

# Modelagem Termodinâmica do Reaproveitamento de Calor em Gaseificadores visando Secagem de Lodo

Soares, R. B.<sup>1,2\*</sup>; Gonçalves, R. F.<sup>1</sup>; Martins, M. F.<sup>3</sup>; Santos, J. J. C. S.<sup>3</sup>

1 Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

2 Faculdade Brasileira Multivix, Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

3 Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

\* e-mail: renan.barroso.offshore@hotmail.com

## Resumo

O lodo de esgoto apresenta um poder calorífico significativo e, por isso, pode ser utilizado como fonte de energia. Um dos processos térmicos potenciais para valorização do lodo é a gaseificação. No entanto, este processo requer o uso de biomassa com baixo teor de umidade, implicando em processos de secagem que demandam elevado consumo de energia. A recuperação e reaproveitamento de calor nesses processos podem ser alternativas para superar esta limitação. Este trabalho apresenta uma modelagem termodinâmica, para simular a recuperação de calor em um sistema composto por uma unidade de gaseificação e uma unidade de geração de eletricidade em moto-gerador de combustão interna. Um fluxograma do processo é proposto e balanços de massa e energia são feitos em cada etapa. A modelagem é baseada em dados da literatura e o *software Engineering Equation Solver (EES)* é usado para obtenção de propriedades termodinâmicas e resolução do sistema de equações. Os resultados calculados mostram uma produção de síngas de 2 Nm<sup>3</sup>/Kg de lodo seco, com temperatura de 612°C. Os valores são condizentes com a literatura e proporcionam uma remoção de 28% de água, para um lodo desaguado com 75% de umidade. A secagem é significativa e motiva estudos mais aprofundados.

## Abstract

Sewage sludge has a significant calorific value and can therefore be used as a source of energy. One of the potential thermal processes for the recovery of sludge is gasification. However, this process requires the use of biomass with low moisture content, implying drying processes that require high energy consumption. The recovery and reuse of heat in these processes may be alternatives to overcome this limitation. This work presents a thermodynamic modeling to simulate the recovery of heat in a system composed of a gasification unit and a unit of power generation in internal combustion motor-generator. A flowchart of the process is proposed and mass and energy balances are made at each stage. The modeling is based on literature data and the *Engineering Equation Solver (EES)* software is used to obtain thermodynamic properties and solving the system of equations. The calculated results show a syngas production of 2 Nm<sup>3</sup>/kg of dry sludge, with a temperature of 612°C. The values are consistent with the literature and provide a 28% removal of water for a 75% moisture drained slurry. Drying is significant and motivates further studies.

Keywords (Palavras chaves): Gaseificação, lodo de esgoto, recuperação de calor.

## 1. Introdução

O saneamento básico previne o contato humano com resíduos, sendo importante para a saúde da população, o meio ambiente e para a economia do país [1]. Mesmo assim, segundo o Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento (SNIS) [2], o índice de coleta de

esgoto no país é de apenas 49,36%. As condições econômicas da população limitam o repasse integral do custo dos serviços para a tarifa, sobretudo nas cidades mais pobres, inviabilizando os investimentos necessários para o setor [3]. Tornar uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) autossustentável em

energia pode melhorar a rentabilidade dos projetos e atrair investimentos para o setor [4].

O lodo de esgoto, por ser constituído, de modo geral, por um material orgânico não tóxico, pode ser utilizado como fonte de biomassa para a produção de energia [5]. Quando seco, seu poder calorífico, similar ao do carvão mineral, viabiliza vários processos de recuperação e geração de energia [6].

Um dos processos térmicos potenciais para valorização do lodo é a gaseificação. Neste processo termoquímico de oxidação parcial, substâncias carbonáceas são convertidas em gás na presença de um agente gaseificante, usualmente ar, vapor d'água, oxigênio ou  $\text{CO}_2$  [7]. Para que somente uma parte da biomassa seja oxidada, a oxidação ocorre em condições limitantes, com disponibilidade de oxigênio abaixo da estequiométrica [8]. O objetivo da tecnologia é a produção de um gás combustível, conhecido como singás [5], que consiste principalmente de  $\text{CO}$  e  $\text{H}_2$ , além de outros componentes, como  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . A composição do singás depende das características da biomassa, do tipo de gaseificador, do agente gaseificante e das condições do processo [7]. No geral, a gaseificação ocorre em temperaturas altas, de 500 a 1400°C e pressões que variam da atmosfera até 33bar [9]. O rendimento em singás pode variar de 1 a 3  $\text{Nm}^3$  de singás por kg de biomassa seca [8].

O processo de gaseificação apresenta vantagens importantes, quando comparado a outros processos de recuperação de energia, como maior eficiência energética, menor emissão de  $\text{CO}_2$ , rápida conversão e produção de hidrogênio, apontados por alguns pesquisadores como o substituto da gasolina e do diesel no futuro [10]. No entanto, o excesso de umidade na alimentação reduz a eficiência do gaseificador e o poder calorífico do singás [11]. Usualmente, teores de umidade na faixa de 10 a 20% em massa são adotados. A obtenção destes teores de umidade adequados no lodo requer o emprego de processos de

desaguamento e secagem que, via de regra, requerem elevado consumo de energia [9], inviabilizando os investimentos em gaseificadores de lodo. Para superar este desafio, a recuperação de calor, do singás e dos gases de combustão, pode ser uma alternativa viável, que ainda precisa ser melhor estudada. Este trabalho apresenta uma modelagem termodinâmica, para simular a recuperação de calor em um sistema composto por uma unidade de gaseificação de lodo e uma unidade de geração de eletricidade em motor de combustão interna.

## 2. Metodologia

A modelagem termodinâmica foi realizada no *software Engineering Equation Solver (EES)* [12]. Dados termodinâmicos dos compostos químicos foram obtidos do próprio software, na função NASA. Para cada etapa do processo, balanços de massa e energia foram feitos. Condições ambientes de 25°C e 1atm foram admitidas e o fluxograma do processo modelado é apresentado na Figura 1.

O processo considera uma ETE com tratamento anaeróbio em reatores UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), uma vez que este tipo de tecnologia é predominante nas ETE do Brasil [13]. A ETE foi considerada para atender uma população de 20 mil habitantes. A vazão de esgoto foi fixada em 40L/s, o que representa uma contribuição per capita de 172,8L/hab.d, dentro da faixa de 110-180L/hab.d recomendada por von Sperling e Chernicharo [14]. A demanda química de oxigênio (DOQ) do esgoto doméstico foi estimada em 600mg/L, também seguindo a recomendação dos autores. A produção de metano teórica foi avaliada pela metodologia proposta por Lobato et al. (2012) [15], que desenvolveram um modelo para o balanço dos fluxos de DQO e do potencial de recuperação de energia em reatores UASB na forma de biogás.

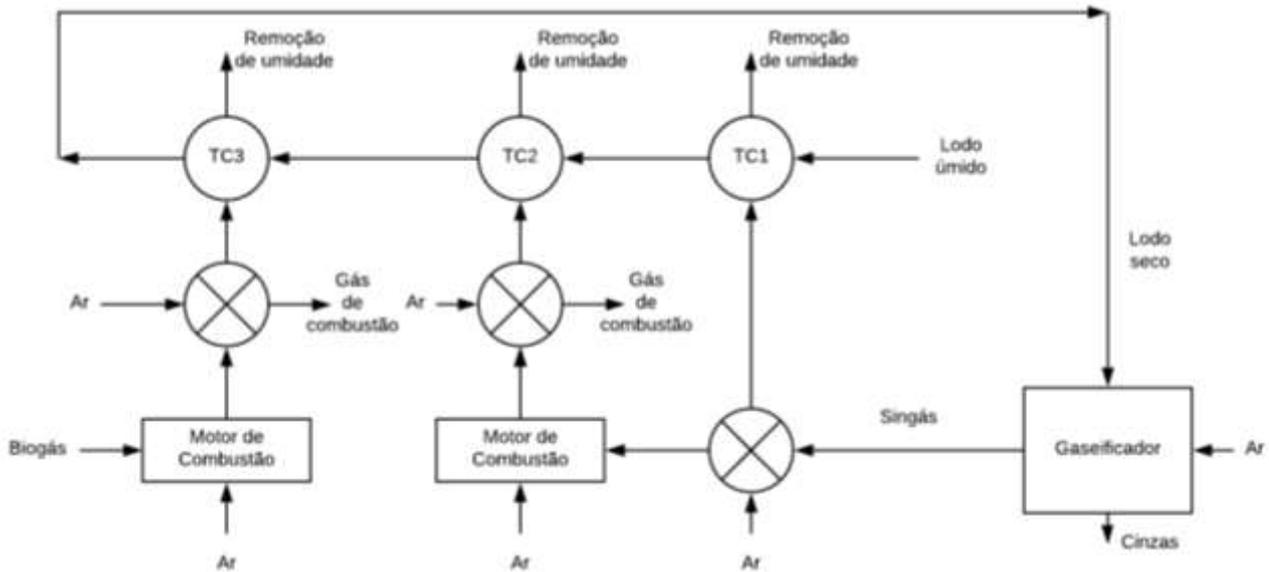


Figura 1: Fluxograma do processo de recuperação de calor.

A composição do ar foi baseada em Moran e Shapiro (2014) [18]. A umidade relativa do ar foi retirada do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) [19] para a cidade de Vitória. O teor de umidade do lodo, considerado na alimentação do gaseificador foi de 20% [9]. A composição elementar do lodo em base seca e a composição mássica das cinzas foram retiradas de Lora e Venturini (2012) [20]. O percentual de cinza foi ajustado para totalizar 100% e o percentual de  $\text{SiO}_2$  foi somado as frações de  $\text{SO}_3$  e outros. A fração de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  foi considerada como  $\text{FeO}$  para os cálculos termodinâmicos, devido a limitações no banco de dados do *software*. A razão equivalente de ar, o poder calorífico superior (PCS) do lodo seco e a composição do singás produzido foram retiradas de Choi et al. (2016) [21]. Para a correção do poder calorífico para o lodo úmido adotou-se a equação de Lora e Venturini (2012) [20].

Dois tipos de trocadores de calor foram considerados na recuperação de energia. O primeiro do tipo fechado (de contato indireto), operando com ar como fluido de troca térmica e com temperatura de saída admitida em  $10^\circ\text{C}$  acima da temperatura ambiente. O segundo do tipo aberto (de contato direto), com remoção de umidade através da saturação do ar, previamente aquecido no primeiro trocador de calor. Em todos os

trocadores de calor, a efetividade considerada foi de 80% [22].

A geração de eletricidade foi simulada em motores de combustão interna, com queima total do combustível e excesso de 65% de ar na alimentação do motor. Uma eficiência média de 30% do equipamento foi admitida, conforme Metcalf e Eddy (2016) [4]. Um motor auxiliar queimando biogás também foi avaliado, uma vez que o biogás gerado nos reatores UASB também é uma fonte de energia que pode ser aproveitada na secagem. A composição volumétrica foi baseada no guia do PROBIOGAS (2016) [13]. Todos os parâmetros usados na modelagem, assim como as vazões de lodo seco e biogás, foram compilados na Tabela 1.

A simulação teve início no gaseificador. A partir da massa de lodo alimentada e sua composição elementar, a massa de ar foi calculada conforme estequiometria da reação de combustão, considerando a razão equivalente de ar de 0,36. Uma vez que a massa de cinza na entrada do gaseificador é a mesma da saída, a massa de singás foi obtida pelo balanço. Como as composições do ar, da cinza, do lodo e do singás são conhecidas, a massa de cada componente foi calculada e usada no balanço de energia. A entalpia de entrada e saída no gaseificador foram igualadas, desprezando-se o trabalho e o calor. Nos trocadores de

calor de contato indireto não há alteração na composição mássica dos fluxos e o balanço de energia foi determinado pelas entalpias de entrada e saída. Nos trocadores de calor com contato direto, a quantidade de água removida foi obtida pela saturação do ar. Para os

motores, o balanço de massa foi feito pela estequiometria da reação de combustão, e o balanço de energia desprezou o calor.

Tabela 1: Parâmetros usados na modelagem.

Composição molar do ar seco e umidade relativa	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Ar</b>	<b>Umidade</b>					
	0,7809	0,2095	0,0003	0,0093	79%					
Composição elementar do lodo seco e PCS	<b>C</b>	<b>H</b>	<b>O</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>Cinza</b>	<b>PCS</b>			
	0,311	0,042	0,243	0,033	0,011	0,36	14,1MJ/kg			
Composição Porcentual em base mássica das cinzas	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>FeO</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>		
	50,73	10,4	12,1	16,6	5,61	1,4	0,82	2,34		
Composição Porcentual em base volumétrica do singás	<b>CO</b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>2</sub>H<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>2</sub>H<sub>4</sub></b>	<b>C<sub>2</sub>H<sub>6</sub></b>	<b>C<sub>6</sub>H<sub>6</sub></b>	<b>NH<sub>3</sub></b>
	9,1	11,78	14,71	5,8	54,41	0,17	3,17	0,23	0,48	0,15
Composição Porcentual em base volumétrica do biogás e vazão	<b>CH<sub>4</sub></b>	<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub>O</b>	<b>H<sub>2</sub>S</b>	<b>N<sub>2</sub></b>	<b>O<sub>2</sub></b>	<b>H<sub>2</sub></b>	<b>Vazão</b>		
	61	30	3,25	0,75	2	2	1	m <sup>3</sup> /dia	312,12	

### 3. Resultados e Discussões

Os resultados obtidos na simulação, como a temperatura de cada fluxo, o trabalho realizado nos motores, as vazões mássicas no gaseificador e a remoção de água em cada etapa, são apresentados na Figura 2.

A temperatura de 612°C, calculada para o gaseificador, está dentro do intervalo de 500 a 1400°C reportado na literatura. O volume de singás, produzido nesta temperatura, corresponde a um volume de 1894m<sup>3</sup> nas condições normais de temperatura, ou 2Nm<sup>3</sup>/Kg de lodo seco. Este valor também está dentro da faixa de 1 a 3 Nm<sup>3</sup> de singás por kg de biomassa seca, referida na literatura. A secagem do lodo com o reaproveitamento de calor foi significativa. Considerando um lodo com 75% de umidade inicial [14], 30% da água presente no lodo é removida. Apesar do valor não ser suficiente para atingir a recomendação de 20% de umidade na alimentação do gaseificador, o valor é significativo e requer maior atenção para aprimoramento. Sistemas de secagem com energia solar, por exemplo, poderiam reduzir a umidade inicial para valores abaixo de 75%, reduzindo a demanda de

energia nos trocadores de calor. Estudos experimentais de gaseificação, com um teor de umidade no lodo acima de 20%, caso se mostrem possíveis, também poderiam viabilizar o fluxograma sugerido neste trabalho. Segundo Raheem et al. (2015) [11], alguns tipos de biomassa podem ser gaseificadas com até 40% de umidade. Além disso, ressalta-se que o lodo na saída dos trocadores de calor possui temperatura acima da temperatura ambiente. Se esta temperatura fosse mantida até a entrada do gaseificador, conforme disposto na Figura 1, o processo entraria num *looping* que melhoraria a secagem, uma vez que a maior temperatura da alimentação teria um efeito cascata em todas as correntes do fluxograma. Isso não foi feito nesta modelagem, para simular um cenário mais conservador. Outra possibilidade seria reintroduzir a energia diária produzida nos motores, de 1058,7 KW, para complementar a secagem.

A recuperação de energia do singás, no primeiro conjunto de trocadores de calor, foi a mais expressiva, representando 72% de toda a secagem. Os gases de combustão gerados pela queima do biogás produzido nos reatores UASB contribuíram com apenas 8% da secagem, possivelmente pelo pequeno volume de biogás produzido na ETE. Este valor é um indicativo de

que para pequenas estações, a aquisição dos equipamentos não se justificaria para uma remoção tão pequena de água e os recursos aplicados nos

trocadores de calor no fluxo de singás teriam maior retorno.

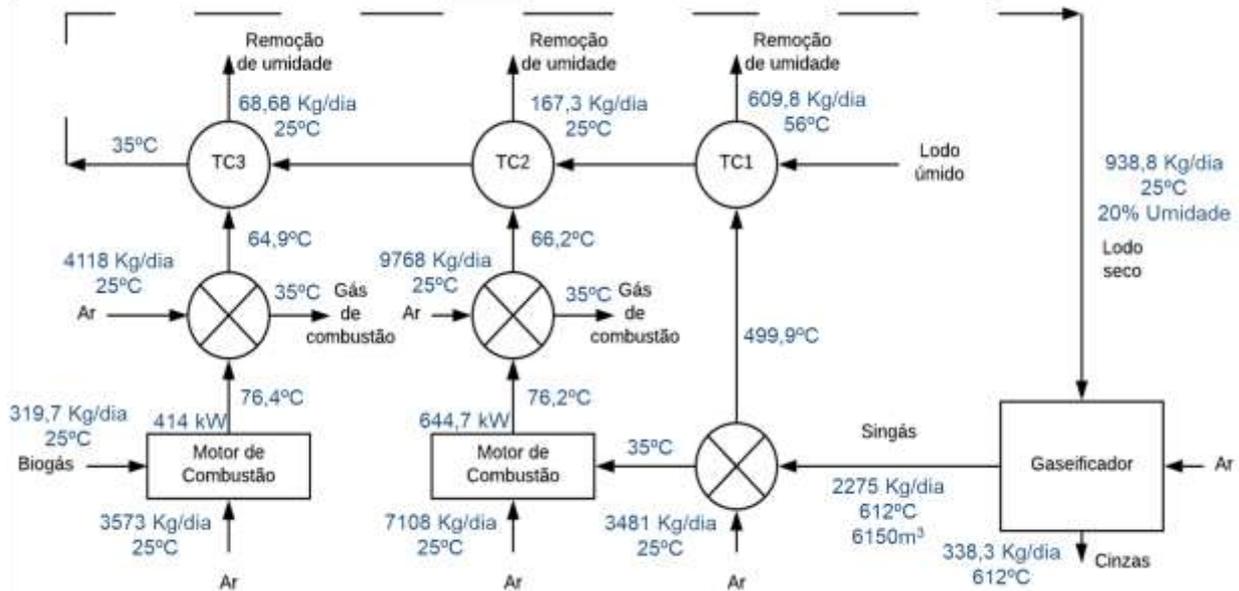


Figura 2: Fluxograma do processo de recuperação de calor com os resultados obtidos na simulação.

## 4. Conclusões

A modelagem termodinâmica da recuperação de calor em gaseificadores, visando a secagem de lodo de esgoto obtido em reatores UASB, indicou uma remoção considerável de umidade no lodo. Os resultados calculados mostraram uma produção de singás de  $2\text{Nm}^3/\text{Kg}$  de lodo seco, com temperatura de  $612^\circ\text{C}$ , o que proporciona uma remoção de 28% de água, para um lodo desaguado com 75% de umidade. A secagem foi significativa e motiva estudos mais aprofundados. Dados experimentais, obtidos em um gaseificador piloto, por exemplo, poderão melhorar a confiabilidade da modelagem, uma vez que se evitaria a utilização de dados dispersos na literatura, empregados neste trabalho pela ausência de informações do processo.

## 5. Referências

[1] FUNASA, Fundação Nacional de Saúde. Manual de Saneamento. Editora Assessoria de Comunicação e

Educação em Saúde, 4ª edição revisada, Brasília, 2006.

[2] SNIS. Sistema Nacional de Informação Sobre Saneamento. Disponível em <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso em: 26 Mai. 2018.

[3] PROSAB, Programa Nacional de Saneamento e Pesquisa. Digestão de resíduos orgânicos e aproveitamento do biogás. Coordenador CASSINI, S. T. Vitória, 2003. Editora ABES, Rio de Janeiro, 2003.

[4] METCALF & EDDY. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. Editora AMGH, 5ª Edição, 2013. Tradução Ivanildo Hespagnol e José Calos Mierzwa, 2016.

[5] MANARA, P.; ZABANIOTOU, A. Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion - a review. Renew. Sust. Energ. Rev. v. 16, p. 2566-2582, 2012.

[6] ZABANIOTOU, A. A.; SAMOLADA, M. C. Comparative assessment of municipal sewage sludge incineration, gasification and pyrolysis for a sustainable

sludge-to-energy management in Greece. *Waste Manag.*, v. 34, p. 411-420, 2014.

[7] RUIZ, J. A.; JUÁREZ, M. C.; MORALES, M. P.; MUÑOZ, P.; MENDÍVIL, M. A. Biomass gasification for electricity generation: review of current technology barriers. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, v. 18, p. 174-183, 2013.

[8] MOLINO, A.; CHIANESE, S.; MUSMARRA, D. Biomass gasification technology: the state of the art overview. *J. Energy Chem.*, v. 25, p. 10-25, 2016.

[9] AHMAD, A. A.; ZAWAWI, N. A.; KASIM, F. H.; INAYAT, A.; KHASRI, A. Assessing the gasification performance of biomass: a review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, v. 53, p. 1333-1347, 2016.

[10] 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*, v. 35, p. 11738-11745, 2010.

[11] RAHEEM, A.; WAN AZLINA, W. A. K. G.; TAUFIQ YAP, Y. H.; DANGUAH, M. K.; HARUN, R. Thermochemical conversion of microalgal biomass for biofuel production. *Renew Sustain Energy Rev.*, v. 49, p. 990-999, 2015.

[12] Engineering Equation Solver (EES) for Microsoft Windows Operating System: Academic Professional Version.

[13] PROBIOGAS. Projeto Brasil - Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil. Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs a partir do biogás. Brasília: 2016.

[14] VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. Biological wastewater treatment in warm climate regions. Volume one, Ed. IWA, London, 2005.

[15] LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating

domestic wastewater. *Water Science & Technology*, v. 66(12), p. 2745-2753, 2012.

[16] PIEROTTI S. M. Avaliação da partida de um reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB), em escala real, sob condições hidráulicas desfavoráveis. Dissertação (Mestrado em hidráulica e saneamento), Escola de engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007.

[17] PECORA, V. Implantação de uma Unidade Demonstrativa de Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás de Tratamento do Esgoto Residencial da USP – Estudo de Caso. Dissertação (Mestrado em Energia), Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

[18] MORAN, Michael. J; SHAPIRO, Howard N. Princípios de Termodinâmica para Engenharia. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014. 819 p.

[19] INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/portal>>. Acesso em: 26 Mai. 2018.

[20] LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. Biocombustíveis. Vol. 1. Editora Interciência. 2012.

[21] CHOI, Y. K.; CHO, M. H.; KIM, J. S. Air gasification of dried sewage sludge in a two-stage gasifier. Part 4: Application of additives including Ni-impregnated activated carbon for the production of a tar-free and H<sub>2</sub>-rich producer gas with a low NH<sub>3</sub> content. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, p. 1460-1467, 2016.

[22] PETERLI, Z. Modelagem termodinâmica da secagem de lodo com aproveitamento da energia térmica de baixa temperatura dos sopradores de ar de estação de tratamento de esgoto sanitário do tipo lodo ativado. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Desenvolvimento Sustentável), Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Desenvolvimento Sustentável, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2015.