

AVALIAÇÃO TERMO-ECONÔMICA DA SECAGEM E GASEIFICAÇÃO DE LODO SANITÁRIO INTEGRADO A COGERAÇÃO COM SINGÁS

Zudivan Peterli¹, zpeterli@gmail.com

Juraci de Sousa Araújo Filho², juraciaraujo.eng@gmail.com

José Joaquim Conceição Soares Santos³, jjcssantos@yahoo.com.br

1,2,3Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Departamento de Engenharia Mecânica, Avenida Fernando Ferrari, 514, Goiabeiras, Vitória/ES, CEP 29075-910.

Resumo. A busca pela descarbonização e transição energética são temas importantes e alinhados com os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU). Diante da relevância do tema, avaliou-se a viabilidade termo-econômica da gaseificação de lodo para a cogeração com singás visando a produção de energia elétrica para o autoconsumo e a produção de energia térmica para a secagem do lodo. Para isso, utilizou-se um modelo termodinâmico, seguido de modelo econômico-financeiro, para avaliar a viabilidade de três cenários aplicados sobre uma estação de tratamento de esgoto (ETE). Os resultados indicaram que o cenário 1 apresenta o potencial de produzir 131kW_e e secar 28,6% do lodo, demandando de energia externa para completar a secagem, enquanto no cenário 2 existe o potencial de secar 100% do lodo e produzir 20kW_e, mas ambos os cenários não apresentaram viabilidade econômica. O cenário 3 mostrou viabilidade termo-econômica para a gaseificação exclusivamente para a produção de energia elétrica na premissa da existência de lodo seco na ETE, apresentando *payback* descontado de 4,1 anos e indicando atratividade para o investimento. Identificou-se que o potencial de produção de energia elétrica no cenário 1 e 3 equivalem a 43% do típico consumo de ETE do tipo Lodo Ativado, mostrando que o lodo apresenta potencial energético interessante e a gaseificação é uma solução promissora para transformá-lo em subproduto com valor econômico agregado e alinhado com os ODS. Entretanto, deve-se fomentar novas pesquisas e desenvolvimento tecnológico para reduzir os custos dos secadores e viabilizar a integração com a gaseificação para produzir uma solução autossustentável energeticamente.

Palavras-chave: Bioenergia. Biomassa. Eficiência Energética. ETE. Biorrefinaria.

1. INTRODUÇÃO

A transição energética da sociedade em conjunto com a melhoria da qualidade de vida da população são metas mundiais, conforme definição da Organização das Nações Unidas (ONU, 2024a, ONU, 2024b) através dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS). Entre os ODS estabelecidas, destacam-se o 6º e 7º ODS que permeiam, respectivamente, a ampliação do acesso aos serviços de saneamento e energia limpa para toda a população (ONU, 2024c).

Para atender aos ODS citados, pode-se apresentar o conceito de biorrefinarias que vem ganhando, gradualmente, o interesse de diversos setores produtivos (LORA; VENTURINI, 2012), principalmente aqueles que buscam a descarbonização dos seus produtos e a integração com a economia circular através da valorização energética dos resíduos.

O conceito de biorrefinarias é aplicável para o presente projeto, pois a produção de energia elétrica a partir de lodo sanitário, um resíduo do processamento do esgoto, associado ao tratamento térmico desse material, apresenta uma aplicação ligada a descarbonização e transição energética, além de caminhar na direção do desenvolvimento de estações de tratamento de esgoto (ETE) autossustentáveis energeticamente.

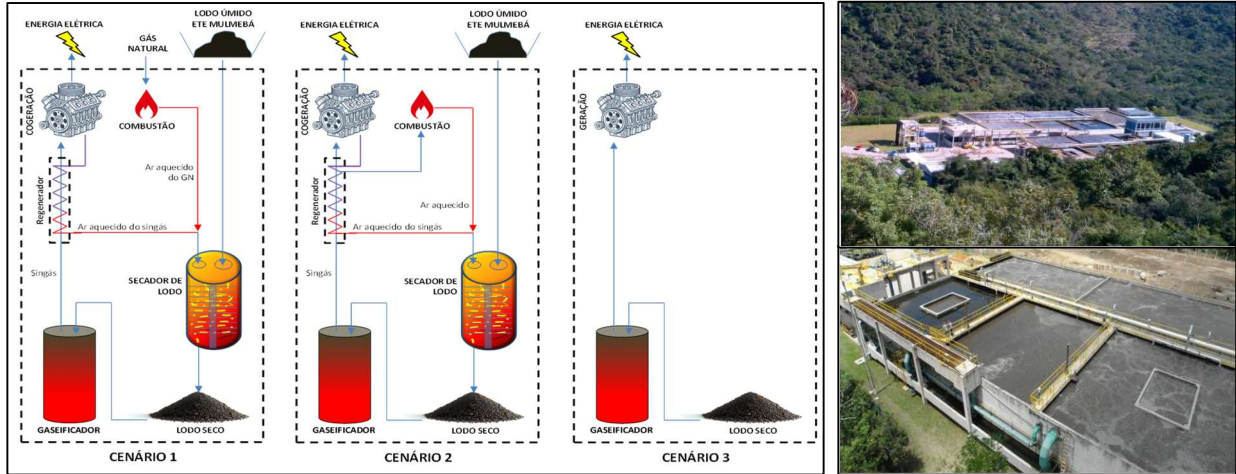
Perante o exposto, percebe-se a importância de investigar na valorização energética do lodo sanitário para transformar esse resíduo do saneamento em um subproduto com valor econômico agregado. Por isso, o principal objetivo deste trabalho consiste em avaliar a viabilidade termo-econômica na conversão de lodo em singás e, deste, em energia elétrica para autoconsumo e energia térmica para a secagem do próprio lodo.

2. METODOLOGIA

Para a avaliação foi utilizado um modelo termodinâmico que quantificou o potencial de produção e consumo de singás, energia elétrica e térmica, além de modelo econômico-financeiro que avaliou a viabilidade econômica do projeto através de indicadores financeiros que foram aplicados em três cenários e estão descritos a seguir e ilustrados na Figura 1.

- Cenário 1: Gaseificação c/ cogeração de energia elétrica para autoconsumo (prioridade) e calor para a secagem térmica de lodo sanitário, podendo utilizar gás natural (GN) para complementar a secagem do lodo;
- Cenário 2: Gaseificação c/ cogeração de energia elétrica para autoconsumo e calor para a secagem de lodo, priorizando a secagem térmica a partir da combustão direta do singás e gerando energia elétrica com o excedente;
- Cenário 3: Gaseificação unicamente para a geração de energia elétrica, partindo do princípio da existência de lodo seco na estação utilizada como estudo de caso.

Figura 1 – Esquema representativo dos cenários propostos (esquerda) e vista superior da ETE Mulembá I (direita)



Fonte: Produção dos próprios autores.

Todos os cenários foram modelados sobre a ETE Mulembá I, localizada em Vitória, Espírito Santo. A referida estação possui a capacidade instalada de 204 L/s e faz uso do sistema de Lodos Ativos com tecnologia UNITANK.

Por fim, ressalta-se que os modelos utilizaram os subscritos “e” e “t” para indicar propriedades e/ou unidades de medida ligadas a potência ou energia elétrica (“e”) e potência ou energia térmica (“t”), respectivamente.

2.1. MODELO TERMODINÂMICO

O balanço energético foi baseado em indicadores de literatura que retratam o potencial de conversão de lodo em singás (LORA; VENTURINI, 2012; SÁNCHEZ, 2010), possibilitando o uso da equação (1) para estimar a produção de singás.

$$\dot{Q}_{\text{singás}} = \dot{m} \cdot p_g \quad (1)$$

Sendo:

$Q_{\text{singás}}$: Vazão de singás produzido a partir de lodo sanitário seco (Nm³/d);

$\dot{m}$: Vazão mássica de lodo sanitário seco (kg/d);

p_g : Produção média de singás a partir de lodo sanitário seco (Nm³/kg).

Diante da estimativa de vazão do singás, foi aplicada a equação (2) para estimar a energia elétrica que poderia ser produzida a partir do referido gás combustível.

$$E_e = \eta \cdot PCI \cdot \dot{Q}_{\text{singás}} \quad (2)$$

Sendo:

E_e : Energia elétrica produzida a partir do singás (kWh_e/d);

η : Eficiência do ciclo de potência escolhido para a conversão do singás em eletricidade (%);

PCI : Poder calorífico inferior do singás (kWh_t/Nm³).

A eficiência de conversão do singás em energia elétrica foi definida em 30%, considerando o uso de ciclo de potência Otto com motor de combustão interna alternativo (MCIA) acoplado a gerador elétrico (LORA; VENTURINI, 2012; SANCHEZ, 2010; CAPEHART, 2016; JORDÃO; PESSOA, 2014; METCALF; EDDY, 2016; MORAN; SHAPIRO, 2014; MWM, 2023), sendo uma das rotas de conversão recomendadas para o singás em função da sua característica (gás pobre) e nível de potência instalada que uma planta de gaseificação poderia produzir a partir de uma ETE.

Para validar a aplicação do MCIA para o presente trabalho, foi analisado a ordem de grandeza obtida pela potência elétrica média a partir da equação (3), sendo considerada a operação em regime contínuo dos equipamentos ($\Delta t=24\text{h/d}$).

$$P_m = \frac{E_e}{\Delta t} \quad (3)$$

Sendo:

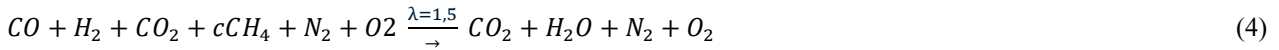
P_m : Potência elétrica média (kW_e);

Δt : Tempo de operação do grupo gerador elétrico (h/d).

Fixou-se a temperatura e pressão de referência em 25°C e 1 atm e modelou-se a recuperação de parte do calor sensível no singás aquecido na saída do gaseificador e nos gases de combustão na saída dos MCIA, conforme descrito a seguir:

- Singás na saída do gaseificador em 550°C (SANCHEZ et al., 2010), resfriado até 35°C (*pinch point* de 10°C);
- Gases de combustão na saída dos MCIA em 350°C, resfriados até 110°C para evitar condensação e corrosão.

Para o balanço de energia da recuperação, considerou-se a composição química do singás descrita por Soares e outros (2018) e Choi e outros (2016), mas simplificando a composição pela incorporação dos hidrocarbonetos dentro da composição do metano, garantindo uma modelagem mais simplificada, mas sem perda significativa da precisão dos resultados para este estudo. Ademais, a combustão foi modelada com λ de 1,5 ($\lambda=1,5$) ou excesso de 50% de ar (METCALF; EDDY, 2016; SANCHEZ et al. 2010), resultando na reação de combustão não balanceada da equação (4).



Aplicou-se a Primeira Lei da Termodinâmica sobre o fluxo de singás e gases de exaustão representados na equação 4, considerando que a recuperação de energia térmica ($\dot{Q}_{rec}$) ocorreu unicamente pela transferência de calor para aquecimento de um fluxo de ar que foi empregado para a secagem do lodo, sendo essa recuperação ocorrida em trocadores de calor do tipo gás-gás, fluxo contracorrente, adiabáticos e que a troca térmica ocorre sem mudança de fases e com variação de energia cinética e potencial desprezíveis ao longo do escoamento, resultando na equação (5).

$$\dot{Q}_{rec} = (\sum_{i=1}^n \dot{m}_i \Delta h_i)_{singás} + (\sum_{j=1}^m \dot{m}_j \Delta h_j)_{exaustão} \quad (5)$$

Sendo:

$\dot{Q}_{rec}$: Calor transferido ou energia térmica recuperada (kW_t);

$\dot{m}_i$: Vazão mássica do componente i presente no singás (kg/s);

Δh_i : Variação de entalpia específica do componente i presente no singás (kJ/kg);

$\dot{m}_j$: Vazão mássica do componente j presente no gás de exaustão (kg/s);

Δh_j : Variação de entalpia específica do componente j presente no gás de exaustão (kJ/kg).

Para a demanda de energia térmica da secagem ($\dot{Q}_{sec}$), mostrada na equação (6), considerou-se que a secagem do lodo ocorreria de 75% até 20% de umidade, condizente com o modelo desenvolvido por Soares e outros (2018) e dentro dos limites de umidade aceitos para a alimentação de gaseificadores (SANCHEZ et al., 2010; LORA; VENTURINI, 2012).

$$\dot{Q}_{sec} = \eta \cdot (\dot{m}_{ls} \Delta h_{ls} + \dot{m}_{ur} \Delta h_{ur} + \dot{m}_{av} \Delta h_{av}) \quad (6)$$

Sendo:

$\dot{Q}_{sec}$: Calor transferido ou energia térmica demandada para a secagem do lodo (kW_t);

η : Eficiência térmica do sistema de secagem de lodo (decimal);

$\dot{m}_{ls}$: Vazão mássica de lodo seco (kg/s);

Δh_{ls} : Variação de entalpia específica do lodo seco (kJ/kg);

$\dot{m}_{ur}$: Vazão mássica de água residual presente no lodo (kg/s);

Δh_{ur} : Variação de entalpia específica da água residual presente no lodo (kJ/kg);

$\dot{m}_{av}$: Vazão mássica de água vaporizada durante a secagem (kg/s);

Δh_{av} : Variação de entalpia específica da água vaporizada durante a secagem (kJ/kg).

Para a secagem do lodo, considerou-se o aquecimento de 25°C até 99,9°C do lodo seco e parcela de água não vaporizada, enquanto a água vaporizada foi aquecida até 110°C para garantir a sua vaporização e saída do secador sem a ocorrência de condensação devido as perdas térmicas. Em complemento, fixou-se a eficiência térmica global do sistema de secagem em 75%, valor em linha com a demanda térmica para a secagem de biomassa por Reyes e outros (2014), e considerou-se que todo o fluxo de ar de secagem entraria no secador e, antes da saída, alcançaria o equilíbrio térmico com o lodo de entrada, resultando na mesma transferência de energia que foi recuperada nos trocadores de calor.

Para modelar as variações de propriedades da água e demais substâncias, utilizou-se o *software CoolProp®* e *Microsoft Excel®*, sendo a única exceção a entalpia do lodo seco que foi modelada pelo polinômio do calor específico a pressão constante dos autores Arlabosse, Chavez e Prevot (2005), conforme mostra a equação (7).

$$\Delta h_{ls} = \int_{T_1}^{T_2} (1434 + 3,29T_1) dT \quad (7)$$

Sendo:

T1: Temperatura inicial do lodo seco (°C) e T2: Temperatura final do lodo seco (°C).

2.3. MODELO ECONÔMICO-FINANCEIRO

A avaliação econômica do projeto foi realizada pela composição do fluxo de caixa durante a vida útil do sistema que foi definida em 10 anos (MWM, 2023; SANTOS et al., 2016). Neste modelo foi considerado os valores de *Capital Expenditure* (CAPEX) e *Operational Expenditure* (OPEX) do sistema de gaseificação, cogeração e secagem, além da economia pelo autoconsumo da energia elétrica e custo evitado na destinação de lodo ao aterro sanitário. Os valores de CAPEX foram atualizados pelo Sistema Especial de Liquidação e Custódia (SELIC) do Banco Central do Brasil (BRASIL, 2024) com data-base de nov/2024. Considerou-se nulo o valor residual e custo de descomissionamento da estrutura, além do custo de mão de obra para operação e administração do sistema devido a existência de equipe local na ETE Mulembá.

Para a estimativa da economia, considerou-se a operação do sistema por 335 dias por ano, reservando 30 dias para manutenção na planta. Incluído a isso, adotou-se que a ETE Mulembá participa do mercado cativo de energia, subgrupo A4 (2,3 a 25kV), modalidade Azul e tarifas presentes na Resolução Homologatória nº 3.370/2024 (ANEEL, 2024).

2.3.1. Retorno financeiro

A viabilidade econômica foi realizada pelo retorno financeiro a partir dos indicadores de Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e PayBack Descontado, indicadores obtidos a partir da Equação (8) e (9).

$$VPL = \sum_{j=1}^{j=N} \frac{F_j}{(1+i)^j} - CAPEX \quad (8)$$

$$VP = \frac{VF}{(1+i)^j} \quad (9)$$

Sendo:

VP: Valor presente do investimento no tempo 0 (R\$);

VF: Valor final do investimento no tempo J (R\$);

Fj: Fluxo de caixa no instante j (R\$);

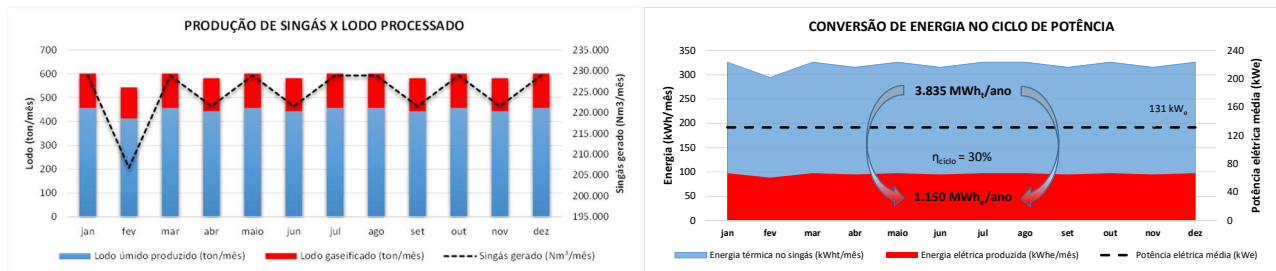
i: Taxa de desconto (decimal).

Considerou-se que a taxa de desconto será igual a taxa média de atratividade (TMA), sendo referenciada no valor da SELIC para a data de 30/11/2024, garantir um valor em linha com o mercado de títulos públicos da dívida brasileira.

3. RESULTADOS

Na Figura 2 apresenta-se a produção média de lodo úmido (75% de umidade), lodo gaseificado (20% de umidade) e singás para a ETE Mulembá I, além da energia e potência elétrica pela conversão do singás no sistema de cogeração.

Figura 2 – Perfil das produção média de lodo e singás (esquerda) e balanço termelétrico da conversão do singás (direita)



Fonte: Produção dos próprios autores.

Para a produção de singás a partir de lodo sanitário, considerou-se a taxa de $2 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{\text{base-seca}}$, valor estimado com base em Soares e outros (2018) e próximo aos $1,6 \text{ Nm}^3/\text{kg}_{\text{base-seca}}$ apresentados por Metcalf e Eddy (2016). Somado a isso, identificou-se a produção média de lodo úmido na ETE Mulembá I de 14.768 kg/d (75% de umidade), equivalente a 3.692 kg/d de lodo em base seca. A diferença entre o lodo úmido e o lodo gaseificado (4.615 kg/d) representa a parcela de água vaporizada para o lodo mudar de 75% para 20% de umidade, sendo esse valor na ordem de 10.153 kg/d de água.

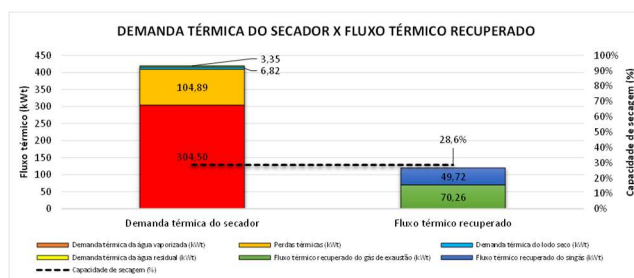
Com a vazão de singás, estimou-se o seu potencial de conversão em energia térmica e elétrica na consideração do PCI de $5,12 \text{ MJ/Nm}^3$, valor obtido pela somatória ponderada do PCI de cada constituinte presente no singás e que resultou em valor dentro da faixa considerada por Metcalf e Eddy (2016) de $4,5\text{-}5,5 \text{ MJ/Nm}^3$ e em linha com Sanchez e outros (2010) e Soares e outros (2018). Diante da conversão do singás em energia elétrica, estima-se que o sistema de conversão

apresentaria potência elétrica média de 131 kW_e, valor adequado para o uso do ciclo de potência Otto com MCIA acoplado a geradores elétricos, conforme relatos de Sanchez e outros (2010), Lora e Venturini (2012) e Metcalf e Eddy (2016).

A energia elétrica produzida (3.151,95 kWh/d) em função do volume de esgoto tratado representa o autoconsumo específico de 0,1788 kWh_e/m³, indicando potencial de economia de 43% quando comparado ao típico consumo de 0,417 kWh_e/m³ descrito por Jordão (2015) para ETE de Lodo Ativado (LA) com nitrificação ou 78% dos 0,23kWh/m³ descrito por Metcalf e Eddy (2016) para o consumo do tratamento biológico em sistemas de LA com remoção de nitrogênio.

Em sequência, estimou-se a potência ou fluxo térmico de energia passível de recuperação a partir do singás na saída do gaseificador e do gás de exaustão dos MCIA, além das demandas térmicas necessárias para realizar a secagem do lodo produzido na ETE Mulembá I até ele alcançar 20% de umidade, sendo tais parcelas térmicas apresentadas na Figura 3.

Figura 3 – Comparação do balanço térmico entre a demanda do secador e do fluxo de gás recuperado



Fonte: Produção dos próprios autores.

Observa-se que a quantidade de energia térmica recuperável do singás e dos gases de exaustão dos MCIA apresentam a capacidade de secar até 28,6% do lodo produzido na ETE Mulembá I, valor próximo aos 28% encontrados por Soares e outros (2018) no estudo que avaliou a secagem térmica de lodo utilizando a cogeração a partir de singás e biogás obtidos em ETE. Diante disso, estimou-se o consumo de 658,13Nm³/d de GN para a complementação da secagem térmica do lodo a partir da consideração do PCI de 39.329,6 kJ/Nm³ para o GN (ESGÁS, 2024; MORAN; SHAPIRO, 2014).

Percebe-se que a maior demanda térmica para a secagem do lodo permeia pela energia necessária para a vaporização da água, indicando a oportunidade de realizar um refino no modelo termodinâmico para recuperar parte dessa energia que é perdida quando o fluxo de água vaporizada sai do secador sem passar por uma etapa de regeneração de calor, sendo uma possibilidade de investigação que pode aumentar a capacidade de secagem do sistema.

Em contrapartida, deve-se avaliar a complementação da secagem do lodo com outras rotas tecnológicas, sendo possível identificar na literatura rotas com resultados parciais para a secagem de lodo, mas quando integradas podem secar 100% do lodo produzido em uma ETE de grande porte. Para isso, pode-se considerar a secagem preliminar do lodo com o auxílio de leitos de secagem para reduzir a demanda térmica no secador, estudada por Lozer e outros (2019), o complemento térmico no secador pelo uso de energia solar e biogás, estudado por Kuk e outros (2022), além da recuperação do calor residual dos sopradores da própria estação, estudado por Peterli, Gonçalves e Santos (2018).

3.1. VIABILIDADE ECONÔMICA

A avaliação econômica-financeira para o cenário 1 indica que é possível economizar pelo autoconsumo de energia elétrica o valor de R\$749.700,60 por ano, considerando a tarifa equivalente de R\$0,71 por kWh_e que é composta pela tarifa de R\$0,5619 por kWh_e da ANEEL (2024), acrescidos do ICMS de 17% (ESPÍRITO SANTO, 2001) e PIS/COFINS médios e não acumulativos de 2024 da EDP (2024) que foram 0,7517% e 3,9042%, respectivamente.

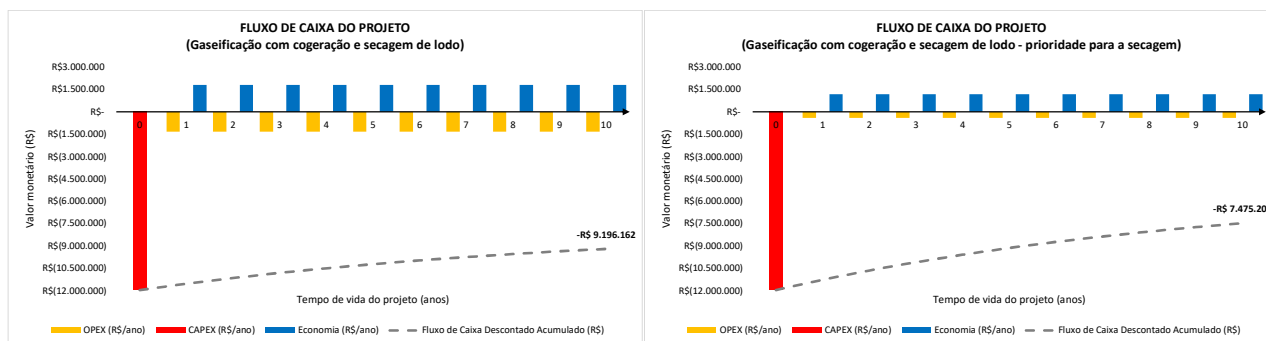
Para a economia com o aterro sanitário, estimou-se o valor de R\$1.054.364,31 por ano (R\$213,12 por tonelada), considerando o custo médio inicial de R\$208,55 por tonelada destinada e transportada (40km) de Boratto e von Sperling (2022), atualizado com base na SELIC de jan/2022 até nov/2024.

Para implantar o sistema de gaseificação com grupo gerador movido a MCIA, considerou-se o CAPEX total de R\$1.782.582,45 que tem origem no valor unitário de R\$13.573,18 por kW_e instalado que foi obtido pela conversão de dólar para real e atualização com base na SELIC de jan/2007 à nov/2024 do valor de US\$2.880 por kW_e apresentados por Fernandes e Sanchez (2010) para a gaseificação de biomassa. Enquanto para o secador de lodo, definiu-se o CAPEX total de R\$10.179.065,52 de Boratto e von Sperling (2022), atualizado de maio/2021 até novembro/2024 pela SELIC a partir do valor de R\$2.387 por kg_{lodo-seco}, sendo esse o valor inferior da faixa apresentada pelos referidos autores.

Para o OPEX da planta de gaseificação, considerou-se o valor anual de 10% sobre o CAPEX do projeto para o sistema, semelhante ao adotado no trabalho de Santos e outros (2016), resultando em R\$178.258,24 por ano de OPEX. Enquanto para o secador de lodo, aplicou-se o custo para manutenção de R\$197.891,20 por ano a partir do custo unitário de R\$0,18 por kg_{lodo-seco} de Boratto e von Sperling (2022), atualizado de maio/2021 à nov/2024 pela SELIC, somado ao custo do GN de R\$901.721,88 por ano na consideração da tarifa fixa de R\$9.097,42 por mês (consumidor classe 4) e tarifa variável de R\$ 3,7170 por m³ de GN consumido, tarifas de novembro de 2024 da ESGÁS (2024) que sofreram aumentos de 17% de ICMS para o estado do Espírito Santo e PIS/COFINS não acumulativos nos valores de 1,65% e 7,60%, respectivamente.

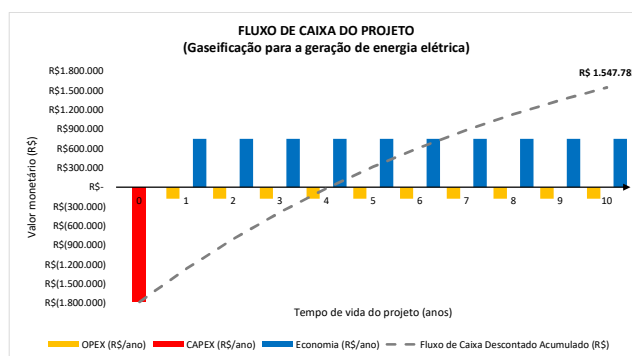
Diante do CAPEX, OPEX e economia, elaborou-se os fluxos de caixa dos cenários para o ciclo de vida de 10 anos (SANTOS et al., 2010; MWM, 2023) e suas projeções são mostradas na Figura 4 (cenário 1 e 2) e Figura 5 (cenário 3).

Figura 4 – Projeção do fluxo de caixa ao longo do ciclo de vida no cenário 1 (esquerda) e cenário 2 (direita)



Fonte: Produção dos próprios autores.

Figura 5 – Projeção do fluxo de caixa ao longo do ciclo de vida no cenário 3



Fonte: Produção dos próprios autores.

A partir da projeção dos fluxos de caixa, resumiu-se os indicadores financeiros de cada cenário na Tabela 1.

Tabela 1 – Indicadores do retorno financeiro do projeto na ETE Mulembá I

Cenário	CAPEX (R\$/projeto)	OPEX (R\$/projeto)	Economia (R\$/projeto)	VPL (R\$/projeto)	TIR (a.a.)	Payback desc. (anos)	Taxa (a.a.)	Tempo do projeto (anos)
1	-R\$ 11.961.648	-R\$ 13.295.479	R\$ 18.040.649	-R\$ 9.196.162	-22,73%	Não retorna	11,25%	10
2	-R\$ 11.961.648	-R\$ 4.008.858	R\$ 11.706.943	-R\$ 7.475.203	-16,68%	Não retorna	11,25%	10
3	-R\$ 1.782.582	-R\$ 1.782.582	R\$ 7.497.006	R\$ 1.547.785	16,56%	4,1	11,25%	10

Fonte: Produção dos próprios autores.

Observa-se que o cenário 1, apesar de demonstrar viabilidade energética com o uso de GN, não demonstrou viabilidade econômica para combinar a gaseificação c/ cogeração e secagem térmica de lodo para a ETE Mulembá I, apresentando VPL negativo e distante da condição de início de viabilidade (VPL=0). Ainda que a vida útil do projeto fosse dobrada (20 anos) ou triplicada (30 anos) para o mesmo CAPEX, não existiria viabilidade econômica.

Ademais, apesar da secagem térmica do lodo representar 58% da economia obtida pela não destinação de lodo para o aterro sanitário (R\$1.054.364,31), valor superior em comparação a economia obtida pela produção de energia elétrica na consideração otimista de autoconsumo e mercado cativo (R\$749.700,60), percebe-se que a viabilidade econômica do cenário 1 foi penalizada pelo elevado valor de investimento do secador, representando 85% do CAPEX previsto no cenário, associado ao alto custo com a compra de GN para complementar a secagem térmica, implicando em 70% do OPEX, sendo essas duas parcelas que mais penalizaram o referido cenário. Apesar disso, esse resultado está em linha com Boratto e von Sperling (2022) que, na avaliação de diferentes métodos de gerenciamento de lodo, mostram a secagem térmica mecanizada como o mais oneroso entre os métodos de secagem.

Em complemento a avaliação termodinâmica do cenário 1, avaliou-se a alternativa de complementação do GN para a cogeração e não para a secagem térmica direta do lodo, propondo uma cogeração híbrida GN-Singás até que a energia térmica recuperada do processo satisfaça a demanda térmica do secador de lodo. Entretanto, a vazão necessária de GN encontrada foi de 180,29Nm³/h – resultando em potência elétrica instalada de 2,1MW_e para o sistema híbrido, desviando da proposta inicial deste trabalho que é a busca por uma solução voltada ao conceito de biorrefinarias com

descarbonização e transição energética, pois apenas 6,25% da potência relatada são do Singás, além do fato que a energia elétrica do Sistema Interligado Nacional já apresenta uma baixa pegada de carbono em comparação a gerada pelo GN.

Para o cenário 2, considerando a prioridade no uso do singás para a secagem térmica do lodo, pode-se atender totalmente a demanda térmica do secador sem o uso de GN e produzir 20,38kW_e para a ETE Mulembá I com singás excedente, resultados em linha com os autores Azeredo e outros (2020) que mostram a viabilidade para a secagem térmica de lodo e produção de energia elétrica. Apesar da viabilidade energética e alívio do OPEX por não utilizar o GN no cenário 2, o elevado valor de CAPEX do secador de lodo também inviabilizou economicamente o cenário 2.

No cenário 3 existe a viabilidade termo-econômica para a produção de energia elétrica a partir da gaseificação do lodo sanitário, indicando a possibilidade de economizar R\$571.442,35 por ano com a geração de energia elétrica para autoconsumo, resultando em VPL de R\$1.547.784,74 que representa 86,83% do CAPEX investido, além de possuir TIR de 16,56% a.a. que é superior a TMA de 11,25% a.a.. Apesar disso, esse cenário ainda encontra significativo desafio termo-econômico para ser consolidado em escala real na ETE Mulembá I, pois ele apresenta a premissa básica de existir lodo sanitário previamente seco na referida estação, fato que não existe.

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que o aproveitamento energético do lodo sanitário apresenta um potencial interessante, pois a partir do lodo seco e a gaseificação com MCIA é possível satisfazer a 43% do típico consumo de ETE do tipo Lodo Ativado.

Percebe-se que os cenários 1 e 2, que são os mais interessantes dentre os cenários que este trabalho avaliou sob a visão da transição energética, esses não apresentaram viabilidade econômica para o modelo proposto, ficando no elevado valor de CAPEX e GN do processo de secagem térmica de lodo a responsabilidade pela inviabilidade, indicando a necessidade de incentivos para o desenvolvimento de tecnologias de secagem térmica mecanizada com menor custo de implantação e que façam uso de fontes energéticas menos onerosas, entre elas a energia térmica residual e a energia solar térmica.

Nota-se que o cenário 3 foi o único que alcançou a viabilidade termo-econômica para os moldes deste trabalho, possibilitando o aproveitamento total do potencial energético presente no lodo para a produção de energia elétrica (131kW_e) e resultando em TIR de 16,56% a.a., valor acima da TMA de 11,25% a.a. e indicando que o investimento é atrativo. Entretanto, o cenário 3 possui uma importante barreira para viabilizar o cenário em escala real que passa pela existência de lodo seco na ETE Mulembá I, fato que não existe na atual configuração da estação.

Recomenda-se para futuros trabalhos a avaliação dos cenários 1 e 2 de forma integrada com a recuperação da energia térmica residual dos sopradores da estação e energia solar térmica para complementar a secagem de lodo, bem como a avaliação de processos de secagem térmica mecanizados menos onerosos, mas que mantenham o princípio da alta taxa de secagem para serem utilizados em estações de grande porte, desenvolvendo uma solução integrada e hibridizada.

Por fim, sugere-se avaliar o uso direto da potência mecânica produzida na cogeração para realizar o acionamento dos principais equipamentos eletromecânicos da estação, avaliando os seus benefícios pela eliminação dos acionamentos elétricos da estação e gerador elétrico do sistema de cogeração.

6. REFERÊNCIAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **RESOLUÇÃO HOMOLOGATÓRIA Nº 3.370, DE 6 DE AGOSTO DE 2024.** 2024. Acessado em: 25 de setembro de 2024. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20243370ti.pdf>

ARLABOSSE, P; CHAVEZ, S; PREVOT C. **Drying of municipal sewage sludge: from a laboratory scale batch indirect dryer to the paddle dryer.** Brazilian Journal of Chemical Engineering – vol.22 n° 2, São Paulo - Apr/June 2005.

AZEREDO, L.Z.; GONÇALVES, R.F.; SOARES, R.B., PETERLI, Z. **Alternativas de configuración de estaciones de tratamiento asociando reactores UASB y lagunas de alta tasa para la recuperación de energía de aguas residuales.** Revista Extensionismo, Innovación y Transferencia Tecnológica. Vol.6, pp 287-300, 2020. doi.org/10.30972/eitt.604400.

BORATTO, D.C.; von SPERLING, M. **Análise e comparação técnica e econômica de alternativas de processamento de lodo de estações de tratamento de esgotos sanitários para uso em solos.** Revista DAE, São Paulo, v.71, n.240, pp 06-22, edição de abr a jun, 2023. doi.org/10.36659/dae.2023.018.

BRASIL. **Calculadora do cidadão.** Banco Central do Brasil, Poder executivo. 2024. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADA0/publico/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValor>>. Acessado em: 01 de dezembro de 2024.

CAPEHART, B.L. 2016. **Microturbines.** College of Engineering, University of Florida. Disponível em: <<http://www.wbdg.org/resources/microturbines.php>>. Acessado em: 18 de setembro de 2024.

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 H₂-rich producer gas with a low NH₃ content.** International Journal of Hydrogen Energy, Volume 41, Issue 3, pp 1460-1467, 2016. doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.11.125.

EDP. ICMS, PIS e COFINS. 2024. Disponível em: <<https://www.edp.com.br/icms-pis-e-cofins/>>. Acessado em: 02 de dezembro de 2024.

ESGÁS. **Gás Natural**. 2024. Disponível em: <<https://esgas.com.br/gas-natural/>>. Acessado em: 02 de dezembro de 2024.

ESPÍRITO SANTO. **LEI Nº 7.000, DE 27 DE DEZEMBRO DE 2001**. 2021. Disponível em: <www3.al.es.gov.br/Arquivo/Documents/legislacao/html/lei70002001.html>; Acessado em 08 de novembro de 2025.

FERNÁNDES, M.C.; SÁNCHEZ, C.G. **Estudo de Casos: plantas de desenvolvimento**. Tecnologia da Gaseificação de Biomassa. Editora Átomo. 1ª edição, 430 páginas, 2010, Capítulo 9, pp 171-186.

JORDÃO, E.P. **É possível economizar energia nas estações de tratamento de esgoto?**. Revista DAE, Set-Dez, pp 6-12, 2015. doi.editoracubo.com.br/10.4322/dae.2015.001

JORDÃO, E.P.; PESSOA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 7ª ed. Rio de Janeiro: SEGRAC, 2014.

KUK, T.N.; SOUZA, J.B.; POSSETTI, G.R.C.; WAGNER, L.G. **Proposta de sistema térmico de higienização e secagem de lodo em escala plena para uma estação anaeróbia de tratamento de esgoto de pequeno porte**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.27, n.2, mar-abr, 291-303, 2022. doi.org/10.1590/S1413-415220200111

LORA, E.E.S. VENTURINI, O.J. **Biocombustíveis**. Editora Interciência. 1ª edição, dois volumes, 2012. 1200 páginas.

LOZER, J.G.; GONÇALVES, R.F.; FABRIS, V.M. **DESAGUAMENTO E HIGIENIZAÇÃO DE LODO DE ESGOTO UTILIZANDO ESTUFA AGRÍCOLA SOBRE LEITOS DE SECAGEM**. Revista Engenharia ambiental e sanitária: interfaces do conhecimento 2. Capítulo 20, pp 244-253. Organizador Helenton Carlos da Silva. Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2019. doi.org/10.22533/at.ed.94219091020

METCALF, T.; EDDY, G. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5ª Ed. NY: McGraw Hill, 2016. 2008p.

MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. RJ: LTC, 2014. 819 p.

MWM, Geradores. **Proposta comercial**. 2023. Palmas, Tocantins. 21 páginas.

ONU – Organização das Nações Unidas no Brasil. 2024a. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável: Energia limpa e acessível**. Acessado em: 25 de setembro de 2024. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/7>>

ONU – Organização das Nações Unidas no Brasil. 2024b. **O Direito Humano à Água e ao Saneamento**. Acessado em: 25 de setembro de 2024. Disponível em: < https://www.un.org/waterforlifedecade/pdf/human_right_to_water_and_sanitation_milestones_por.pdf>.

ONU – Organização das Nações Unidas no Brasil. 2024c. **Objetivo de Desenvolvimento Sustentável**. Acessado em: 25 de setembro de 2024. Disponível em: < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>

PETERLI, Z.; GONÇALVES, R.F.; SANTOS, J.J.C.S. 2018. **THERMODYNAMIC MODELING FOR THE DRYING OF SLUDGE WITH THERMAL ENERGY OF LOW TEMPERATURE TO AIR BLOWER IN WASTEWATER TREATMENT PLANT**. In: Biomass and Bioenergy Conference, 2018, Sorocaba. Proceedings of the Biomass and Bioenergy Conference, 2018.

REYES, A.M.M.; LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J. **Adecuación y transformación de la biomasa como combustible. Capítulo 3. Bioenergía: Fuentes, conversión y sustentabilidad**. MARTINEZ, J.M.R.; LORA; E.E.S. (Editores), 2014, La Red Iberoamericana de Aprovechamiento de Residuos Orgánicos en Producción de Energía, Bogotá, 332p.

SÁNCHEZ, C.G. **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa**. Editora Átomo. 1ª edição, 2010. 430 páginas.

SANTOS, I.F.S., BARROS, R.M., TIAGO FILHO, G.L. 2016. **Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential**. Journal of Cleaner Production, 126, 504-514. doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.072.

SOARES, R.B.; GONÇALVES, R.F.; MARTINS, M.F.; SANTOS, J.J.C.S. **Modelagem Termodinâmica do Reaproveitamento de Calor em Gaseificadores visando Secagem de Lodo**. Blucher Proceedings, vol. 5, n.1, 6 p., Agosto, 2018. doi.org/10.5151/ecfa2018-07

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPES, CNPq, ANEEL, UFES, IFES, CESAN, PPGEM/UFES e PGEFE/IFES pelo apoio no desenvolvimento da pesquisa e bolsas de estudo e, em especial, ao LabTecMec-UFES por patrocinar o evento.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.