alex por sempre estar presente quando precisei de ajuda durante os experimentos desse trabalho.

Ao professor Elias Dalvi por toda a ajuda em qualquer problema encontrado no laboratório, sempre mostrando como sua experiência o torna um profissional diferenciado.

Finalmente, um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Marcio, o qual confiou em mim e me deu essa chance que possibilitou a minha entrada no mundo acadêmico.

A todos, muito obrigado!

RESUMO

A necessidade da busca por fontes alternativas de energia que auxiliem na geração energética associada ao processamento térmico de algum produto de maneira sustentável ou racionalizada é um assunto de extrema importância. Além disso, com o fator ambiental – que após a lei nº 12.305/10 de destinação de resíduos sólidos, a qual prevê a redução na geração de resíduos urbanos – o gerenciamento de resíduos torna-se condição incontornável na gestão ou implantação de qualquer sistema ou processo. Tendo em vista essa demanda, o Lodo de Fossa Séptica (LFS) é utilizado nesse trabalho com o intuito de realizar uma análise referente ao potencial de geração de energia, e, ao mesmo tempo, sugerindo um modo auto-sustentável de tratamento termoquímico visando a redução do seu volume. Portanto, a influência da umidade do material e do tipo de configuração do leito de combustão (co-corrente ou contra-corrente) foi estudada. Inicialmente, foi realizada uma análise do poder calorífico superior (PCS) do lodo em função da sua umidade, e os resultados obtidos mostraram que para uma redução da umidade de 20% até que o lodo esteja completamente seco, ou seja, a 0%, o PCS elevou-se de 7487 até 8480 kJ.kg⁻¹, o que representa um aumento de, aproximadamente, 14% no potencial energético do LFS. Em seguida, foi realizada a análise da combustão *smouldering* contra-corrente do lodo em função da umidade. Tal análise mostrou que a redução da umidade acarreta no aumento da temperatura máxima obtida no processo (962 até 1026°C) e, além disso, gera um aumento da velocidade de propagação da frente de combustão, de 2,43 até 2,99 mm.min⁻¹. A análise referente ao processo co-corrente apresentou resultados similares, de forma que, com a redução da umidade elevou-se a temperatura máxima de operação e a velocidade de propagação da frente de combustão. Finalmente, comparou-se os resultados do processo contra-corrente e co-corrente, apontando que para o mesmo teor de umidade, o processo co-corrente apresentou maiores temperaturas e menores velocidades de propagação da frente de combustão. Paralelamente às análises supracitadas, foi verificado o teor de material inerte no lodo comparando a massa da amostra antes e após o experimento. Todos os ensaios apresentaram teor próximo de 52% de matéria inerte.

Palavras-chave: combustão *smouldering*, co-corrente, contra-corrente, lodo de fossa séptica, umidade.

ABSTRACT

The need to search for alternative energy sources that assist in energy generation associated with the thermal processing of any product or rationalized in a sustainable way is a matter of great importance. In addition to this fact, the environmental factor - that after the law disposal of solid waste - becomes an obligatory condition in the management or deployment of any system or process. Given this demand, the Sewage Sludge (SS) is used in this work in order to conduct an analysis regarding its power generation potential, while suggesting a self-sustaining way of a thermochemical treatment. Therefore, the influence of the material's moisture and the type configuration of combustion fixed bed (co-current or counter-current) is studied in this paper. Initially, an analysis of the high heat value (HHV) of the sludge as a function of its moisture was performed. The results showed that for a decrease of the humidity of 20% until the sludge is completely dry, i.e. 0%, the HHV increased from 7487 to 8480 $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, which represents an increase of approximately 14% in SS energy potential. Then, an analysis of the smouldering combustion of sludge counter-current as a function of the moisture was conducted. This analysis showed that the reduction of moisture causes an enhance in the maximum temperature obtained in the process (962 to 1026 ° C), in addition, it also generated an increase of the combustion front speed, from 2.43 to 2.99 $\text{mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Analyses of the cocurrent process showed similar results, such as: the remission of the humidity content elevated the maximum operating temperature and the velocity of propagation of the combustion front. Finally, the results of the process of counter-current and co-current were compared, indicating that for the same moisture content, co-current process had higher temperatures and lower velocities of propagation of the combustion front. In parallel to the analysis above, it was verified the inert material content in the sludge comparing the mass of the sample before and after the experiment. All tests showed a content close to 52% of inert matter.

Keywords: smouldering combustion, co-current, counter-current, sewage sludge, moisture.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS GERAIS.....	13
1.1.1. Objetivos Específicos	14
2. ESTADO DA ARTE	15
2.1. CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DO LFS POR PROCESSOS DE COMBUSTÃO AUTO-SUSTENTÁVEIS	16
2.1.1. Combustão <i>Smouldering</i>	16
2.1.1.1 Gaseificação, a Combustão Incompleta do LFS.....	18
2.1.1.2 Combustão Direta do LFS	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1. LODO DE FOSSA SÉPTICA.....	26
3.1.1. Formação do LFS.....	26
3.1.2. Precauções Necessárias	27
3.1.3. Pré-Tratamento do Combustível.....	27
3.2. OBTENÇÃO DO PODER CALORÍFICO DO LFS	29
3.2.1. Bomba Calorimétrica	29
3.2.2. Sistema de Aquisição de Dados.....	30
3.2.3. Metodologia	31
3.3. PREPARAÇÃO DO LFS PARA COMBUSTÃO.....	33
3.3.1. Granulometria.....	33
3.3.2. Umidade	33
3.4. CÉLULA DE COMBUSTÃO	33
3.4.1. Abastecimento da Célula.....	35
3.4.2. Ignição.....	36
3.4.3. Controle de Vazão	38
3.4.4. Aquisição de Dados.....	38
3.4.5. Coleta de Cinzas	38

3.5.	ARRANJO DO LEITO: CO-CORRENTE E CONTRA-CORRENTE	39
3.6.	METODOLOGIA DE ANÁLISE DE RESULTADOS	41
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1.	PODER CALORÍFICO DO LFS.....	42
4.2.	COMBUSTÃO <i>SMOULDERING</i> CONTRA-CORRENTE	42
4.2.1.	Temperatura Máxima de Operação	43
4.2.2.	Velocidade de Propagação da Frente de Combustão	44
4.3.	COMBUSTÃO <i>SMOULDERING</i> CO-CORRENTE	45
4.3.1.	Temperatura Máxima de Operação	46
4.3.2.	Velocidade de Propagação da Frente de Combustão	47
4.4.	COMPARAÇÃO ENTRE O ARRANJO DE COMBUSTÃO <i>SMOULDERING</i> CO-CORRENTE E CONTRA-CORRENTE	48
4.4.1.	Temperatura Máxima de Operação	48
4.4.2.	Velocidade de Propagação da Frente de Combustão	49
4.4.3.	Teor de Matéria Inerte	50
5.	CONCLUSÕES	52
5.1.	PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	53
	REFERÊNCIAS	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.....	15
Figura 2 - Formas de propagação da frente de combustão no processo de Combustão <i>smouldering</i> . (a) Combustão Co-corrente, (b) Combustão Contra-corrente.....	17
Figura 3 - Influência do fator de ar no PCI e composição do produto final de gaseificação.	19
Figura 4 - Influência da Taxa de Alimentação de LFS no PCI e composição do produto final de gaseificação.....	20
Figura 5 - Fluxo de gás no processo de gaseificação e filtragem em lotes	22
Figura 6 - Sistema de Funcionamento de uma Fossa Séptica.	26
Figura 7 - Estágios de tratamento do LFS. (a) Lodo imediatamente retirado da fossa, (b) lodo exposto à atmosfera por sete dias, (c) lodo retirado para amostragem.	28
Figura 8 - LFS pulverizado em pallets.	29
Figura 9 - Representação de uma Bomba Calorimétrica.....	30
Figura 10 - Bomba Calorimétrica (a), Sistema de Aquisição de Dados (b), Termopar tipo K (c).....	30
Figura 11 - Estufa de Secagem (a) e balança de precisão (b).	32
Figura 12 - Peneiras utilizadas no controle de granulometria (a), lodo coletado e lodo triturado (b).....	33
Figura 13 - Célula de Combustão.....	34
Figura 14 - Bancada experimental completa.....	35
Figura 15 - Distribuição da matéria prima dentro da célula de combustão.....	36
Figura 16 - Cone de Ignição.....	36
Figura 17 - Gráfico de Temperaturas em função do tempo do cone de ignição.....	37
Figura 18 - Placa isolante do cone de ignição.....	37
Figura 19 - Compressor (a) e rotâmetro (b).....	38
Figura 20 - Cinzas do LFS após (a) e antes do processo de combustão (b).....	39
Figura 21 - Disposições de montagem da célula para os experimentos de combustão co-corrente e contra-corrente.	40
Figura 22 - Gráfico do Poder Calorífico do LFS em função da sua umidade.	42
Figura 23 - Perfis de Temperaturas do LFS durante a combustão Contra-Corrente para a retirada de 0%, 8% e 16% de umidade.	43

Figura 24 - Gráfico de Influência da Umidade do LFS na sua temperatura máxima durante o processo de combustão <i>smouldering</i> contra-corrente.....	44
Figura 25 - Gráfico de Influência da Umidade do LFS na velocidade de propagação de combustão durante o processo de combustão <i>smouldering</i> contra-corrente.	45
Figura 26 - Perfis de Temperaturas do LFS durante a combustão <i>smouldering</i> Co-Corrente para a retirada de 0%, 8% e 16% de umidade.	46
Figura 27 - Gráfico de influência da umidade do LFS nas temperaturas máximas obtidas no processo de combustão <i>smouldering</i> co-corrente.	47
Figura 28 - Gráfico de Influência da Umidade do LFS na velocidade de propagação de combustão durante o processo de combustão <i>smouldering</i> co-corrente.	48
Figura 29 - Gráfico de temperatura máxima de operação para os métodos de combustão <i>smouldering</i> co-corrente e contra-corrente.	49
Figura 30 - Gráfico de velocidade de propagação da frente de combustão para os métodos de combustão <i>smouldering</i> co-corrente e contra-corrente.	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição do gás obtido na gaseificação de LFS seca	22
Tabela 2 – Teor, em porcentagem, de metais pesados em cada bloco do gaseificador	23
Tabela 3 - Análise Elementar e Imediata do LFS.....	24
Tabela 4 - Análise das cinzas do LFS expressa em porcentagem dos seus principais óxidos.....	24
Tabela 5 - Teor de coliformes presentes no LFS.	27
Tabela 6 - Distribuição dos ensaios realizados	41
Tabela 7 - Síntese dos resultados da combustão <i>smouldering</i> do LFS	51

LISTA DE ABREVIações E SIGLAS

ANEEL – Associação Nacional de Energia Elétrica

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

LFS – Lodo de Fossa Séptica

PROSAB – Programa de Pesquisas em Saneamento Básico

WER – World Energy Resources

LISTA DE SÍMBOLOS

c_p – calor específico a pressão constante [J/g.K];

FA – Fator de Ar

k – constante de isolamento da bomba calorimétrica;

m – massa [g];

m_f – Massa do LFS após ser retirado da estufa [kg];

m_i – Massa do LFS antes de ser inserido na estufa [kg];

PCI – Poder Calorífico Inferior [MJ/kg]

PCS – Poder Calorífico Superior [MJ/kg]

$(R_{A/C})_{est}$ – Razão Ar Combustível Estequiométrica

$(R_{A/C})_{real}$ – Razão Ar Combustível Real

T – Temperatura [K];

U_r – Umidade Retirada do LFS [%];

LETRAS GREGAS

Δ – Variação

1. INTRODUÇÃO

Segundo o Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB, 2009), são produzidos, durante o processo de tratamento de esgoto, cerca de 7,2 milhões de metros cúbicos de lodo de fossa séptica (LFS) anualmente. Tendo em vista uma parcela tão significativa de lodo produzido, busca-se formas de reduzir esse total de forma a reduzir o impacto ambiental causado pelo seu descarte inapropriado.

Atualmente, estuda-se maneiras de destinar o LFS ou descartá-lo da forma menos agressiva ao ambiente possível (TEBBUTT, 1992; HALL, 1992), tendo em vista que o seu descarte inapropriado pode causar danos ao solo, devido às infiltrações, além de ser prejudicial à saúde devido à presença de patógenos. A presença de metais pesados presentes no lodo de fossa séptica é nociva a animais e plantas (TCHOBANOGLIOUS, 1987). Dessa forma, o processamento do LFS visa reduzir sua quantidade de sólidos orgânicos, seu forte odor, eliminar organismos patógenos além de reduzir a sua umidade para facilitar seu descarte e viabilizar seu eventual transporte para uma aplicação posterior.

Uma possível forma de tratar o LFS, é a realização da sua queima, onde este se tornaria um combustível durante tal processo. De acordo com o relatório síntese da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2014) referente ao balanço energético nacional de 2013, 41% da energia nacional é gerada por fontes renováveis, dentre elas fontes, a biomassa. Demirbas (2001) afirma que a biomassa é a única fonte renovável que contém carbono, na forma de matéria orgânica, e que pode ser utilizada na forma sólida, líquida e gasosa. Visando obter fontes alternativas de biomassa, além de madeira e alimentos, a utilização de resíduos urbanos e industriais é vista de forma otimista devido a sua abundância.

1.1. OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho objetiva-se a realizar a combustão *smouldering* como um tratamento termoquímico do LFS de forma que, o produto final deste processo será um material inerte, sem a presença de patógenos e que sua quantidade final seja reduzida. Ying (1991) e Kassura e Imoto (1989) afirmam que o processo de combustão do LFS é benéfico do ponto de vista da eliminação dos patógenos devido às elevadas temperaturas atingidas durante o seu tratamento termoquímico.

1.1.1. Objetivos Específicos

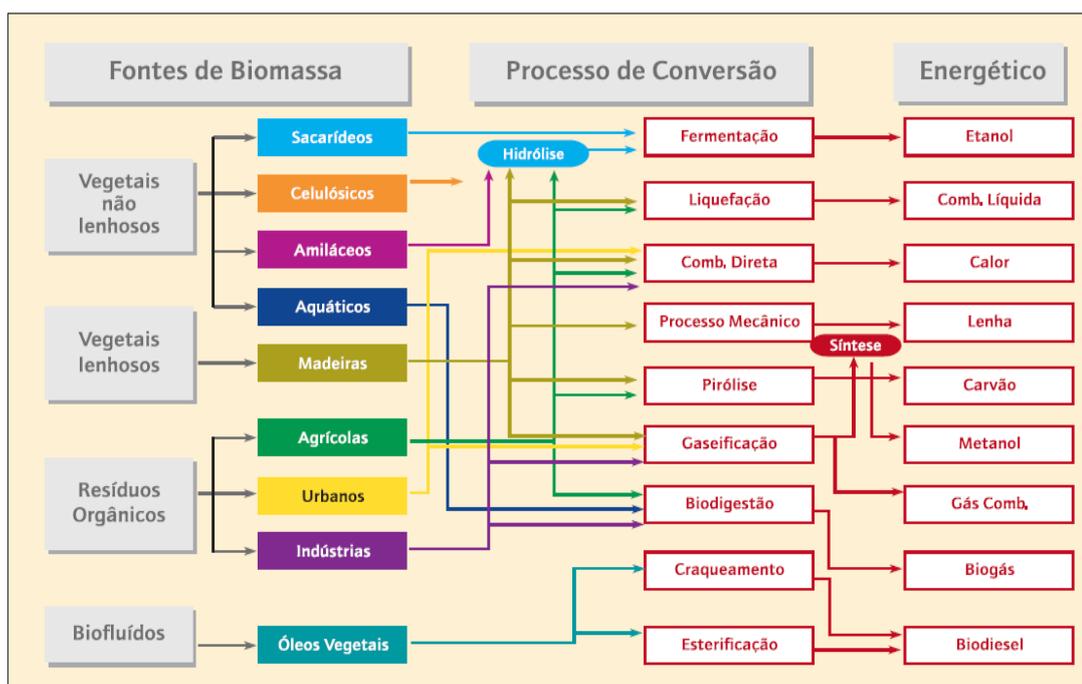
- Analisar o possível potencial do LFS como uma fonte energética;
 - Quantificar o Poder Calorífico do LFS;
- Analisar a influência do teor de umidade e arranjo do leito na geração energética durante o tratamento termoquímico do LFS;
 - Aferir as temperaturas máximas durante o processo para cada arranjo do leito e teor de umidade;
 - Obter as taxas de propagação da frente de combustão para cada arranjo do leito e teor de umidade;
- Quantificar a redução, em massa, da quantidade de lodo de fossa séptica do final do tratamento termoquímico.

2. ESTADO DA ARTE

Como exposto no capítulo anterior, atualmente, a busca pela diversificação da matriz energética tem sido realizada em diversos polos de pesquisa aplicada. Dentre as possíveis vertentes para a redução da utilização de combustíveis fósseis como fonte de energia, está o processo de conversão energética da biomassa. Com o intuito de obter uma melhor compreensão do que já foi realizado com relação à conversão energética da biomassa, em especial, o LFS, faz-se necessário um estudo do estado da arte dessa tecnologia.

De acordo com Leung et al. (2004), com o aumento do poder aquisitivo da população, eleva-se a demanda energética mundial, e com isso, cresce a preocupação com a exploração exacerbada dos combustíveis fósseis para esse fim. Visando criar alternativas renováveis para a produção de energia, muitas pesquisas têm sido realizadas em busca destas fontes. Dentre estas está a biomassa e os resíduos urbanos e industriais, os quais podem ser convertidos em produtos nobres por meio de processos termoquímicos (gaseificação, combustão direta), bioquímicos (biodigestão), como também podem ser utilizados para gerar energia através da combustão direta. As possibilidades de aproveitamento desses combustíveis são mostradas na Figura 1.

Figura 1 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa.



Fonte: Altas de Energia Elétrica no Brasil (2002).

Percebe-se que os resíduos urbanos e industriais podem ser convertidos pela sua combustão direta, gerando energia térmica, podendo então ser utilizados para alimentar ciclos de geração de potência entre outros processos que necessitem de calor para ocorrer. Outro fim para esse combustível é a gaseificação, um processo de combustão incompleta, o qual visa transformar o combustível sólido em um gasoso, facilitando seu transporte e armazenamento.

Visando controlar o processo de conversão energética dos combustíveis sólidos e melhorar seu desempenho, vários autores têm dedicado uma atenção especial à análise dos parâmetros de operação desses processos além de procurar entender o comportamento dessas fontes alternativas quando submetidas aos processos de conversão energética. Tal procedimento comumente é realizado utilizando-se instalações de pequena escala, para que os resultados possam ser reproduzidos para um processo de escala industrial futuramente. Os estudos são realizados utilizando-se uma matriz de parâmetros de entrada visando à melhoria do processo.

2.1. CONVERSÃO TERMOQUÍMICA DO LFS POR PROCESSOS DE COMBUSTÃO AUTO-SUSTENTÁVEIS

Lodo de Fossa Séptica é a designação dada para os resíduos de uma planta de tratamento de esgoto. Esses possuem uma grande quantidade de metais pesados, toxinas orgânicas e microrganismos patogênicos que são nocivos à saúde humana. O LFS é comumente utilizado como fertilizante em várias regiões do mundo, porém outra possibilidade para o seu aproveitamento é a sua utilização como fonte renovável e alternativa de geração de energia (DOGRU et al., 2002).

Como o volume de LFS no Brasil é extremamente abundante, chegando a 7,2 milhões de metros cúbicos por ano, como exposto na sessão anterior, sua utilização pode vir a ajudar na solução de dois problemas de maneira lógica: ao realizar o tratamento termoquímico dessa biomassa, encontra-se uma maneira de gerar energia a partir de uma fonte renovável e, por consequência, de reduzir o volume de resíduos acumulados.

2.1.1. Combustão *Smouldering*

O processo de combustão *smouldering* foi caracterizado por Ohlemiller (1985) como uma queima lenta, sem a presença de chamas que ocorre em meios porosos. A

transição da combustão *smouldering* (sem chama) para *flaming* (com chama) é controlada principalmente pela quantidade de oxigênio presente no processo.

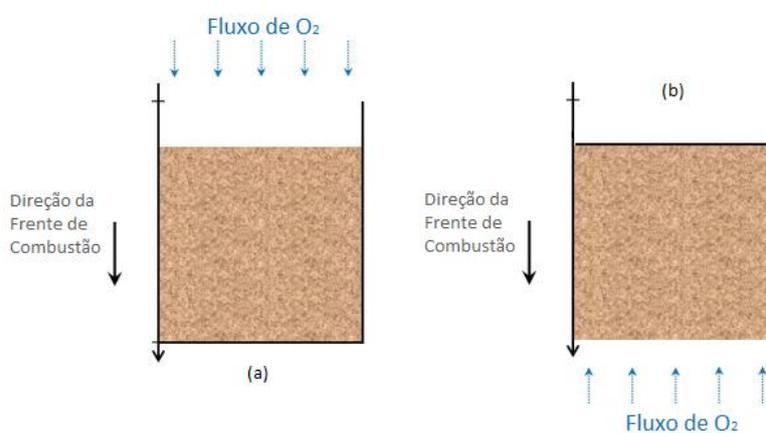
A propagação da frente de combustão nesse processo, foi descrita por Huang et al. (2015) como um processo intrinsecamente dependente da transferência de calor e massa em um meio poroso reativo. O estudo dessa queima ainda pode ser considerado relativamente recente, tendo em vista que a atual literatura apresenta estudos desse comportamento para apenas três combustíveis:

- Celulose (OHLEMILLER, 1985; DI BLASI, 1995);
- Espuma de Poliuretano (OHLEMILLER, 1985; REIN et al., 2007);
- Carvão (HE et al., 2009).

Dessa forma, este trabalho analisa a propagação da frente de queima para os arranjos co-corrente e contra-corrente para a combustão *smouldering* do Lodo de Fossa Séptica.

A combustão *smouldering* pode ocorrer em dois caminhos, o co-corrente e contra-corrente. Esses métodos caracterizam a forma em que a frente de combustão evolui com relação ao fluxo do agente oxidante. Dessa forma, a combustão *smouldering* co-corrente ocorre de forma que a sua frente de combustão percorra o mesmo caminho que o agente oxidante, enquanto a forma contra-corrente toma o caminho oposto ao fluxo de oxigênio. A Figura 2 representa ambas as formas de propagação da frente de combustão no processo de combustão *smouldering*.

Figura 2 - Formas de propagação da frente de combustão no processo de Combustão *smouldering*.
(a) Combustão Co-corrente, (b) Combustão Contra-corrente.



Fonte: Huang et al. (2015), adaptada pelo autor.

Os processos de combustão *smouldering* co-corrente e contra-corrente apresentam comportamentos diferentes quanto à cinética da combustão. Ohlemiller e Lucca (1983) realizaram um estudo experimental comparando ambos os caminhos de queima utilizando carvão como combustível. Nesse estudo concluíram que o caminho da frente pelo método de combustão contra-corrente alcança uma propagação estável o método co-corrente se move de forma instável sendo, aparentemente, limitado pela estequiometria da oxidação do carvão. Também concluíram que ambos são limitados pela taxa de adição de oxigênio.

Ainda na mesma linha de pesquisa, Rein et al. (2007) e Yi e Dong (2011) realizaram estudos comparando a combustão co-corrente e contra-corrente da espuma de poliuretano. Rein et al. (2007) desenvolveram um modelo numérico capaz de prever o comportamento de cada uma das frentes de combustão, considerando um caso unidimensional e transiente. Já Yi e Dong (2011) realizaram um procedimento experimental comparativo onde chegaram à conclusão que a combustão co-corrente ocorre mais rapidamente.

2.1.1.1 Gaseificação, a Combustão Incompleta do LFS

Uma das tecnologias de conversão de resíduos em energia é a gaseificação, uma conversão termoquímica, onde um combustível sólido é convertido em um gás combustível através da sua oxidação parcial (RUGGIERO et al., 1999).

O processo de gaseificação em leito fixo e fluidizado apresenta vários parâmetros operacionais, porém o fator de ar, também conhecido como razão de equivalência, é uma das variáveis operacionais mais importantes na gaseificação com ar, como apontado por Narváez et al. (1996) Dogru et al., (2002). O Fator de Ar (FA) pode ser definido como a razão entre a relação ar-combustível durante o processo e a relação estequiométrica, como mostrado na equação 1:

$$FA = \frac{(R_{A/C})_{REAL}}{(R_{A/C})_{EST}} \quad (1)$$

Sendo:

FA : Fator de Ar (ou Razão de Equivalência)

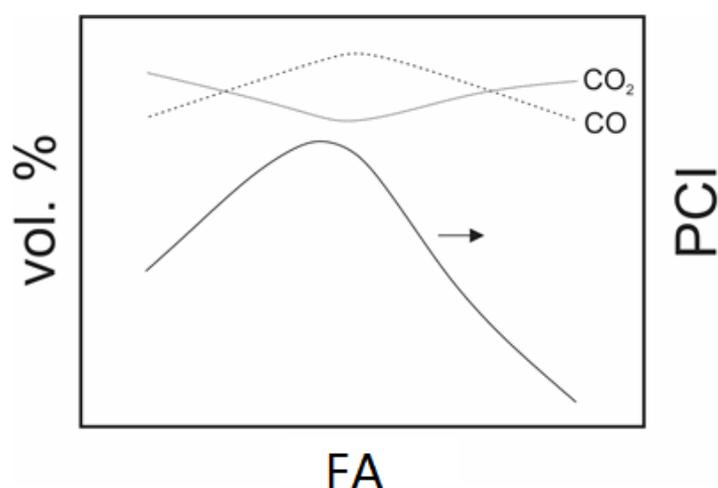
$(R_{A/C})_{REAL}$: Razão Ar/Combustível Real

$(R_{A/C})_{EST}$: Razão Ar/Combustível Estequiométrica

A partir da equação (1) pode-se inferir que o FA representa a quantidade de ar utilizada na gaseificação em relação à quantidade de ar utilizada numa queima estequiométrica, ou combustão completa. Lembrando que, o processo de gaseificação consiste em uma combustão incompleta, visando obter hidrogênio e monóxido de carbono, enquanto a combustão completa converte todo o hidrogênio em água e carbono e dióxido de carbono. Logo, apontar que um processo apresenta um FA de 0,3 conclui-se que este utiliza 30% da quantidade de ar necessária para a realização de uma queima estequiométrica.

Visando interpretar a importância da razão de equivalência no processo de gaseificação de LFS, Guo et al. (2013) realizaram uma análise referente à influência deste e da taxa de alimentação de LFS no gaseificador no processo de gaseificação, conforme apresentadas nas Figuras 3 e 4.

Figura 3 - Influência do fator de ar no PCI e composição do produto final de gaseificação.

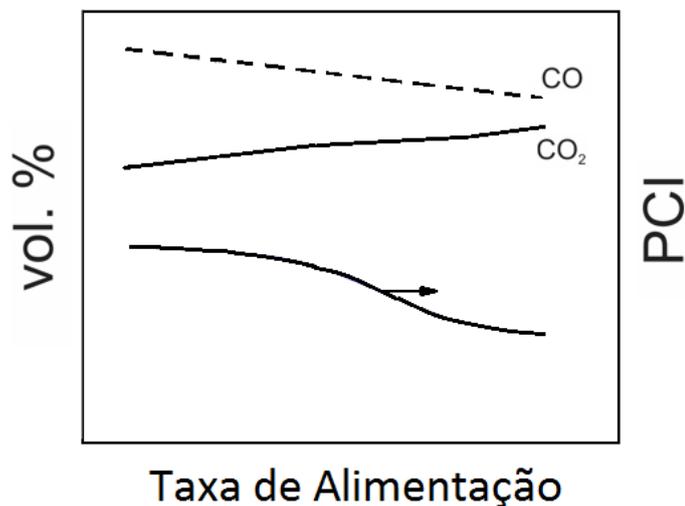


Fonte: Guo et al. (2013), adaptada pelo autor.

Observa-se na Figura 3, de maneira qualitativa, a influência do FA no poder calorífico inferior (PCI) e na composição do produto final do processo de gaseificação. Pode-se perceber que o PCI do gás gerado cresce juntamente com o FA até que um ponto ótimo seja atingido. O contínuo aumento da vazão de ar na entrada do gaseificador, e consequente aumento do FA, irá fazer com que a reação interna se aproxime da combustão completa, gerando uma maior concentração de dióxido de carbono.

A Figura 4 mostra a influência da taxa de alimentação de biomassa na qualidade do produto final da gaseificação.

Figura 4 - Influência da Taxa de Alimentação de LFS no PCI e composição do produto final de gaseificação.



Fonte: Guo et al. (2013), adaptada pelo autor.

Observa-se na Figura 4 que com o aumento da taxa de alimentação de LFS no reator, reduz-se o teor de monóxido de carbono e, conseqüentemente, o PCI do combustível produzido. Isso ocorre pois as reações de quebra do alcatrão não possuem tempo hábil para ocorrer efetivamente. Além disso, uma maior quantidade de combustível, gera uma reação de oxidação mais forte, gerando mais dióxido de carbono no lugar de monóxido. Finalmente, devido à maior taxa de alimentação, o tempo de estadia do LFS na zona de redução é menor, fazendo com que a reação onde o dióxido de carbono é convertido em monóxido não possua tempo suficiente para ocorrer em sua totalidade, logo, menos monóxido de carbono é formado e, por conseqüência, o gás gerado possui um menor valor energético.

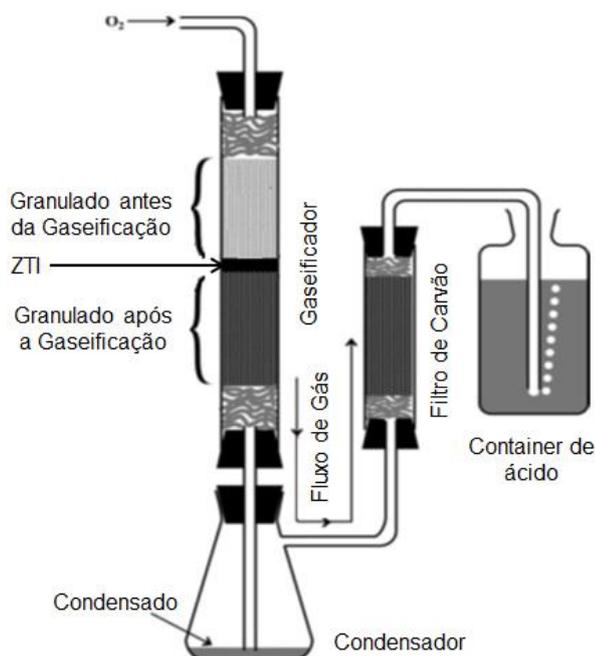
Dogru et al. (2002), citados anteriormente, também realizaram um estudo sobre a gaseificação da biomassa proveniente de LFS. Nesse estudo, um gaseificador *downdraft* de 5KW foi utilizado com o objetivo de obter biocombustíveis e analisá-los, visando verificar se essa biomassa pode se tornar uma alternativa para os combustíveis fósseis. A conclusão desse estudo foi que o lodo de fossa pode produzir gases combustíveis de qualidade que seriam uma alternativa para os combustíveis fósseis no fornecimento de energia. A eficiência térmica obtida foi de, aproximadamente, 40%.

Uma análise sobre a qualidade do *syngas*, ou gás de síntese, obtido através da gaseificação do lodo de fossa foi realizado por Nipattummakul et al. (2010). Nesse estudo, as amostras de biomassa foram gaseificadas em diferentes temperaturas visando obter o comportamento evolucionário do *syngas* entre outras de suas propriedades. Após realizar o processo de gaseificação do lodo de fossa a 700, 800, 900 e 1000 ° C foram obtidas as seguintes conclusões:

- O processo de obtenção de *syngas* por intermédio da biomassa de Lodo de Fossa Séptica é mais lento quando comparado a outras amostras como o papel e restos alimentícios.
- A quantidade de hidrogênio obtido no *syngas* é maior para temperaturas mais elevadas no reator.
- O LFS foi capaz de emitir mais hidrogênio do que o papel e os restos alimentícios quando processados sob as mesmas condições.
- A gaseificação do lodo de fossa e tanque séptico utilizando vapor superaquecido obteve três vezes mais hidrogênio do que a gaseificação utilizando ar atmosférico.
- Baixas taxas da reação de redução a 700 ° C indicam que a biomassa de lodo de fossa deve ser gaseificada a temperaturas elevadas (acima de 800° C), pois baixas taxas de reação indicam alto consumo de vapor superaquecido.

Uma das preocupações ao se realizar a gaseificação do LFS é o destino dos metais pesados e radioativos após esse processo. Um estudo realizado por Marrero et al. (2004) analisou o percurso dos seguintes elementos: cádmio, estrôncio, cobalto, arsênio, mercúrio, zinco e cobre. Após a gaseificação da biomassa, foi observada a composição dos metais em cada bloco do gaseificador. Para uma melhor compreensão dos resultados, a Figura 5 indica as etapas do processo, onde há a captura de cada metal durante a produção do gás de síntese.

Figura 5 - Fluxo de gás no processo de gaseificação e filtragem em lotes



Fonte: Marrero et al. (2004), adaptada pelo autor.

A Figura 5 mostra o gaseificador e os blocos de filtragem utilizados por Marrero et al. (2004) em seu estudo sobre a presença de metais pesados nos gases produzidos durante o processo de gaseificação do LFS. Após realizar o processo de gaseificação, obteve-se um gás com a composição apresentada na Tabela 1:

Tabela 1 - Composição do gás obtido na gaseificação de LFS seca

Gás	Porcentagem por volume
Dióxido de Carbono (CO ₂)	56,2
Monóxido de Carbono (CO)	19,1
Hidrogênio (H ₂)	13,6
Metano (CH ₄)	4,3
Indefinidos	2,4 (estimado)

Fonte: Marrero et al. (2004), adaptada pelo autor.

Além da composição do gás combustível gerado no processo de gaseificação, Marrero et al. (2004) quantificou o teor de cada metal pesado presente nos diferentes componentes de filtragem, conforme mostrado na Figura 5.

Os resultados obtidos no estudo de Marrero et al. (2004) estão descritos expresso na Tabela 2.

Tabela 2 – Teor, em porcentagem, de metais pesados em cada bloco do gaseificador

Metal	Cd	Sr	Cs	Co	As	Hg	Zn	Cu
I	100±0,05	100±0,03	99,9±0,1	99,8±0,27	99,2±2,39	10,9±0,04	99,8±0,08	96,9±1,13
II	-	-	-	0,07±0,13	4,17±1,52	0,52	0,06±0,11	0,94±0,63
III	-	-	-	0,07±0,06	2,25±1,92	86,5	-	1,72±0,48
IV	-	-	0,11±0,19	0,10±0,22	1,32±0,90	2,18±0,03	0,07±0,13	0,40±0,62

- I – Porcentagem de metal retido na forma de carvão no gaseificador
- II – Porcentagem de metal no condensado
- III – Porcentagem de metal no filtro de carvão
- IV – Porcentagem de metal no container de ácido

Fonte: Marrero et al. (2004), adaptada pelo autor.

Com esses dados, Marrero et al. (2004) observou que Cádmio, Estrôncio, Césio, Cobalto e Zinco são completamente retidos na forma de carvão dentro do próprio gaseificador. Uma pequena parcela de Cobre passa pelo carvão do gaseificador, ainda assim, grande parte dessa parcela fica retida na forma de condensado ou é encontrada no filtro de carvão. Quanto ao arsênico, uma pequena, porém significativa parcela passa pelo gaseificador, condensado e filtro de carvão até alcançar o container de ácido. Finalmente, percebe-se que o Mercúrio é o metal que possui mais mobilidade dentro do gaseificador, facilitando o seu escape, porém quase toda a parcela que atravessa o gaseificador é retida pelo filtro de carvão.

2.1.1.2 Combustão Direta do LFS

Outro caminho para a conversão energética de resíduos, é a combustão direta, a qual, de acordo com o relatório da Associação Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2002, p.54) consiste na transformação da energia química dos combustíveis em calor por meio das reações dos elementos constituintes do combustível com o oxigênio fornecido para a reação.

Em um trabalho realizado por Magdziarz e Wilk (2008), pode-se perceber que o LFS possui potencial energético para passar pelo processo de combustão e co-combustão (neste último, sendo misturado com carvão ou madeira), de forma satisfatória. Porém,

para quantificar esse resultado, se faz necessária, a submissão do combustível sólido às análises que irão apontar sua composição e potencial para queima. As análises elementar e imediata do LFS da estação de tratamento estudada por Magdziarz e Wilk são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise Elementar e Imediata do LFS.

Análise Imediata	LFS
Umidade (%)	5,3
Cinzas (%)	33
Análise Elementar	
Carbono (%)	28,9
Hidrogênio (%)	4,4
Nitrogênio (%)	4,1
Oxigênio (%)	20,2
Indefinidos (%) - estimado	4,1
Poder Calorífico (MJ/kg)	
PCI	12,83

Fonte: Magdziarz e Wilk (2013), adaptada pelo autor.

Através dos dados apresentados na Tabela 3 percebe-se, de fato, que o LFS possui o potencial necessário para ser utilizado como fonte de energia, em razão do seu poder calorífico inferior. Entretanto, percebe-se um elevado teor de cinzas, o qual preocupa devido ao seu elevado teor de metais pesados, como citado anteriormente no trabalho de Marrero et al. (2004). Dessa forma, torna-se de grande importância a quantificação dos elementos presentes nas cinzas do LFS. Tal análise é expressa na Tabela 4.

Tabela 4 - Análise das cinzas do LFS expressa em porcentagem dos seus principais óxidos.

SiO₂	CaO	MgO	Fe₂O₃	Al₂O₃	Na₂O	K₂O
25,10	23,53	14,17	13,81	9,80	0,81	0,62

Fonte: Magdziarz e Wilk (2013), adaptada pelo autor.

Além da análise referente ao teor de materiais poluentes oriundos do LFS, também é de grande importância entender a influência da umidade presente no lodo. Uma das

características peculiares da combustão do lodo de fossa é o seu elevado teor de umidade. Werther e Ogada (1999) apontam que o efeito da umidade no processamento do LFS é enorme, tornando técnicas de secagem essenciais tanto para a melhora do aproveitamento energético quanto para a redução do seu volume.

Estudos de combustão anteriores, focados principalmente em carvões com teores muito baixos de umidade, têm ignorado o processo de secagem. Recentemente, no entanto, os pesquisadores começaram a dar atenção para esse processo.

Borodulya et al. (1995) observaram os eventos ocorridos após as partículas de LFS serem colocadas em um leito fluidizado quente mantido a 850°C. Depois de um intervalo de tempo constante, as partículas foram removidas com um sifão de líquido especial (visando não alterar a umidade presente no combustível no momento de sua retirada) arrefecido rapidamente e os seus pesos medidos. Ao repetir o processo, os intervalos de tempo de secagem, pirólise e de oxidação foram determinados. Os resultados mostraram que no momento em que a pirólise foi iniciada, apenas 40% da umidade tinha sido liberada.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho tem como objetivo verificar a possibilidade da redução do material residual das estações de tratamento de esgoto (ETE) por meio do tratamento de conversão termoquímica do LFS e, como consequência, gerar energia a partir deste. Nessa sessão, será, primeiramente, apresentado o material utilizado como combustível, o Lodo de Fossa Séptica e, então, será elucidada a forma do controle dos parâmetros operacionais do processo de combustão *smouldering* do LFS.

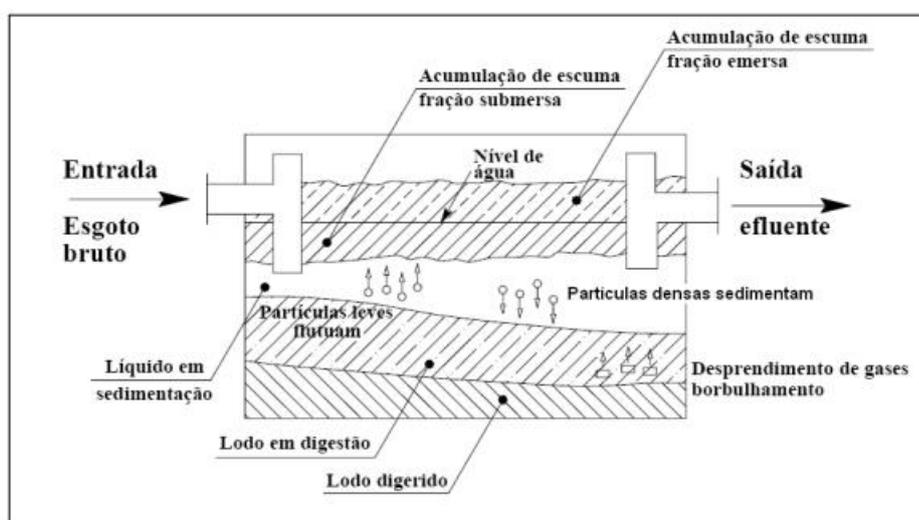
3.1. LODO DE FOSSA SÉPTICA

Lodo de Fossa Séptica é a designação dada ao resíduo formado no processo de tratamento de esgoto (TCHOBANOGLIOUS, 1987). Como citado anteriormente, no Brasil, são gerados cerca de 7,2 milhões de litros de LFS anualmente. Para esse trabalho, o LFS estudado foi retirado de uma estação de tratamento no município de Viana-ES no mês de fevereiro de 2015.

3.1.1. Formação do LFS

O processo de formação do lodo na fossa séptica é representado desde a sua entrada como esgoto até a saída como efluente tratado na Figura 6.

Figura 6 - Sistema de Funcionamento de uma Fossa Séptica.



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas, NBR 7229 (1993).

A Figura 6 mostra o processo de tratamento de resíduos ao passar pela fossa séptica, onde ocorrem os fenômenos de sedimentação, flotação e digestão na parte superior

enquanto na região inferior acontece o acúmulo e decomposição do lodo, material utilizado neste trabalho.

De acordo com Jordão (2005), os efluentes líquidos da fossa séptica são caracterizados pelo baixo teor de materiais sedimentáveis e flutuantes, além da cor escura, odor desagradável e grande quantidade de bactérias. O produto sólido da LFS, o lodo, é composto, basicamente, por água, matéria orgânica e inorgânica.

3.1.2. Precauções Necessárias

Uma das preocupações ao manusear o LFS é o seu teor de patógenos. A Tabela 5 foi retirada de um estudo realizado por Meneses et al. (2001) e, esta mostra o teor de coliformes fecais presentes em uma amostra retirada de uma estação de tratamento de esgoto em Natal – RN.

Tabela 5 - Teor de coliformes presentes no LFS.

Amostras de LFS	UFC/ml
Mínimo	10^5
Médio	10^7
Máximo	10^8

Fonte: Meneses et al. (2001), adaptada pelo autor.

Devido ao teor de patógenos presentes no LFS, tais como os valores expostos na Tabela 5, há a necessidade da utilização de EPI's durante a utilização do material. Nesse trabalho, foram utilizadas luvas para o manuseio do LFS, além de máscaras e óculos durante a pulverização do lodo devido ao material particulado em suspensão.

Von Sperling (2005) afirma que na composição do esgoto, 99,9% é água e apenas 0,1% constituem-se de sólidos orgânicos e inorgânicos, suspensos e dissolvidos, como microrganismos. Tal parcela, apesar de apresenta-se ínfima com relação ao total, justifica a real necessidade de tratar os esgotos.

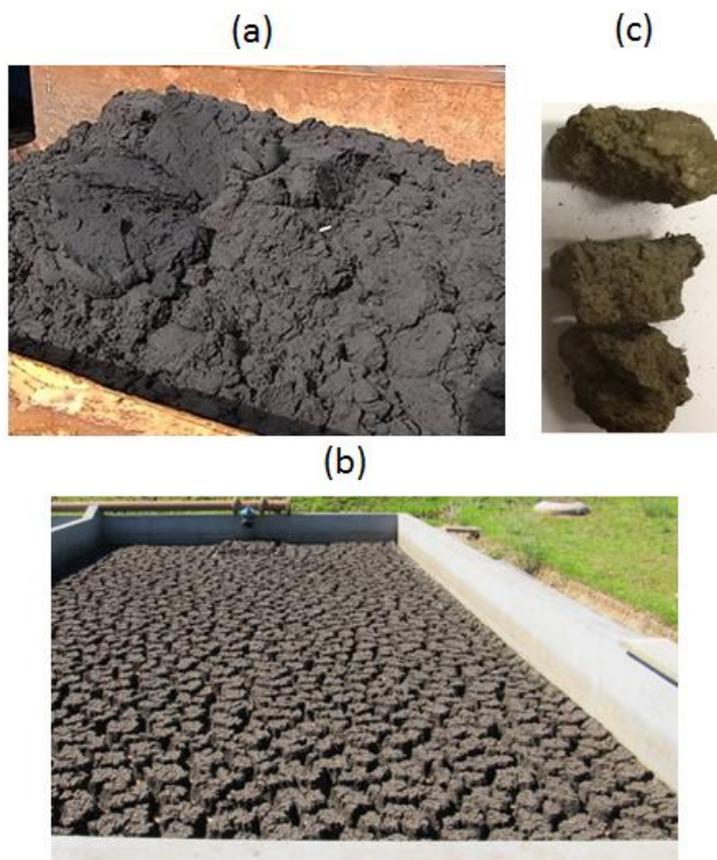
3.1.3. Pré-Tratamento do Combustível

Devido a sua elevada umidade ao ser retirado da fossa séptica, o lodo deve passar por um pré-tratamento de secagem antes de ser utilizado. Neste trabalho, o LFS, ao ser retirado da fossa, passou por um processo de secagem chamado Desaguamento em Leito de Secagem. Neste processo, o LFS é exposto ao ambiente, conforme indicado na Figura 7 (b). O leito de secagem é composto por estruturas retangulares

de alvenaria preenchidas em seu interior com materiais que permitem a drenagem da água presente no lodo. A perda de água ao longo da secagem do lodo também ocorre por meio da evaporação natural. Essa tecnologia apresenta algumas vantagens como: baixo valor de investimento, simplicidade operacional, baixo consumo de energia e de produtos químicos.

Dessa forma, o LFS *in natura*, que se apresenta com teores de umidade elevados foi exposto à atmosfera até atingir um teor de umidade em que este possa ser utilizado nos experimentos desse trabalho. Tal processo, desde a retirada do lodo da fossa até a sua utilização nos experimentos é mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Estágios de tratamento do LFS. (a) Lodo imediatamente retirado da fossa, (b) lodo exposto à atmosfera por sete dias, (c) lodo retirado para amostragem.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como elucidado anteriormente, o LFS ao ser retirado da fossa séptica apresenta um elevado teor de umidade como é mostrado na Figura 7 (a). Antes de ser utilizado neste trabalho, este foi exposto ao ambiente por sete dias para reduzir o seu teor de água

conforme indicado na Figura 7 (b) e, finalmente, o LFS foi retirado e levado ao laboratório com o aspecto presente na Figura 7 (c).

3.2. OBTENÇÃO DO PODER CALORÍFICO DO LFS

Após realizar o pré-tratamento supracitado do LFS, buscou-se obter o poder calorífico da biomassa antes do processo de gaseificação. Esse procedimento foi realizado com auxílio da bomba calorimétrica. Os ensaios foram realizados em uma bancada experimental que se encontra disponível no Laboratório de Combustíveis e Combustão da Universidade Federal do Espírito Santo. Para isso, o lodo de fossa séptica, apresentado na Figura 7 (c), deve ser pulverizado para que, posteriormente, possa ser transformado em pellets como mostrado na Figura 8.

Figura 8 - LFS pulverizado em pellets.



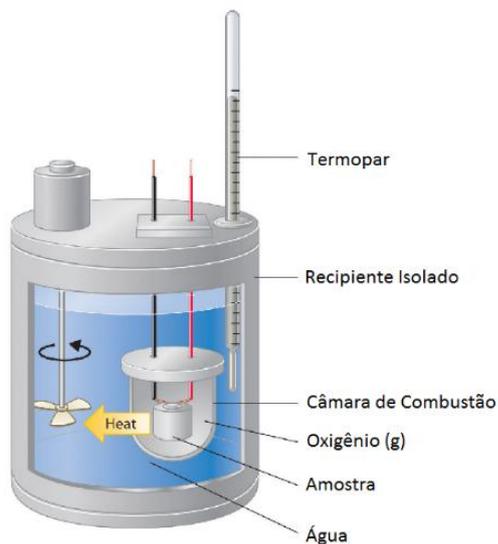
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.1. Bomba Calorimétrica

A bomba calorimétrica é um dispositivo usado para determinar o calor de combustão de combustíveis sólidos e líquidos a volume constante. É constituída essencialmente por uma câmara de combustão, onde são colocados os reagentes: oxigênio, à pressão de 30 kgf.cm⁻² e o combustível que se deseja analisar. A câmara de combustão é colocada em um recipiente contendo uma massa de água conhecida, conforme ilustrado na Figura 9, sendo esse isolado do ambiente. Há também a presença de um agitador, que exerce a função de homogeneizar a água. Dentro da câmara de combustão coloca-se 2 ml de água para que, juntamente com uma pressão de 30

kgf.cm^{-2} , garante que toda a água produzida na combustão seja condensada, permitindo a obtenção do poder calorífico superior (PCS) do combustível.

Figura 9 - Representação de uma Bomba Calorimétrica.

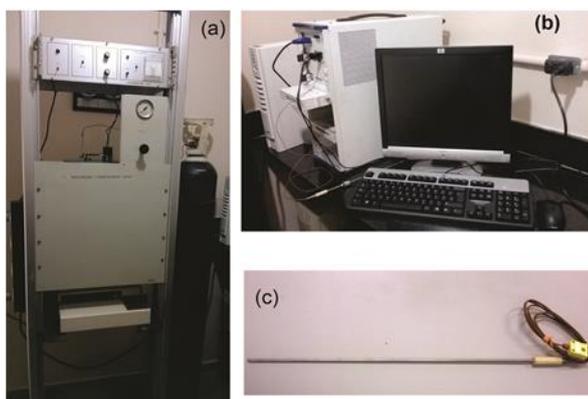


Fonte: Shen et al. (2012), adaptada pelo autor.

3.2.2. Sistema de Aquisição de Dados

Para obter os dados referentes à variação da temperatura da água na bomba calorimétrica, faz-se necessário o uso de um software de aquisição de dados. Neste estudo, utilizou-se um programa de aquisição de dados para obter as temperaturas da água a cada segundo. Em seguida, estes dados foram tratados e foram traçados os gráficos de temperatura em função do tempo.

Figura 10 - Bomba Calorimétrica (a), Sistema de Aquisição de Dados (b), Termopar tipo K (c).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é mostrado na Figura 10, a aquisição da temperatura no interior da bomba calorimétrica (a), é realizada com um termopar tipo K (c), e os dados são transferidos para um software de aquisição de dados (b). Esses dados são tratados visando obter o comportamento da temperatura da água no interior da bomba calorimétrica e com isso, obter o PCS da biomassa.

3.2.3. Metodologia

Inicialmente, o equipamento deve ser calibrado a fim de determinar a constante k, a qual mede as perdas de calor da bomba calorimétrica para o ambiente externo. Para isso, realiza-se um teste utilizando uma substância cujo PCS seja previamente conhecido.

Neste trabalho, utilizou-se o ácido benzóico para a calibração da bomba calorimétrica. O poder calorífico superior desse ácido é de 26.479 J/g (Shen et al., 2012). Com o auxílio da equação (2) a constante k pode ser calculada:

$$(m \cdot c_p \cdot \Delta T)_{\text{água}} = k \cdot \text{PCS}_{\text{ácido benzóico}} \cdot m_{\text{ácido benzóico}} \quad (2)$$

Sendo:

- m – massa de água [g];
- c_p – calor específico a pressão constante [J/g.K];
- ΔT – variação de temperatura da água [K];
- k – constante de isolamento da bomba calorimétrica;
- $\text{PCS}_{\text{ácido benzóico}}$ – poder calorífico superior do ácido benzóico [J/g];
- $m_{\text{ácido benzóico}}$ – massa de ácido benzóico.

Após obter o valor de k, o procedimento foi repetido utilizando LFS e variando a o teor de umidade retirado da amostra da seguinte forma:

- LFS após o processo de desaguamento em leito de secagem;
- LFS com 8% de umidade (em massa) retirada;
- LFS com 16% de umidade (em massa) retirada;

O controle da umidade foi realizado utilizando uma estufa e uma balança de precisão indicadas na Figura 11. O lodo recebido no laboratório foi inserido na estufa, a qual foi mantida a 100°C, e ao ser retirado aferiu-se a sua massa. Assim, a diferença da massa inicial do LFS e após ser retirado da estufa indicava o teor de umidade retirado da amostra. A equação (3) indica o cálculo da umidade retirada do LFS.

$$U_r = \left(1 - \frac{m_f}{m_i}\right) \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

- U_r – Umidade Retirada do LFS [%];
- m_f – Massa do LFS após ser retirado da estufa [kg];
- m_i – Massa do LFS antes de ser inserido na estufa [kg];

Figura 11 - Estufa de Secagem (a) e balança de precisão (b).



Fonte: Site do distribuidor*.

Com isso, as amostras de LFS com as umidades variadas foram transformadas em pallets, conforme mostrado na Figura 8, e utilizadas na bomba calorimétrica visando obter o seu poder calorífico.

Com o intuito de calcular a variação de temperatura da água, deve-se considerar uma temperatura média para cada um dos dois patamares de temperatura (antes e depois da reação de combustão). Em posse dessa variação de temperatura e da massa da amostra, é possível calcular o poder calorífico superior do combustível por meio da equação (4).

$$PCS_{\text{combustível}} = \frac{(m \cdot c_p \cdot \Delta T)_{\text{água}}}{k \cdot m_{\text{combustível}}} \quad (4)$$

Para cada teor de umidade do LFS, foram realizados três ensaios visando obter o desvio padrão dos resultados.

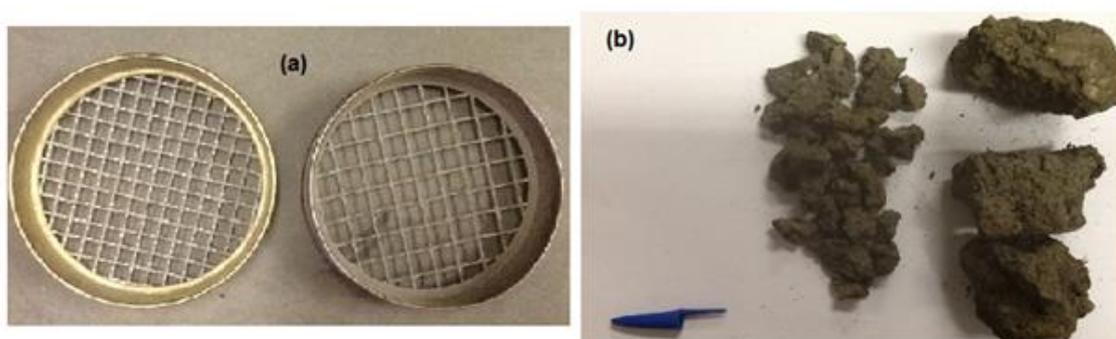
* Conteúdo disponível em: <http://www.lojanetlab.net.br/> e www.novainstruments.com.br. Acesso em maio, 2015.

3.3. PREPARAÇÃO DO LFS PARA COMBUSTÃO

3.3.1. Granulometria

Um dos parâmetros fixados para a análise da combustão do lodo foi a granulometria, tendo em vista que esta também tem influência direta nos resultados obtidos. Como o lodo coletado não apresentava uma granulometria uniforme, apresentando-se em grandes pelotas, fez-se necessário triturar a biomassa até que estivesse na granulometria desejada. Para isso, utilizou-se as peneiras de 12 e 9mm para garantir que as pelotas de lodo estivessem nessa faixa de tamanho conforme é mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Peneiras utilizadas no controle de granulometria (a), lodo coletado e lodo triturado (b)



Fonte: Elaborada pelo autor.

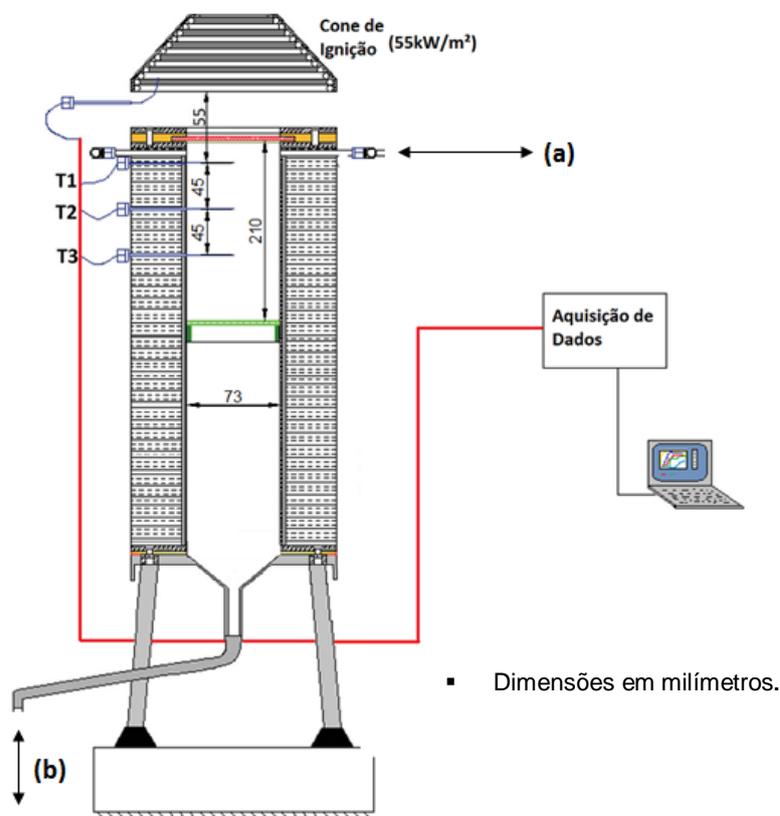
3.3.2. Umidade

Conforme foi mostrado anteriormente, a umidade foi o parâmetro alterado visando compreender sua influência nos resultados da combustão do LFS. Para quantificar seus valores, a estufa e a balança mostrados na Figura 11 foram utilizados, de forma que, antes de cada experimento, os valores do teor de umidade retirado fosse aferido.

3.4. CÉLULA DE COMBUSTÃO

Para realizar a queima do lodo, fez-se necessário um reator onde os dados de temperatura pudessem ser extraídos. Esse reator foi construído com o modelo apresentado no trabalho de Martins et al. (2010). A Figura 13 apresenta o croqui da célula de combustão e seus pontos de aferição de temperatura.

Figura 13 - Célula de Combustão



Fonte: Martins et al. (2010), adaptada pelo autor.

A célula de combustão apresentada na Figura 13 consiste em um cilindro vertical de aço inoxidável austenítico com 73mm de diâmetro e 9450mm de altura. Este é envolvido por dois tipos de materiais refratários: uma manta térmica com 3mm de espessura e uma fibra refratária de 46mm de espessura com condutividade térmica igual a $0,28 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a 982°C e $0,21 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ a 1000°C respectivamente. Uma grelha é colocada na parte central da célula para sustentar o LFS. As entradas/saídas do gás são realizadas na parte superior ou inferior do reator, dependendo do arranjo do leito, conforme representadas pelas setas (a) e (b). Esse aspecto de montagem da bancada será explicado no item 3.5. O reator é instrumentado com 3 termopares tipo k com 1,5mm de diâmetro espaçados por 45mm. Além desses, um termopar idêntico aos supracitados encontra-se localizado no ignitor. O monitoramento das temperaturas é realizado em tempo real com um software de aquisição de dados.

A Figura 14 mostra todo o equipamento utilizado no processo de combustão *smouldering* do LFS.

Figura 14 - Bancada experimental completa



Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 14 mostra a célula de combustão supracitada com seus termopares conectados a um computador para a aquisição de dados de temperatura em tempo real. Além disso, para controlar a vazão de ar que entra na célula, faz-se necessário um rotâmetro conectado a uma linha de ar comprimido. Também é possível visualizar um balão de nitrogênio que é mantido próximo à bancada por motivos de segurança.

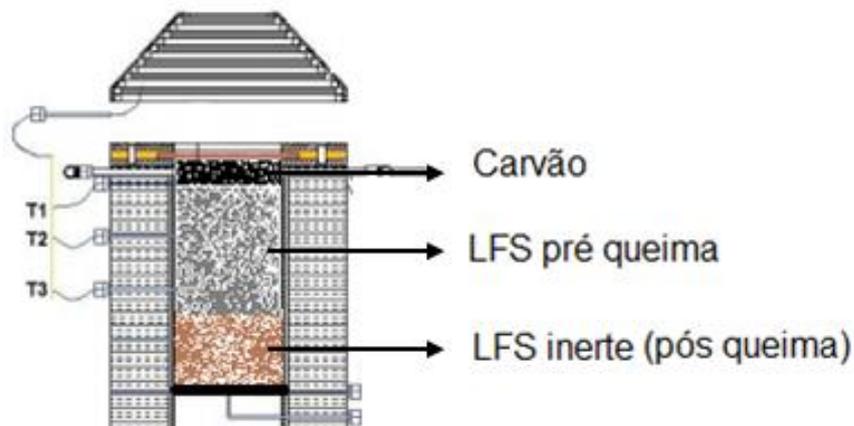
3.4.1. Abastecimento da Célula

O abastecimento da célula de combustão foi feito utilizando os seguintes componentes:

- Camada de matéria inerte, onde o próprio lodo remanescente das queimas anteriores foi aproveitado;
- Lodo com a granulometria e umidade controladas conforme citado no item 3.3.1. Nesta região encontram-se os termopares;
- Carvão com granulometria média de 3mm para dar início à queima.

Os componentes anteriores foram distribuídos na célula de combustão conforme mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Distribuição da matéria prima dentro da célula de combustão.



Fonte: Martins et al. (2010), adaptada pelo autor.

3.4.2. Ignição

A ignição do LFS é realizada com uma resistência elétrica cônica conforme mostrado na Figura 16. Tal aquecimento ocorre em decorrência do Efeito Joule, onde um material condutor tem sua temperatura elevada enquanto uma corrente elétrica passa pelo mesmo. Devido ao choque dos elétrons com as partículas do material condutor, parte da energia cinética desses elétrons é convertida em calor. O cone fornece energia para a célula a uma taxa de 55kW/m^2 .

Figura 16 - Cone de Ignição.

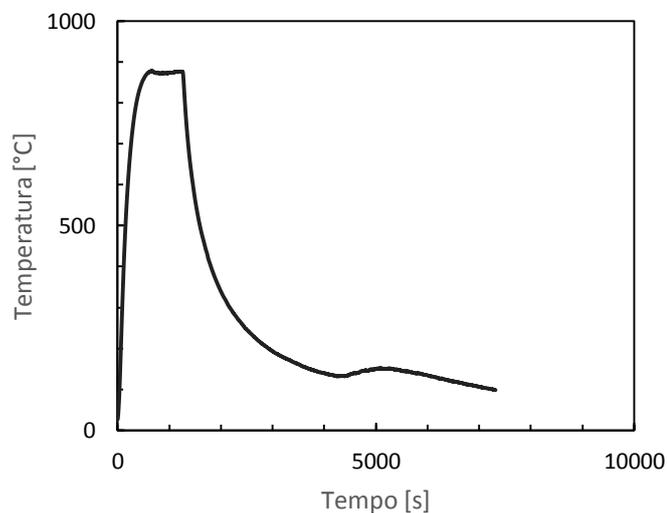


Fonte: Elaborada pelo autor.

O ignitor foi retirado da célula assim que a frente de combustão passou pelo primeiro termopar, desta forma, garantia-se que a queima não necessitava mais de uma fonte

de energia externa. O cone de ignição atingiu temperaturas da ordem de 900°C conforme mostrado na Figura 17.

Figura 17 - Gráfico de Temperaturas em função do tempo do cone de ignição.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A partir da Figura 17 pode-se perceber que a temperatura máxima do cone é atingida em poucos minutos. Deve-se esperar que seu valor máximo se estabilize para que, então, o cone entre em contato com a célula. Para isso, até que esse ponto seja alcançado, o cone deve ser isolado com uma placa de isolante envolvida por uma fita refletora, conforme apresentado na Figura 18, de modo que o calor irradiante do cone não atinja a célula até que sua temperatura máxima seja atingida.

Figura 18 - Placa isolante do cone de ignição.



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.3. Controle de Vazão

A alimentação de ar para a célula de combustão ocorreu com auxílio do compressor (modelo MotoMil 2HP, 9,65bar), o qual direcionava o fluxo de ar para a célula enquanto a vazão era controlada pelo rotâmetro exibido na Figura 19.

Figura 19 - Compressor (a) e rotâmetro (b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.4.4. Aquisição de Dados

Assim como foi explicado no item 3.2.2, os dados de temperatura extraídos dos termopares 1, 2 e 3 mostrados na Figura 13 foram transferidos para o sistema de aquisição de dados e com auxílio do software de aquisição de dados e exportados para o computador. A partir destes, os perfis de temperaturas de cada termopar foram traçados. Com esses dados, foi possível obter resultados como a temperatura máxima de queima alcançada pelo LFS, assim como a velocidade de propagação da frente de combustão para cada valor de umidade e cada método de queima (co-corrente e contra-corrente).

3.4.5. Coleta de Cinzas

As coletas das cinzas do experimento foram realizadas após todos os termopares indicarem temperaturas inferiores a 200°C, situação em que não há mais material volátil a ser queimado de acordo com Klärschlamm (1996). Dessa forma, apenas material inerte restava no leito de combustão. Esse material foi pesado em cada experimento, e, assim, quantificava-se o material inerte presente no lodo.

Figura 20 - Cinzas do LFS após (a) e antes do processo de combustão (b).



Fonte: Elaborada pelo autor.

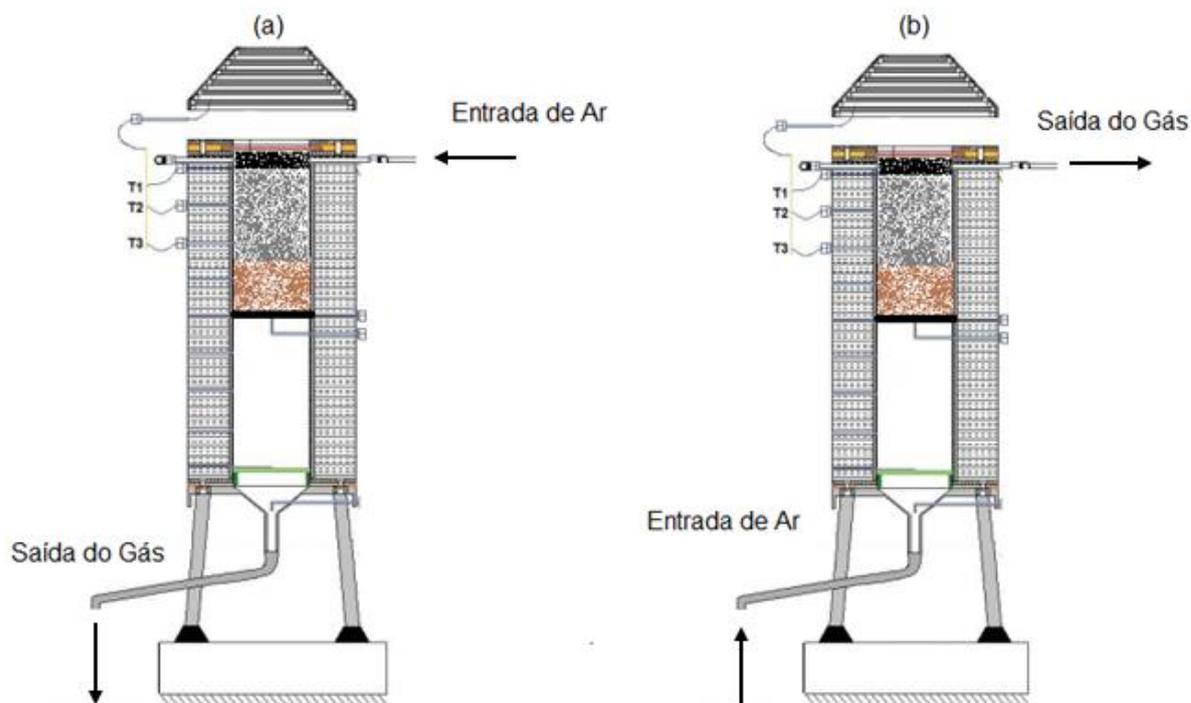
A Figura 20 mostra a quantidade de material inerte presente no LFS. É possível perceber que uma parte significativa do material colocado na célula é retirado na forma de cinzas, mostrando que o lodo possui um elevado teor de material inerte.

3.5. ARRANJO DO LEITO: CO-CORRENTE E CONTRA-CORRENTE

Um dos objetivos desse trabalho é comparar as duas classes do processo de combustão, co-corrente e contra-corrente, para a queima do LFS as quais dependem do sentido do escoamento de ar em função da direção de propagação da frente de combustão, conforme descrito no item 2.1.1.

Para realizar ambos os processos no mesmo equipamento, foram necessárias algumas adaptações, como mostrado na Figura 21.

Figura 21 - Disposições de montagem da célula para os experimentos de combustão co-corrente e contra-corrente.



Fonte: Martins et al. (2010), adaptada pelo autor.

A Figura 21(a) mostra a configuração utilizada na célula de combustão para a realização do processo co-corrente, onde o agente oxidante entra no leito pela parte superior iniciando seu trajeto da mesma forma que a propagação da frente de combustão. Após atravessar todo o leito de forma descendente, o ar deixa o leito pela parte inferior, onde passa por um recipiente de retirada de material condensado e, finalmente, é liberado para a atmosfera. Novamente, é importante ressaltar que o ar e a frente de combustão percorrem o mesmo caminho, por isso a denominação de combustão co-corrente.

Ao contrário do esquema de montagem do sistema co-corrente mostrado na Figura 21 (a) a combustão contra-corrente conta com a aspiração de ar feita pela parte inferior da célula de combustão como é mostrado na Figura 21 (b). O gás de exaustão sai pela parte superior da célula onde há um tubo de cobre acoplado à saída visando garantir a integridade da mangueira de silicone na saída do gás devido à elevada temperatura de exaustão do gás. Em seguida, o gás passa pelo mesmo caminho do gás de exaustão do sistema co-corrente, passando pela retirada de material condensado e finalmente seguindo para o sistema de exaustão para a atmosfera.

3.6. METODOLOGIA DE ANÁLISE DE RESULTADOS

A partir dos perfis de temperatura obtidos para cada valor de umidade do LFS e também de cada método de combustão (co-corrente e contra-corrente), foram obtidos os seguintes resultados:

- Temperatura máxima de combustão;
- Velocidade de propagação da frente de combustão.

A temperatura máxima de combustão foi obtida a partir do pico de temperatura em cada termopar enquanto a velocidade de propagação da frente de combustão é encontrada com a equação (5):

$$V_f = \frac{e}{t} \quad (5)$$

Sendo:

- V_f – velocidade de propagação da frente de combustão [mm/s];
- e – espaço entre os termopares [mm];
- t – tempo necessário para percorrer os termopares [s].

Obtendo os parâmetros citados, representando-os graficamente em função da umidade da biomassa e comparando esses resultados para ambas as tecnologias de combustão (co-corrente e contra-corrente) com a mesma umidade realizou-se um estudo comparativo entre ambos.

Tabela 6 - Distribuição dos ensaios realizados

Umidade Retirada	Método de Combustão		Velocidade de Darcy m.s ⁻¹
	Co-Corrente	Contra-Corrente	
16%	3 ensaios	3 ensaios	0,051
8%	2 ensaios	3 ensaios	0,051
0%	3 ensaios	3 ensaios	0,051
Total	8 ensaios	9 ensaios	

Fonte: Elaborada pelo autor.

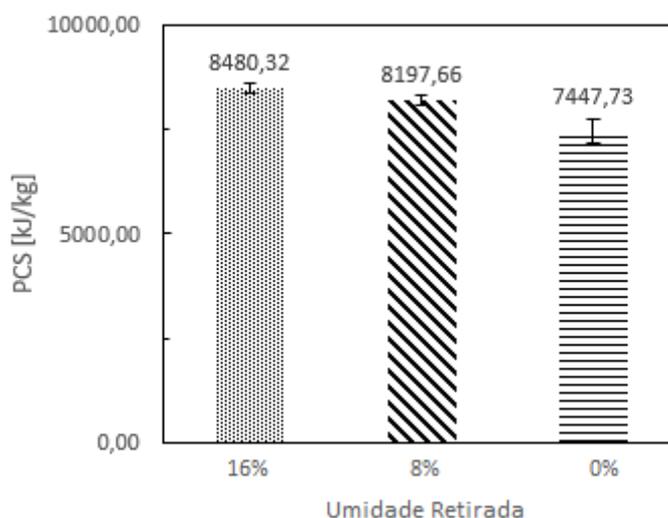
Como mostrado na Tabela 6, para cada valor de umidade aferida no LFS, foram realizados 3 ensaios para cada configuração do reator de combustão conforme explicado na sessão 3.5. Dessa forma, ao fim desse trabalho, foram utilizados os resultados de 17 ensaios.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. PODER CALORÍFICO DO LFS

A primeira análise realizada nesse trabalho foi a obtenção do poder calorífico superior (PCS) do LFS. Ao realizar o procedimento explicado na sessão 3.2, foram obtidos os valores médios dos experimentos para cada teor de umidade. Tais resultados são explicitados na Figura 22.

Figura 22 - Gráfico do Poder Calorífico do LFS em função da sua umidade.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Percebe-se que com a redução do teor de umidade presente no LFS, eleva-se o seu potencial energético, resultado condizente com o trabalho de Komilis et al. (2014). Dessa forma, visando a possibilidade de gerar uma maior quantidade de energia a partir de uma menor massa de matéria prima, torna-se proveitoso realizar a secagem do lodo antes de sua queima como é demonstrado na Figura 22.

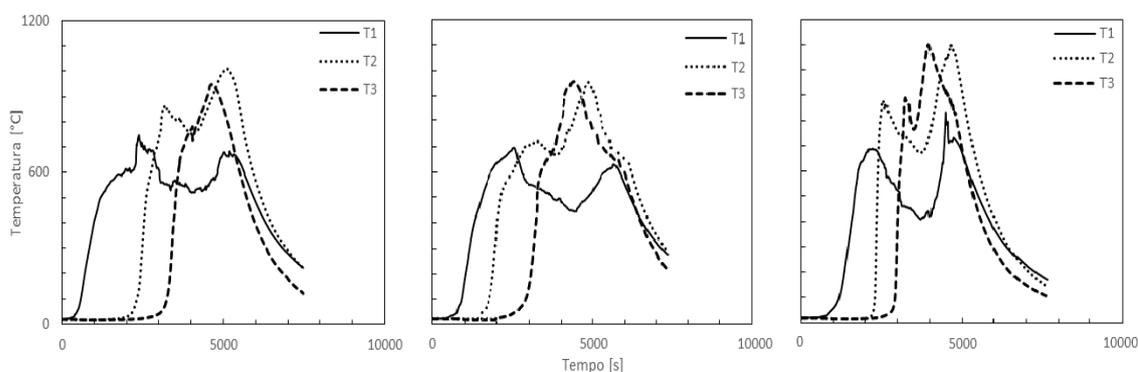
Como foi explicado na sessão 3.1.3, o lodo obtido passou por um processo de desaguamento natural em leito de secagem, porém, sua umidade ainda pôde ser reduzida. Com a sua secagem, seu potencial energético demonstrou uma tendência de elevação de, aproximadamente, 7500 para 8500 kJ/kg, apresentando, assim, uma tendência à ascensão próxima de 14%.

4.2. COMBUSTÃO *SMOULDERING* CONTRA-CORRENTE

Após realizar os testes com o LFS no método de combustão *smouldering* contra-corrente, com uma vazão volumétrica de $0.044\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$, a qual corresponde a uma velocidade de Darcy de, aproximadamente, $0,051\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, valor próximo ao utilizado no

trabalho de Rein et al. (2007), o lodo apresentou um perfil de temperaturas similar ao mostrado na Figura 23.

Figura 23 - Perfis de Temperaturas do LFS durante a combustão Contra-Corrente para a retirada de 0%, 8% e 16% de umidade.



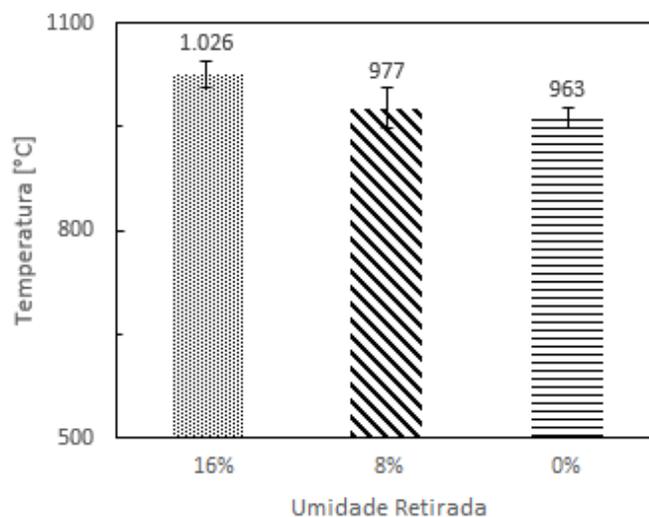
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 23 apresenta os perfis de temperatura dos três termopares situados na célula de combustão, os quais estão separados por 45mm. Avaliando os dados referentes às temperaturas nos pontos aferidos pode-se notar que o perfil de temperaturas apresenta oscilações durante sua evolução. Isso ocorre devido ao fato do leito de LFS colapsar em alguns pontos durante a queima. O ruído causado pelo colapso do leito pode ser reduzido realizando o experimento utilizando o combustível com uma menor granulometria, dessa forma, gerando um perfil mais homogêneo. Além disso, após a frente de combustão passar pelos termopares 1 e 2, estes ainda apresentam um aumento de temperatura devido ao fluxo ascendente de ar que transfere o calor proveniente da combustão para a região superior.

4.2.1. Temperatura Máxima de Operação

Após realizar três ensaios para cada teor de umidade obteve-se o valor da temperatura máxima alcançada pelo LFS para cada caso. Esses resultados são apresentados na Figura 24, a qual expõe o comportamento das temperaturas em função da umidade do LFS.

Figura 24 - Gráfico de Influência da Umidade do LFS na sua temperatura máxima durante o processo de combustão *smouldering* contra-corrente.



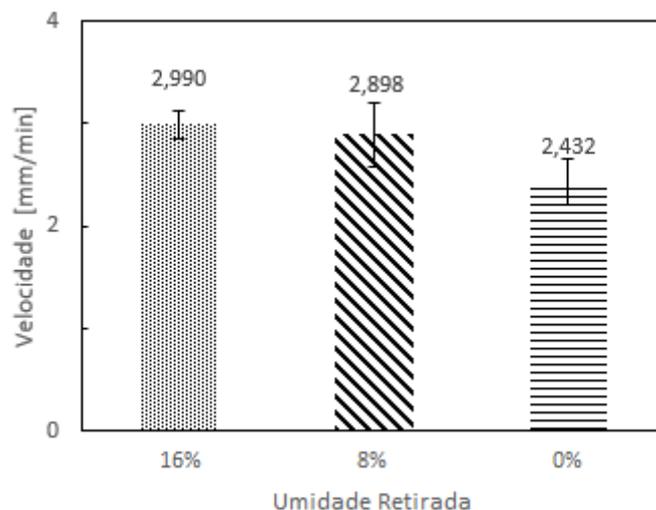
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Figura 24 apresenta uma tendência ao aumento da temperatura máxima de combustão do LFS com a redução da sua umidade. Isso ocorre devido ao fato de que quanto maior for a umidade do material, maior será a parcela da energia do processo de combustão consumida na evaporação da água presente no combustível.

4.2.2. Velocidade de Propagação da Frente de Combustão

Os resultados da análise da velocidade de propagação da frente de combustão *smouldering* para o arranjo contra-corrente são apresentados na Figura 25.

Figura 25 - Gráfico de Influência da Umidade do LFS na velocidade de propagação de combustão durante o processo de combustão *smouldering* contra-corrente.



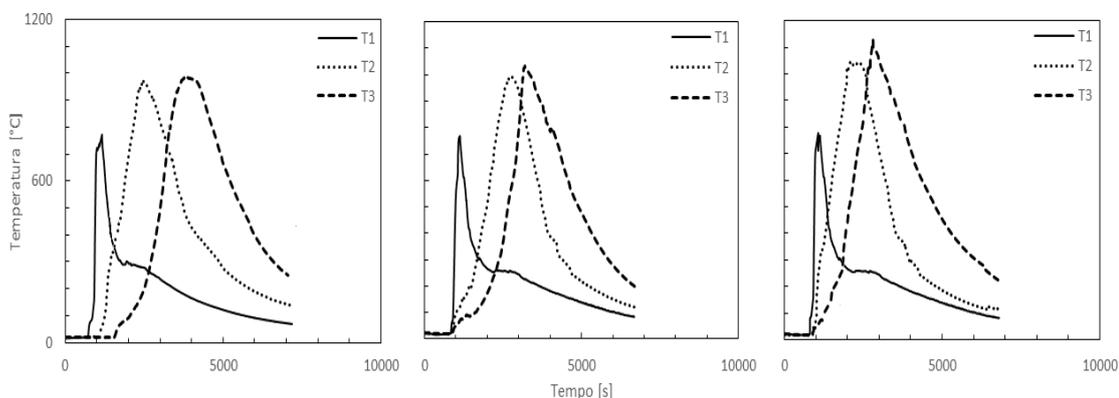
Fonte: Elaborada pelo autor.

O gráfico da Figura 25 demonstra uma tendência ao aumento da velocidade da frente de combustão com a redução da umidade. Essa tendência ocorre devido a necessidade de evaporação da água presente no LFS, fazendo com que a propagação da frente seja retardada. Tal resultado é condizente com o trabalho de Agarwal (1989) sobre os efeitos da secagem para a combustão de carvão em um leito fluidizado, onde concluiu-se que um alto teor de umidade retarda o processo de liberação de produtos voláteis, e por consequência, torna a propagação da frente de combustão mais lenta.

4.3. COMBUSTÃO *SMOULDERING* CO-CORRENTE

Com os dados obtidos a partir da combustão *smouldering* co-corrente do LFS, foram construídos os perfis de temperatura para os pontos de análise mostrados na Figura 26.

Figura 26 - Perfis de Temperaturas do LFS durante a combustão *smouldering* Co-Corrente para a retirada de 0%, 8% e 16% de umidade.



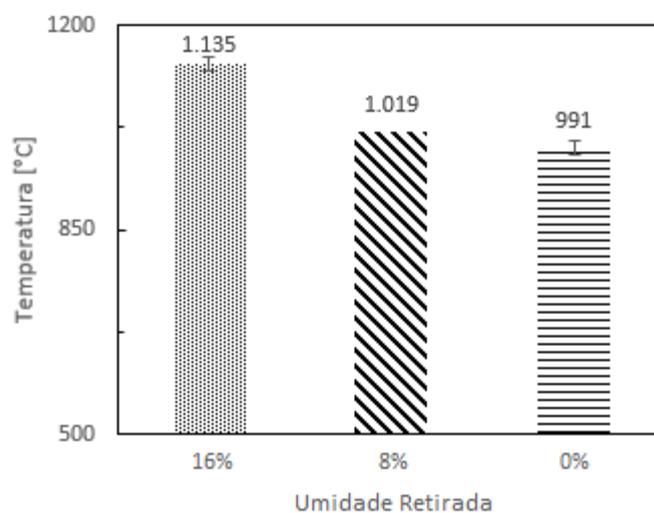
Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura 26 mostra a tendência do comportamento da combustão *smouldering* co-corrente ao longo da célula de combustão. Se comparada ao modelo contra-corrente, esse processo apresenta-se mais breve. Isso ocorre pois ao analisar ambos os métodos de combustão, percebe-se que no modelo co-corrente não há o reaquecimento das regiões acima da frente de combustão. O motivo disso é a direção do escoamento do agente oxidante, o qual avança na mesma direção da frente de combustão, não havendo a transferência de calor por convecção para as regiões superiores, fazendo com que o leito inicie seu resfriamento após atingir o seu pico de temperatura, ao contrário do que é apresentado para o modelo de combustão *smouldering* contra-corrente.

4.3.1. Temperatura Máxima de Operação

De forma análoga ao método contra-corrente, foram obtidos os resultados referentes às máximas temperaturas obtidas no processo para os diferentes teores de umidade. Estes resultados são expostos na Figura 27.

Figura 27 - Gráfico de influência da umidade do LFS nas temperaturas máximas obtidas no processo de combustão *smouldering* co-corrente.



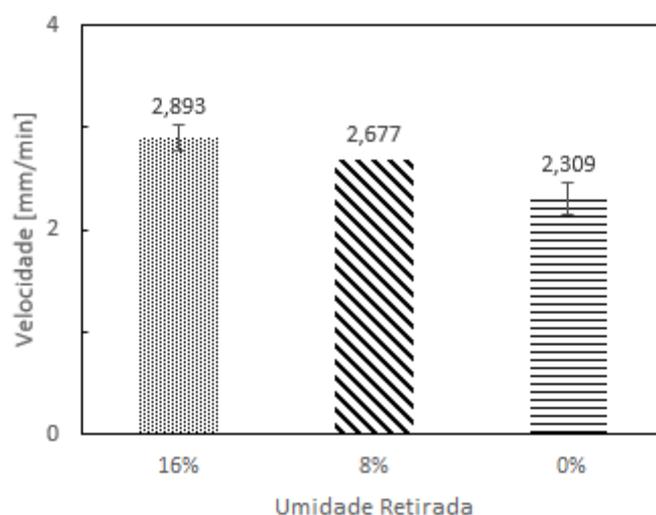
Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como apresentado nos resultados referentes à configuração contra-corrente, a Figura 27 mostra que com a redução do teor de umidade do LFS, a temperatura máxima obtida na combustão co-corrente se eleva. Ao quantificar essa elevação, observa-se um aumento de 14,5% entre o lodo com o teor de umidade de 20% e o seco.

4.3.2. Velocidade de Propagação da Frente de Combustão

A seguir, utilizando os dados de temperatura aliados ao tempo necessário para atingir o seu valor máximo em cada termopar, foram obtidas as velocidades de propagação de combustão para cada teor de umidade, conforme apresentado na Figura 28.

Figura 28 - Gráfico de Influência da Umidade do LFS na velocidade de propagação de combustão durante o processo de combustão *smouldering* co-corrente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O LFS apresentou uma elevação na velocidade de propagação da frente de combustão conforme o seu teor de umidade foi reduzido como pode ser observado na Figura 28. Assim como evidenciado na combustão contra-corrente, uma maior umidade do material retarda a sua propagação da frente de combustão pois a liberação dos voláteis será mais lenta devido à retirada da água anterior aos gases combustíveis.

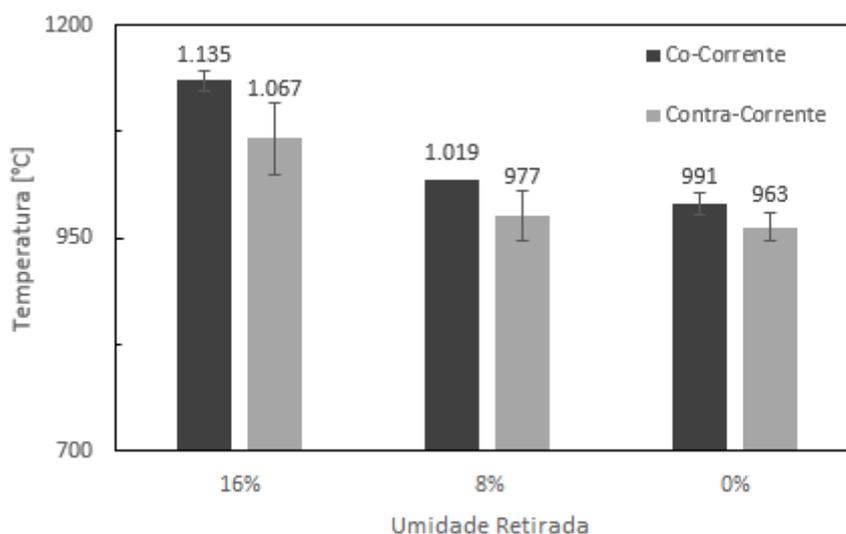
4.4. COMPARAÇÃO ENTRE O ARRANJO DE COMBUSTÃO *SMOULDERING* CO-CORRENTE E CONTRA-CORRENTE

A análise final do presente trabalho visa confrontar ambos os métodos de propagação da frente de combustão, co-corrente e contra-corrente de forma quantitativa, a fim de avaliar suas diferentes características com relação a sua temperatura máxima de operação e velocidade de propagação da frente de combustão.

4.4.1. Temperatura Máxima de Operação

A comparação entre os perfis de temperaturas durante os processos de combustão co-corrente e contra-corrente gerou o gráfico da Figura 29, representando as diferenças entre as temperaturas alcançadas em cada processo.

Figura 29 - Gráfico de temperatura máxima de operação para os métodos de combustão *smouldering* co-corrente e contra-corrente.



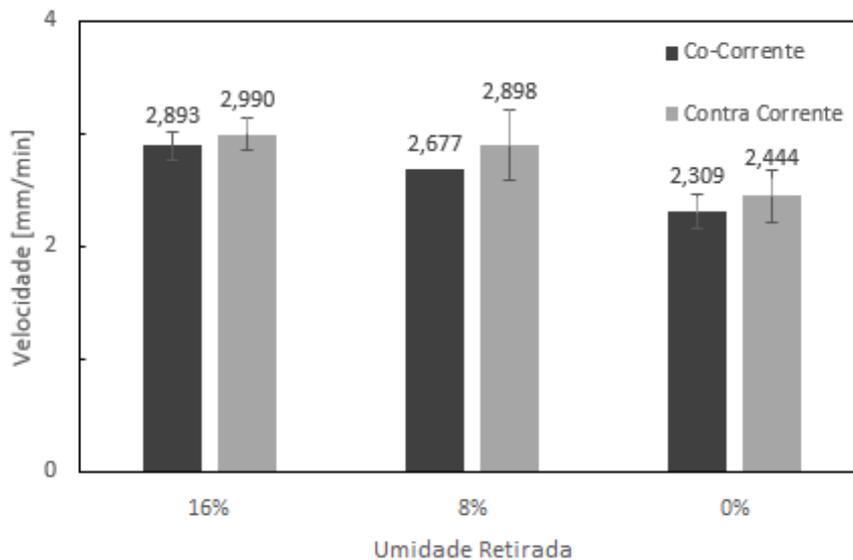
Fonte: Elaborada pelo autor.

O método de combustão *smouldering* co-corrente apresentou valores mais elevados de temperaturas em relação ao contra-corrente. Tal resultado é condizente com o trabalho de Thunman e Leckner (2003), os quais afirmam que o agente oxidante na combustão co-corrente passa por um leito de cinzas aquecidas antes de entrar em contato com a zona de combustão do processo. Dessa forma, o ar pré-aquecido irá reagir com os voláteis liberados do LFS e, assim, torna-se capaz de alcançar temperaturas mais elevadas durante a combustão. Por outro lado, no processo contra-corrente o oxigênio que chega a zona de combustão ainda estará com a mesma temperatura de entrada no leito pois a propagação de calor e as cinzas estão localizadas após a zona de combustão.

4.4.2. Velocidade de Propagação da Frente de Combustão

A última análise realizada nesse trabalho foi a comparação da velocidade de propagação da frente de combustão para os arranjos de queima co-corrente e contra-corrente. Com a realização da união dos dados referentes a cada um dos arranjos, realizou-se a comparação entre estes e, assim, foi gerado o gráfico da Figura 30 exposta a seguir.

Figura 30 - Gráfico de velocidade de propagação da frente de combustão para os métodos de combustão *smouldering* co-corrente e contra-corrente.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A diferença de velocidades de propagação mostradas na Figura 30 apontam uma taxa de propagação mais elevada para o arranjo de queima contra-corrente. Os resultados apresentados na Figura 30 são coincidentes dos encontrados por Ohlemiller e Lucca (1983), onde estes afirmam que a taxa com que a frente de combustão se propaga no arranjo contra-corrente é maior.

4.4.3. Teor de Matéria Inerte

Após o término do processo de combustão *smouldering* co-corrente e contra-corrente, o material restante na célula de combustão foi retirado e pesado para que, assim, fosse possível quantificar a quantidade de matéria inerte que ainda restava no leito. Essa análise demonstrou que ambos os métodos apresentaram um valor médio de 52% de material inerte presente no leito.

A Tabela 7 apresenta, de forma resumida, os resultados apresentados nos gráficos da sessão 4.

Tabela 7 - Síntese dos resultados da combustão *smouldering* do LFS

Umidade Retirada	Temperatura Máxima de Operação				Velocidade de Propagação			
	Co-Corrente		Contra-Corrente		Co-Corrente		Contra-Corrente	
	T [°C]	σ	T [°C]	σ	V [mm/min]	σ	V [mm/min]	σ
0%	991	13,04779	963	16	2,309	0,157	2,432	0,230
8%	1019	--	977	29	2,677	--	2,898	0,311
16%	1135	12,16522	1067	43	2,893	0,125	2,990	0,145

Fonte: Elaborada pelo autor

5. CONCLUSÕES

O estudo realizado neste trabalho foi planejado de forma que seriam realizados 18 ensaios para que fosse possível obter os resultados referentes à possibilidade da realização de um tratamento termoquímico do Lodo de Fossa séptica visando a redução da sua quantidade e, conseqüente, geração energética. Além disso, objetivou-se quantificar o teor de material inerte presente no lodo ao final do tratamento supracitado.

Inicialmente, ao realizar a coleta do LFS na estação de tratamento, percebeu-se a inviabilidade de sua utilização imediatamente ao retirá-lo da estação devido à sua elevada umidade, a qual inviabiliza o processo de combustão *smouldering*. Dessa forma, torna-se necessária a realização de um pré-tratamento do LFS para a sua utilização. O pré-tratamento adotado foi o desaguamento em leito de secagem, onde o lodo foi exposto à atmosfera e seu teor de umidade é reduzido sem a necessidade de haver consumo energético.

A análise da influência da umidade mostrou que esta interfere diretamente no processo de combustão *smouldering* do LFS. Para uma retirada de, aproximadamente, 16% do seu teor de umidade, os seguintes resultados foram obtidos:

- Aumento de 14% do poder calorífico superior;
- Aumento da temperatura máxima de operação em 6,5% e 14,5% para os arranjos contra-corrente e co-corrente, respectivamente.
- Aumento da taxa de propagação da frente de combustão em 25% e 23,5% para os arranjos co-corrente e contra-corrente, respectivamente.

Na comparação entre os arranjos do leito, co-corrente e contra-corrente foi possível perceber que a combustão co-corrente apresenta um maior potencial para a geração de energia, devido às temperaturas mais elevadas, conforme mencionado anteriormente, porém, este processo carece de um maior tempo de operação, devido a menor taxa de propagação da frente de combustão, do que o arranjo contra-corrente.

Além da análise em âmbito energético, atentando-se à redução de danos ambientais, percebe-se que a realização do tratamento termoquímico do LFS reduz a massa de lodo pela metade, reduzindo consideravelmente a sua quantidade. Mesmo sem uma

análise elementar do LFS pós queima, estima-se que após a realização do processo de combustão *smouldering*, os patógenos presentes no lodo foram eliminados devido às altíssimas temperaturas, da ordem de 1000°C por um longo período de exposição, alcançadas no processo.

Finalmente, ao comparar o potencial energético do lodo com outros combustíveis tradicionais, tais como a madeira de carvalho (20,3MJ/kg) (WALAWENDER et al., 1988), ou o carvão (23,53MJ/kg) (MAGDZIARZ e WILK, 2013), o LFS (8,5MJ/kg) utilizado neste trabalho apresenta valores inferiores. Porém, se descartado de forma inadequada pode causar danos tanto ao ambiente, infiltrando-se no solo, além do desconforto à população devido ao seu forte odor. Assim, o processo de combustão *smouldering* do LFS reduz, de forma significativa, a sua quantidade, torna-o inerte, e, por consequência, é capaz de gerar energia, mesmo que de forma inferior quando comparada à combustão de combustíveis tradicionais.

5.1. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização do estudo presente neste trabalho, for possível detectar pontos potenciais para geração de estudos posteriores.

- Obter Lodo de Fossas Sépticas de diferentes ETE, e a partir destas, realizar análises elementares sobre esses materiais. Isso se justifica pois neste trabalho foi percebido que as localidades das estações de tratamento possuem influência na qualidade do LFS obtido devido aos hábitos da população de cada região.
- Analisar a influência da vazão de agente oxidante no processo de combustão *smouldering*, investigando qual será o comportamento do perfil de temperaturas e velocidade de propagação da frente de combustão do LFS. Além disso, obter o ponto de transição da combustão *smouldering* para *flaming* em função da vazão de agente oxidante no processo de combustão.
- Buscar alternativas de aproveitamento do material inerte remanescente da combustão *smouldering* do Lodo de Fossa Séptica.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7229: Informação e Documentação - Referências - Elaboração. Rio de Janeiro: ABNT, 1993.

AGARWAL P.K. LA NAUZE R.D. “*Transfer processes local to the coal particles, a review of drying, devolatilisation and mass transfer in fluidized bed combustion*”, *Engineering Res Des*, vol. 67, 457 – 480, 1989.

ANEEL (Associação Nacional de Energia Elétrica) – “Atlas de Energia Elétrica no Brasil”, 2002.

BORODULYA V.A. DIKALENKO V.I. PALCHONOK G.I. STANCHITS L.K. “*Fluidized bed combustion of solid organic waste and lowgrade coal, research and modelling*”. *Proceedings 13th International Conference on Fluidized Bed Combustion*, pp. 135 – 142, 1995.

CHERN S. M. WALAWENDER W. P. FAN, L. T. “*Mass and Energy Balance Analyses of a Downdraft Gasifier*”, *Biomass* Vol. 18 pp. 127-151, 1989.

DEMIRBAŞ A. “*Bioresource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals*”, *Energy Convers Manag*, vol 42, pp. 1357-1378, 2001.

DI BLASI C. “*Mechanisms of two-dimensional smouldering propagation through packed fuel beds*”, *Combustion Science and Technology*, vol. 106, pp 103 – 124, 1995.

DOGRU M.; HOWARTH C. R. AKAY G. KESKINLER B. MALIK A. A. “*Gasification of hazelnut shells in a downdraft gasifier.*” *Energy*, vol. 27, pp. 415-427, 2002.

DOGRU M. MIDILLI A. HOWARTH C.R. “*Gasification of sewage sludge using a throated downdraft gasifier and uncertainty analysis*”, *Fuel Processing Technology*, vol. 75, pp. 55 – 82, 2002.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética) – “Balanço Energético Nacional, Relatório Síntese – ano base 2013” Rio de Janeiro, 2014.

GUO F.Q. DONG Y.P. DONG L GUO C. “*Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: An experimental study*” *Waste Manag*, vol. 33, pp. 825 – 832, 2013.

HALL J.E. “*Treatment and use of sewage sludge in EC*”, 1992.

HE F. ZOBEL N. ZHA W. BEHRENDT F. “*Effects of physical properties on one-dimensional downward smouldering of char: Numerical analysis*” *Biomass and Bioenergy*, vol. 33, pp. 1019–1029, 2009.

HUANG X. REIN G. CHEN H. “*Computational smouldering combustion: Predicting the roles of moisture and inert contents in peat wildfires*” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 35, pp. 2673 – 2681, 2015.

JORDÃO E. P. PESSOA C. A. “Tratamento de Esgotos Domésticos” 4 ed. Rio de Janeiro: SEGRAC, 2005, 932p.

KASAKURA T. IMOTO Y. "Incineration performance of a fluidized bed furnace for sewage sludge dewatered cake". *Fluidization V.* 375 – 379, 1989.

KLÄRSCHLAMM L. U. "Sewage sludge", *ATV Handbuch*, 4th edn. Berlin: Ernst and Sohn, 1996.

KOMILIS D. KISSAS K. SYMEONIDIS A. "Effect of organic matter and moisture on the calorific value of solid wastes: An update of the Tanner diagram" *Waste Management* vol. 34, pp. 249 – 255, 2014.

LEUNG D. Y. C YIN X. L. WU C. Z. "A review on the development and commercialization of biomass gasification technologies in China", *Renew Sustain Energy Rev*, vol 8, pp. 565 – 580, 2004.

MAGDZIARZ A. WILK M. "Thermogravimetric study of biomass, sewage sludge and coal combustion", *Energy Conversion and Management*, vol. 75, pp. 425 – 430, 2013.

MARRERO T. MCAULEY B. SUTTERLIN W. MORRIS J. MANAHAN E. "Fate of heavy metals and radioactive metals in gasification of sewage sludge", *Waste Management*, Vol. 24, pp. 193 – 198, 2004

MARTINS M. F. SALVADOR S. THOVERT J. F. DEBENEST G. "Co-current combustion of oil shale – Part 2: Structure of the combustion front", *Fuel*, vol. 89, pp. 133 – 143, 2010.

MENESES C. G. R. INGUNZA M. P. D. FARIAS N. M. N. CÂMARA A. C. J. "caracterização físico-química e biológica dos resíduos de sistemas tipo tanque séptico-sumidouro da cidade de natal" em: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, João Pessoa – PB.

MONHOL F. A. F. MARTINS M. F. "Co-current Combustion of Human Feces and Polyethylene Waste", *Waste and Biomass Valorization*, vol. 6, pp. 425 – 432, 2015.

NARVÁEZ I. ORÍO A. AZNAR M. P. CORELLA J. "Biomass gasification with air in an atmospheric bubbling fluidized bed. Effect of six operational variables on the quality of the produced raw gas". *Ind. Eng. Chem. Res*, vol. 35, pp. 2110-2120, 1996.

NIPATTUMMAKUL N. AHMED I. I. KERDSUWAN S. GUPTA A.K. "Hydrogen and syngas production from sewage sludge via steam gasification", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 35, pp. 11738-11745, 2010.

OHLEMILLER T. J. "Progress Energy Combust" *Sci.* vol. 11, pp. 277–310, 1985.

OHLEMILLER T. J. LUCCA D. A. "An experimental comparison of forward and reverse smolder propagation in permeable fuel beds", *Combustion and Flame*, vol. 54, pp. 131-147, 1983.

PARIKH J. CHANNIWALA S. A. GHOSAL G. K. "A correlation for calculating HHV from proximate analysis of solid fuels", *Fuel* vol. 84, pp. 487 – 494, 2005.

PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico) – “Lodo de fossa e tanque séptico: caracterização, tecnologias de tratamento, gerenciamento e destino final”, 2009.

REIN G. FERNANDEZ-PELLO A. C. URBAN C. L. “*Computational model of forward and opposed smouldering combustion in microgravity*” *Proceedings of the Combustion Institute*, vol. 31, pp. 2677 – 2684, 2007.

RUGGIERO M. MANFRIDA G. “*An equilibrium model for biomass gasification processes*”, *Renewable Energy*, vol. 16 pp.1106–1109, 1999.

SHEN J. ZHU S. LIU X. ZHANG H. TAN J. “*Measurement of Heating Value of Rice Husk by Using Oxygen Bomb Calorimeter with Benzoic Acid as Combustion Adjuvant*”, *Energy Procedia*, vol. 17, pp. 208 – 213, 2012.

SHENG C. AZEVEDO J.L.T. “*Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data*”, *Biomass and Bioenergy* vol. 28, pp. 499 – 507, 2005.

TCHOBANOGLIOUS G. “*Wastewater engineering, treatment, disposal and reuse*” *New Delhi: McGraw-Hill*, 1987, 837p.

TEBBUTT T.H.Y. “*Japanese sewage sludge treatment, utilization and disposal. Report of IWEM/JSWA*”, *Technology Exchange Programme* vol. 6, pp 628 – 632, 1992.

VON SPERLING M. (2005) “Princípios de Tratamento Biológico de águas Residuárias” vol. 2 Princípios básicos do tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG.

WALAWENDER W. CHEE C. S. GEYER W. A. “*Influence of Tree Species and Wood Deterioration on Downdraft Gasifier Performance*”, *Biomass* vol. 17, pp 51 – 64, 1988.

WERTHER J. OGADA T. “*Sewage sludge combustion*”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol 25, pp. 55–116, 1999.

YI L. DONG L. “*Experimental Study of Upward Forward Smouldering Combustion*”, *Procedia Engineering*, vol. 11, pp. 196 – 204, 2011.

YING Y. “*Pyrolyse von papierindustriellem Klärschlamm in der Wirbelschicht [Pyrolysis of paper mill sewage sludge in a fluidised bed]*”, Tese de Doutorado, Universidade de Hamburgo, 1991.