

Avaliação Técnica e Econômica da Gaseificação de Lodo Sanitário Seco Visando a Geração de Eletricidade

Ellen Cristina Abrahão Cezarini¹, Osvaldo José Venturini², Túlio Tito Godinho de Rezende³, Zudiwan Peterli⁴, York Castillo Santiago⁵, José Carlos Escobar Palacio⁶

¹Instituto de Engenharia Mecânica (IEM), Univ. Federal de Itajubá (UNIFEI), Brasil, ellencezarini@unifei.edu.br

²Instituto de Engenharia Mecânica (IEM), Univ. Federal de Itajubá (UNIFEI), Brasil, osvaldo@unifei.edu.br

³Instituto de Engenharia Mecânica (IEM), Univ. Federal de Itajubá (UNIFEI), Brasil, tulio.tj@hotmail.com

⁴Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil, zpeterli@gmail.com

⁵Laboratório de Termociências, Universidade Federal Fluminense (UFF), yorkcastillo@id.uff.br

⁶Instituto de Engenharia Mecânica (IEM), Univ. Federal de Itajubá (UNIFEI), Brasil, jocesobar@unifei.edu.br

Resumo

A destinação correta do lodo sanitário gerado nas estações de tratamento de esgoto é objeto de estudos em todo o mundo. No caso do Brasil, tornou-se um tema de fundamental importância desde 2014, quando a Lei nº 12.305 que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos, reforçou que só os resíduos finais e sem viabilidade econômica para o reuso ou reciclagem devem ser enviados para os aterros sanitários. Assim, o uso do lodo de esgoto como biocombustível pode ser uma alternativa viável à sua disposição na agricultura, pois estudos mostram que esse resíduo apresenta benefícios financeiros superiores ao seu uso como estabilizador de solo. No entanto, o lodo deve passar por um estágio de secagem térmica antes de poder ser usado como biocombustível. Nesse sentido, a energia solar térmica (energia heliotérmica) pode ser considerada uma alternativa para complementar a energia consumida na secagem térmica do lodo de esgoto. Com o objetivo de dar ao lodo sanitário um destino nobre, utilizando-o como fonte de energia, este apresenta um estudo da viabilidade técnica e econômica de um sistema de gaseificação de lodo de sanitário para produção de gás de síntese. O gás produzido é usado no acionamento de motores de combustão interna visando a geração de eletricidade, e a secagem do lodo se dá através do uso combinado da recuperação de energia do acionador primário (motor) com a energia solar térmica (heliotérmica)

Palavras-chave: lodo sanitário, secagem, gaseificação, energia heliotérmica, geração de eletricidade.

Abstract

The correct disposal of sewage sludge is the subject of studies worldwide. In the case of Brazil, it has become a topic of fundamental importance since 2014, when Law nº. 12.305, which deals with the National Solid Waste Policy, reinforced the restriction of sending materials to landfills that are only final waste and not economically viable for reuse or recycling. The use of sewage sludge as a biofuel could be a viable alternative to its disposal in agriculture, as studies show that this waste has superior financial benefits than its use as a soil stabilizer. However, the sludge must go through a thermal drying stage before it can be used as biofuel. In this sense, solar thermal (heliothermic energy) can be considered an alternative to supplement the energy consumed in sewage sludge's thermal drying. Aiming to give sewage sludge a noble destination by using it as an energy source, assesses the technical and economic feasibility of a system for gasifying dried sewage sludge to produce syngas used to power internal combustion engines to generate electricity. In the system proposed, the sludge is dried energy recovered from the primary mover (engine) exhaust gas in combination with and solar thermal energy (heliothermic).

Keywords: sewage sludge, drying, gasification, heliothermic energy, electricity generation

1. Introdução

A crescente globalização e o aumento da população mundial fazem com que, ao longo dos anos, o consumo energético se eleve também, sendo que, dentre as fontes energéticas, destacam-se ainda hoje as de origem fóssil [1]. Somado a isso, a preocupação com

as mudanças climáticas e as estratégias de desenvolvimento sustentável fomentam a busca pela ampliação da oferta de energia renovável no atendimento da demanda energética [2].

O Brasil é o país que apresenta uma das matrizes elétricas mais renováveis do mundo [3], com 83,79% do potencial de geração de energia elétrica total.

Entretanto, sua matriz energética ainda apresenta um espaço considerável para substituir o uso de energia fóssil por energia renovável, visto que a última corresponde a apenas 47,9% do total da oferta interna brasileira de fontes primárias de acordo com [4].

Por outro lado, segundo a *World Health Organization* [5] mais de 1,5 bilhões de pessoas ao redor do mundo não dispõem de serviços de saneamento básico. No Brasil, em 2020 foi sancionada a Lei nº 14.026 (Marco Legal do Saneamento) que objetiva a universalização dos serviços de saneamento básico até 2033, entretanto, até 2023, mais 100 milhões de brasileiros ainda não tinham acesso à coleta de esgoto e 35 milhões a água tratada [6].

Com o Marco Legal do Saneamento, espera-se que haja um aumento na geração de lodo sanitário, visto que, uma de suas metas deste Marco Legal é que a coleta e tratamento de esgoto atinja 90% da população. Paralelamente, desde 2014, a Lei nº 12.305 que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos, reforçou a restrição ao envio de materiais para os aterros sanitários de apenas resíduos finais e sem viabilidade econômica para o reuso ou reciclagem.

O lodo sanitário é um resíduo gerado inevitavelmente durante as etapas de tratamento do esgoto [7]. O lodo pode conter muitas substâncias tóxicas, como patógenos, metais e contaminantes orgânicos que, por sua vez, podem causar grave poluição ambiental [8].

Atualmente, para o tratamento e descarte do lodo sanitário, utiliza-se uma série de procedimentos que visam promover a destinação final de forma segura, tais como a digestão anaeróbica, desidratação, secagem e higienização térmica, bem como a disposição em aterros [9]. Porém, existem outras tecnologias que permitem produzir combustíveis, com baixo impacto ambiental, por exemplo, a pirólise e gaseificação [10]. Um exemplo de uso do lodo sanitário para geração de energia no Brasil é a estação de tratamento de esgoto (ETE) de Franca, que iniciou em 2018 um projeto para produção de biometano a partir do lodo sanitário gerado na ETE, visando seu uso veicular [7], [11]. Menezes [7] realizou análises imediatas e elementar de amostras de lodo primário, secundário e terciário, observando um alto teor de matéria orgânica e poder calorífico desse resíduo. Em seguida, enviaram as amostras do lodo a um processo de pirólise, e demonstraram que o *biochar* produzido possui melhores características técnicas para ser usado como combustível do que o lodo bruto.

Singh et al. [12] investigaram o potencial de recuperação energética de lodo de esgoto por incineração e digestão anaeróbica. O potencial de recuperação de energia do lodo em base seca, utilizando como rota de conversão energética a incineração foi de cerca de 555 a 1068 kWh/tonelada, enquanto que, ao utilizar a digestão anaeróbica, a recuperação foi de 315 a 608 kWh/tonelada. Os autores concluíram que essas tecnologias podem contribuir na redução do volume de lodo (60 a 70%) e dos custos de

transporte para final dos resíduos para um aterro sanitário. Lee et al. [13], investigaram através de um sistema de gaseificação a vapor em escala laboratorial a conversão do lodo sanitário em gás de síntese, obtendo resultados promissores em termos de eficiência de gaseificação e produção de gás.

Capodaglio e Callegari [14] afirmam que os processos termoquímicos, como a pirólise e a gaseificação, têm a vantagem de processar o lodo mais rapidamente e de gerar produtos finais versáteis. No entanto, o elevado teor de umidade do lodo bruto, o torna inadequado para a utilização em processos termoquímicos sem uma etapa de secagem preliminar, a qual demanda muita energia, o que, diminui a eficiência geral do processo termoquímico e eleva os custos específicos do tratamento. Estes autores afirmam que os processos termoquímicos podem ser um complemento ideal para a digestão anaeróbica, desde que os custos iniciais sejam reduzidos e as demandas energéticas, principalmente as da etapa de secagem do lodo, sejam reduzidas.

O processo de secagem térmica promove a redução da umidade do lodo através da evaporação da água, e destaca-se dos demais métodos de secagem, visto que, segundo Svensson [15], promove a redução significativa do volume e o alcance correto da higienização, possibilitando a redução dos custos e riscos durante o transporte e manuseio, além de tornar o material apto para a produção de energia por processos de combustão, pirólise e gaseificação. No entanto, a secagem térmica é energointensiva, com consumos de energia que variam de 0,79 a 1,20 kWh/L de água removida, para a elevação do teor de sólidos totais de 25% para ao menos 90% [16]. De acordo com Svensson [15], a implementação da secagem térmica de lodo a partir da energia solar combinada com o uso do biogás pode ser uma alternativa sustentável para o futuro do gerenciamento do lodo sanitário.

Diante deste cenário, este trabalho apresenta um estudo da viabilidade técnico-econômica da geração de eletricidade usando motores a combustão interna acionados com gás de síntese produzido a partir da gaseificação de lodo sanitário seco. Considera-se que a secagem do lodo previamente desaguado (25% ST) ocorrem empregando-se energia heliotérmica em conjunto com a recuperação de calor dos gases de exaustão do motor de combustão interna.

A relevância desse trabalho se justificava ao se considerar que o aproveitamento energético do lodo sanitário está alinhado com seguintes Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU: i) ODS 6 - Água Potável e Saneamento: ao aproveitar energeticamente o lodo de esgoto, está se transformando um subproduto indesejado em uma fonte de energia renovável, e contribuindo para a gestão sustentável dos recursos hídricos, reduzindo a poluição da água, além de promover a eficiência no tratamento de águas residuais; ii) ODS 7 - Energia Limpa e Acessível: ao gerar energia a partir da biomassa produzida pelo tratamento do lodo de esgoto;

e iii) ODS 12 - Consumo e Produção Responsáveis: o aproveitamento energético do lodo sanitário se alinha com a meta de reduzir desperdícios e promover práticas de consumo e produção sustentáveis.

2. Materiais e métodos

Para atingir os objetivos do presente trabalho foi realizado o balanço energético do sistema integrado (secagem/ gaseificação/ geração de eletricidade), sendo utilizados os resultados obtidos por Peterli [17] referentes às características do lodo sanitário e ao campo solar, que fornece a energia térmica demandada pelo secador. Além disso, realizou-se a avaliação técnica da gaseificação de lodo sanitário seco usando ar como agentes de gaseificação, considerando-se o modelo de equilíbrio químico apresentado por Zainal et al. [18], o que permitiu avaliar a composição do gás de síntese em diferentes condições. Em seguida, modelou-se o sistema de cogeração utilizando-se o software GateCycle™, o que permitiu avaliar o potencial de geração de eletricidade e a recuperação de calor da exaustão do motor de combustão interna para complementar a demanda térmica do secador de lodo sanitário. O sistema considerado neste trabalho é apresentado na Figura 1.

2.1. Caracterização do Lodo Sanitário

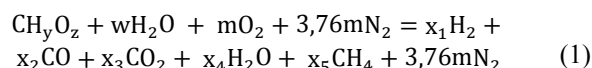
No presente estudo analisou-se amostras de lodo sanitário proveniente da etapa de centrifugação da ETE Mulembá I, localizada em Vitória, ES, Brasil. O lodo centrifugado, foi coletado e tratado em uma chapa aquecida e em um forno. O objetivo desse primeiro tratamento é produzir lodo seco para realizar a mistura com o lodo centrifugado e gerar um material com diferentes teores de sólidos totais (ST) para os ensaios de secagem térmica, visando caracterizar a demanda energética do processo.

Para a determinação das taxas de secagem foi utilizado o Analisador Termogravimétrico (TGA) do fabricante LECO, modelo 701. Para a análise elementar, as

amostras de lodo foram avaliadas em um analisador elementar PerkinElmer CHNS/O 2400 Series II, permitindo determinar assim as concentrações de carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre, com os teores de oxigênio estimados por diferença. O poder calorífico das amostras de lodo foi determinado utilizando-se uma bomba calorimétrica IKA, modelo C2000. Todos os experimentos para caracterização do lodo foram realizados nos laboratórios do NEST/UNIFEI.

2.2. Modelagem do Processo de Gaseificação

Para simular o processo de gaseificação de lodo seco, foi desenvolvido um código computacional baseado no trabalho apresentado por Zainal et al. [18], que propõem um modelo, baseado no princípio de equilíbrio químico, para simular gaseificadores *downdraft*. O modelo possibilita determinar a composição do gás de síntese produzido conhecendo-se a composição elementar do combustível (lodo) e estabelecendo a temperatura de gaseificação, sendo que se admite que todas as reações consideradas estão em equilíbrio termodinâmico. A reação global de gaseificação considerada é dada pela equação (1).



onde: w e m correspondem aos coeficientes estequiométricos da H_2O e do O_2 nos reagentes; x_1 , x_2 , x_3 , x_4 e x_5 são os coeficientes estequiométricos dos produtos; v e z corresponde à quantidade de hidrogênio e oxigênio, por mol de carbono no combustível. Ademais, as outras duas principais reações de gaseificação consideradas são:

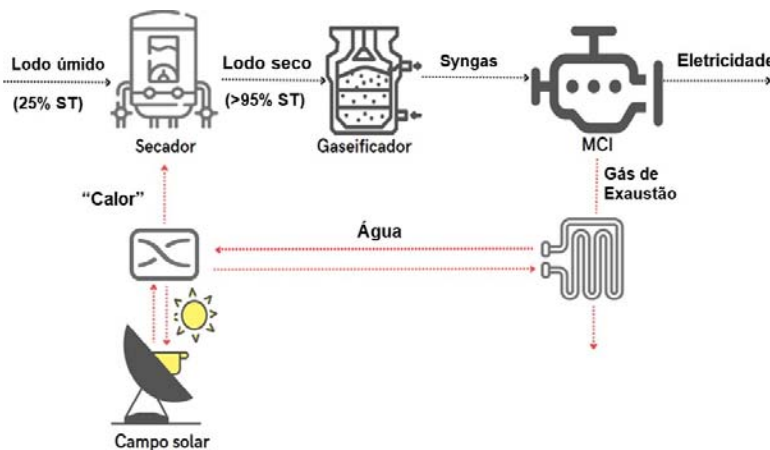


Figura 1. Esquema do sistema integrado proposto (secagem do lodo sanitário, gaseificação e cogeração de eletricidade).

Fonte: elaboração própria.

A constante de equilíbrio da reação da metanação (equação 2) e deslocamento da água (equação 3), são dadas por:

$$K_1 = \frac{x_5}{x_1^2} \quad (4)$$

$$K_2 = \frac{x_1 x_3}{x_2 x_3} \quad (5)$$

Utilizando-se a Primeira Lei da Termodinâmica e o princípio de minimização da energia livre de Gibbs (condição de equilíbrio), obtém-se um conjunto de equações não lineares, que necessita de solução numérica [18], sendo que neste trabalho utilizou-se um código computacional desenvolvido no EES (*Engineering Equation Solver*), o que também permitiu o cálculo direto das propriedades termodinâmicas necessárias a partir de sua biblioteca.

Ressalta-se que o código computacional desenvolvido foi validado por comparação entre os resultados obtidos com os reportados por [18], usando a mesma biomassa, sendo que o desvio relativo máximo na composição do gás foi de 4,8%.

2.3. Sistema Heliotérmico

A modelagem do sistema heliotérmico é realizada pelo balanço de energia entre o campo solar (produção) e a demanda energética do secador (aquecimento do ar de secagem), com base nas equações (6), (7) e (8).

$$A_{CS} = \frac{\Delta H_{sec}}{DNI \cdot \varepsilon} \quad (6)$$

$$\Delta H_{sec} = \dot{m}_{Lu} \bar{c}_{pLu} (T_{Lf} - T_{Li}) + \dot{m}_{a,ev} h_{lv} + \text{perdas} \quad (7)$$

$$\bar{c}_{pLu} = \frac{W}{W+1} \bar{c}_{pag} + \frac{1}{W+1} (1,434 + 3,29 T_L) \quad (8)$$

onde: ΔH_{sec} é a demanda térmica; \dot{m}_{Lu} é a vazão de lodo úmido, $\dot{m}_{a,ev}$ é a vazão de água removida no secador, T_{Li} e T_{Lf} são respectivamente a temperatura inicial e final do lodo, h_{lv} é o calor latente de vaporização da água, A_{CSP} é a área espelhada do campo solar; ε é a eficiência do campo solar (cilindro parabólico); e DNI é a irradiação solar normal horária.

2.4. Sistema de Cogeração

A modelagem do sistema de cogeração foi realizada utilizando o software GateCycle™, no qual foram inseridas as curvas características do motor, fornecidas por seu fabricante. O MCI selecionado foi o motor turboalimentado CATG132 da *Caterpillar Inc.*, cuja potência nominal é de 400 kW. O sistema é composto por um do motor à combustão interna turboalimentado, o qual queima gás de síntese produzido pela gaseificação do lodo seco (Figura 2). Os gases de exaustão do motor passam por um tocador de calor (HX1) no qual se aquece água até a temperatura de 120 °C (@ 5 bar), recuperando-se a energia dos gases de exaustão. Este fluxo se mistura com água proveniente do sistema heliotérmico (CSP1), e o fluxo resultante é utilizado para suprir a demanda térmica do secador de lodo, isto é, promove o aquecimento do ar utilizado na secagem. No modelo do GateCycle™, as demandas térmicas do secador são representadas pelo componente “DEM. SEC”, que é usado para impor fluxos de calor sobre correntes de fluidos. Ao deixar esse componente, o fluxo de água, na temperatura de 75 °C, se divide, parte retornando ao sistema heliotérmico e parte ao recuperador de calor dos gases de exaustão. A temperatura dos gases de exaustão do

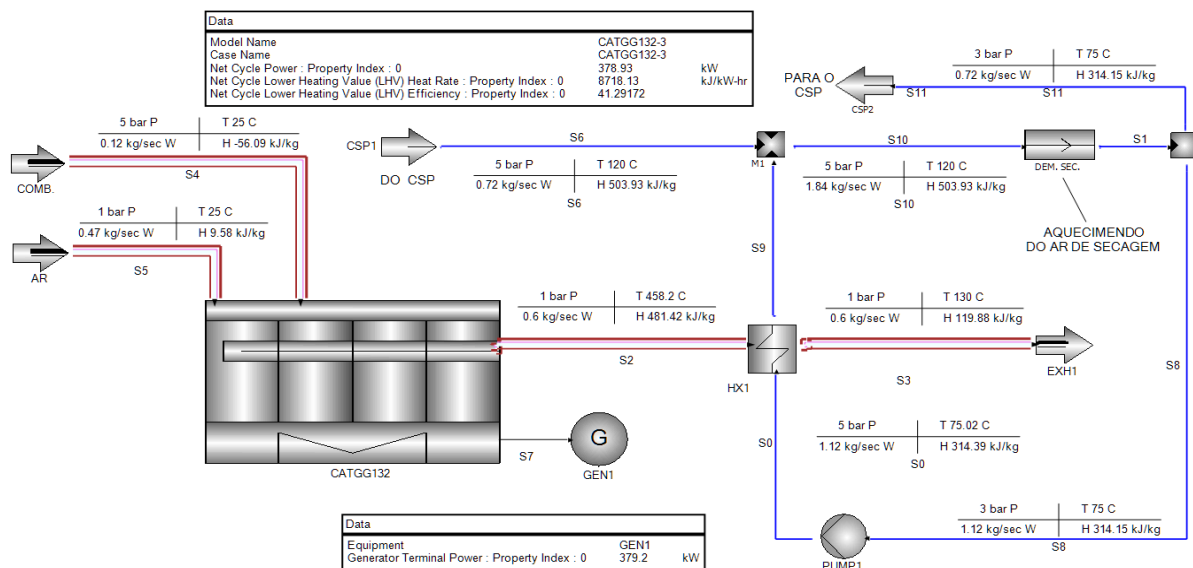


Figura 2. Modelo do sistema de cogeração elaborado no GateCycle™. Fonte: elaboração própria.

MCI, após passarem pelo trocador de calor (HX1), foi limitada a 135 °C, dado a possibilidade de existirem compostos sulfurados nos gases de exaustão.

2.5. Análise Econômica

Neste trabalho, para avaliar a viabilidade econômica do sistema proposto, os seguintes indicadores econômicos foram considerados: i) VPL (valor presente Líquido); ii) TIR (Taxa Interna de Retorno); iii) Tempo de retorno; e iv) LCOE (*Levelized Cost of Electricity*), que fornece informações do custo da eletricidade produzida, considerando toda a geração e custos ao longo da vida útil do projeto, sendo determinado pela equação (9).

$$LCOE = \sum_{t=1}^n \frac{I_t + O\&M_t + F_t}{\frac{EE_t}{(1+i)^t}} \quad (9)$$

onde I são os investimentos, O&M são os gastos com operação e manutenção (fixos e variáveis), F são os gastos com combustível, EE é a eletricidade gerada, t é o ano considerado, n é a vida útil, e i é a taxa de juros.

3. Resultados

Conforme mencionado, o lodo sanitário utilizado neste experimento é originário da ETE Mulembá I, localizada em Vitória (ES), sendo a produção de lodo ativado da mesma de 17.626 m³/dia.

A composição elementar e imediata do lodo coletado na ETE Mulembá I, são apresentadas na Tabela 1. Os valores da composição elementar obtidos neste trabalho mostram boa concordância com os dados apresentados por [19], com desvio relativo máximo de 10,1% para o oxigênio. Por sua vez, e o poder calorífico inferior obtido foi de 17,4 MJ/kg (0,06%w).

Tabela 1. Composição elementar e imediata do lodo ativado (teor de umidade de 0,06%).

Elementos	Este trabalho	Collard et al.	Comp.	%
%		[19]	imed.	
C	40,0±0,3	36,2	W	0,06
H	5,8±0,1	5,5	V	67,81
O	47,2±0,4	52,0	A	19,11
N	7,0±0,1	6,3	C	13,02
S	n.a.	n.a.		

Fonte: elaboração própria.

Em Vitória (ES), o ar atmosférico apresenta a média diária de temperatura de 23,2±3,6°C e UR de 82±12% com base no monitoramento da estação meteorológica A-612 do INMET, valores próximos dos reportados por Marchioro [20], que descrevem médias de 24,9°C de temperatura e 78% de UR para um monitoramento de maior extensão. Os dados de DNI obtidos da estação A-612 do INMET, são apresentados na Figura 3.

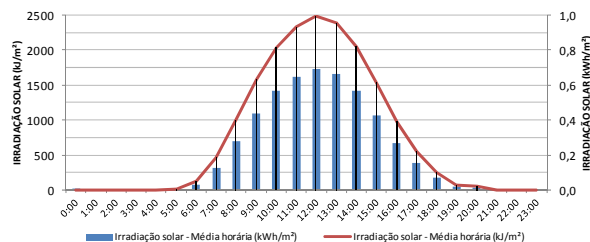


Figura 3. Perfil da DNI para Vitória/ES.

Fonte: Elaboração própria.

Com base na Figura 3, a DNI média é 4,96 kWh/m².dia, valor que está inserido na faixa de 4,6 a 5,1 kWh/m².dia para a Região Metropolitana de Vitória [21].

Como cenário de referência para as análises aqui apresentadas (cenário base), considera-se o processamento contínuo de 0,171 kg/s de lodo com 25% de ST visando obter lodo com 95% de ST, o que implica em vaporizar 0,126 kg/s de água no secador. Nestas condições, usando a equação (7), e admitindo que o lodo é aquecido de 25 °C até 85 °C [17], a demanda térmica de secagem resulta em 0,59 kWh/kg de lodo (25%ST), ou 0,81 kWh/kg de água removida. Este valor apresenta um desvio relativo de apenas 1,8% em relação ao limite inferior da faixa relatada por [16], que é 0,79 kWh/kg de água removida.

A Tabela 2 apresenta um resumo dos valores obtidos para as principais características do campo solar e secador, considerando que a energia térmica demandada é fornecida exclusivamente pelo campo solar, composto por coletores cilíndrico-parabólicos.

Tabela 2. Principais resultados obtidos para o sistema heliotérmico e secador térmico de lodo.

CAMPO SOLAR			
Área espelhada		3.260	m²
Produção de Energia		8.410	kWh/dia
SECADOR			
Entrada	Consumo de Energia	8.258	kWh/dia
	Vazão de lodo (25%ST)	17.626	m³/dia
Saída	Vazão total (lodo + água)	0,171	kg/s
	Vazão de lodo seco	0,043	kg/s
	Vazão água removida	0,126	kg/s

Fonte: elaboração própria.

Com relação ao processo de conversão termoquímica, utilizando o modelo de equilíbrio proposto por [18], considerando ar como agente de gaseificação, e tendo como base a composição do lodo apresentada na Tabela 1, determinou-se a temperatura de gaseificação e o poder calorífico inferior (PCI) do gás de síntese, para diferentes razões de equivalência (RE), conforme mostrado na Figura 4. De acordo com Sidek et al. [22], dado a baixa proporção de combustível em relação ao oxidante, o uso de REs inferiores a 0,20, do ponto de vista prático, pode levar a problemas de estabilidade e eficiência, portanto a análise considerou RE variando entre 0,25 a 0,40.

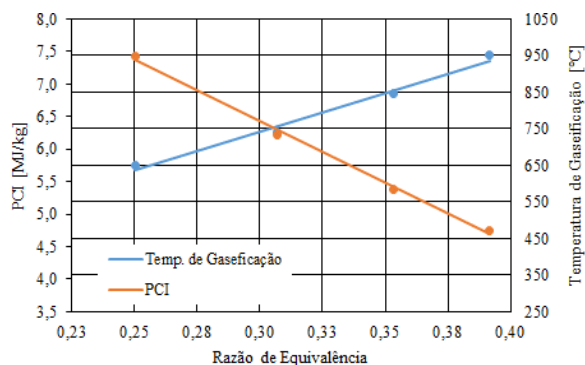


Figura 4. PCI e temperatura de gaseificação em função da razão de equivalência. Fonte: Elaboração própria.

A diminuição do PCI do *syngas* produzido com o aumento da RE (Figura 4) ocorre, pois, maiores REs implicam em mais oxigênio disponível, promovendo a oxidação das espécies combustíveis formadas. A maior liberação de energia (calor), acaba por aumentar a temperatura de gaseificação. A composição do gás, para as mesmas RE's é mostrada na Figura 5.

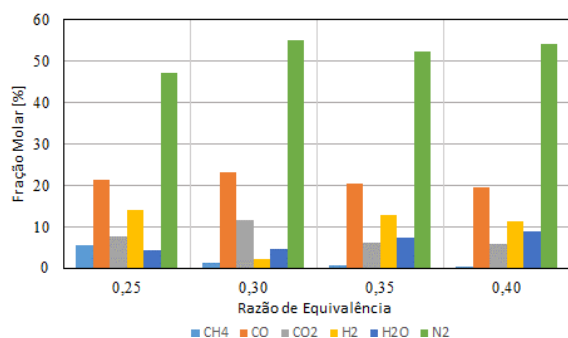


Figura 5. Composição do *syngas* produzido para diferentes valores de RE. Fonte: Elaboração própria.

Considerando a vazão de lodo seco apresentada na Tabela 2, foi determinada a vazão de *syngas* produzido durante a gaseificação.

Utilizou-se então o modelo do motor a combustão interna (MCI) desenvolvido no GateCycle™, para estimar o potencial de geração de eletricidade e de recuperação de energia (calor) dos gases de exaustão, mediante o aquecimento de água. Os resultados do sistema de cogeração são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados obtidos para o sistema de cogeração

Cenário	A	B	C	D
RE	0,25	0,31	0,35	0,40
Vazão de <i>syngas</i> [kg/s]	0,13	0,15	0,16	0,17
PCI do <i>syngas</i> [MJ/kg]	7,42	6,22	5,37	4,74
Potência Gerada Líq. [kW]	379,2	373,2	351,6	331,4
Eficiência do MCI [%]	41,3	41,1	40,9	40,5
Vazão de exaustão[kg/s]	0,597	0,587	0,556	0,526
Temp. exaustão [°C]	458,2	459,7	465,1	470,1
Vazão de água (coge) [kg/s]	1,13	1,11	1,07	1,04
Pot. térmica disponível [kW]	213,3	210,9	202,8	197,8

Fonte: elaboração própria.

Conhecendo-se a vazão e temperatura da água que deixa o sistema de cogeração, bem como a demanda térmica do secador (8.258 kWh/dia), conforme mostrado na Tabela 2, determinou-se então quanto desta demanda pode ser suprida pelo sistema de cogeração, bem como a nova área do campo solar, para as REs consideradas (cenários A, B, C e D), sendo que os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4.

Observa-se que o cenário que apresentou um melhor desempenho com o aproveitamento energético foi o A, visto que, a partir recuperação de calor dos gases exaustão, pode-se fornecer 5.120 kWh/dia de energia térmica ao secador, reduzindo a área do campo solar para 1209 m², o que corresponde a 33,2% da área necessário no caso base.

Tabela 4. Influência do aproveitamento energético no sistema de cogeração na área do campo solar

Cenário	A	B	C	D
Geração de Eletricidade [MWh/ano]	3154	3104	2925	2760
Energia térmica recuperada [kWh/dia]	5120	5063	4868	4747
Energia demandada do campo solar [kWh/dia]	3138	3347	3541	3662
Nova área do campo solar [m ²]	1209	1230	1308	1386
% da área original [%]	35,8	36,4	38,7	41,0

Fonte: elaboração própria.

A Figura 6 mostra a geração anual de eletricidade ao longo da vida útil do projeto, considerando uma perda de eficiência anual dos sistemas de geração de energia por meio da gaseificação de 0,35% a.a. [23]. No primeiro ano do projeto a energia gerada é de 3.154.391 kWh/ano e no final da vida útil, a geração cai para 2.899.818 kWh/ano.

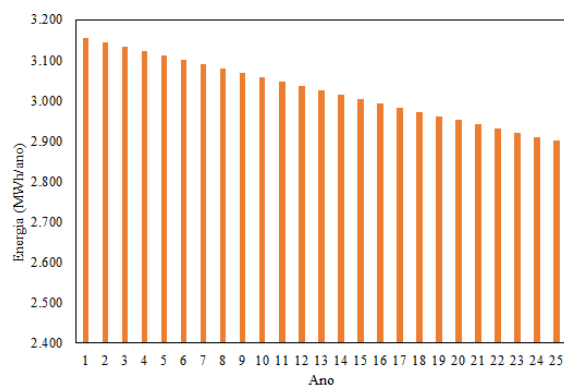


Figura 6. Geração anual de eletricidade ao longo da vida útil do sistema proposto. Fonte: Elaboração própria.

A partir dos resultados obtidos, selecionou-se o cenário A para avaliação econômica, pois apresenta o maior potencial de geração de eletricidade e resulta na menor área do campo solar. Os parâmetros considerados para

na análise econômica são apresentados na Tabela 5. A taxa mínima da atratividade (TMA) utilizada está baseada na taxa SELIC de março de 2024 [24].

Tabela 5. Parâmetros utilizados na análise econômica

Parâmetros	Valor	Unidade
Degradação da eficiência do sistema gaseificação	0,35 ¹	% a.a.
Disponibilidade do sistema	95,0	%
Vida útil	25	anos
Taxa de Manutenção e Operação	2,0 ²	% a.a.
Taxa de Administração	0,5 ²	% a.a.
Taxa de juros	10,0 ³	% a.a.
TMA	10,75	% a.a.

Fonte: adaptado de [23]¹, [25]², [26]³.

Para estimar o custo dos equipamentos foram utilizados dados obtidos na literatura. De acordo com Lourinho et al. [27], o custo específico de sistemas de cogeração, compostos por “gaseificador de biomassa + MCI + caldeira de recuperação”, varia de 3.900,00 US\$/kWe (planta de 850 kWe), até 5.450,00 US\$/kWe (planta de 450 kWe). Assim, neste trabalho, considerou-se o valor de 5.000,00 US\$/kWe.

O custo do campo solar foi calculado com base no trabalho de Schuknecht et al. [28], que indicaram uma faixa de valores de 100,00 a 150 US\$/m².

Para determinar o custo do secador, considerou-se o trabalho Tańczuk et al. [29] que estabelece o custo de US\$44.700,00 para um secador capaz de processar 0,50 ton/h de lodo úmido. Como a capacidade do secador deste trabalho é de 0,60 ton/h, o custo do mesmo foi ajustado, de forma simplificada, considerando-se que o mesmo varia de forma linear com a capacidade.

A Tabela 6 mostra um resumo das componentes de custo inicial do sistema proposto, para o cenário A.

Tabela 6. Componentes do custo inicial (CAPEX) do projeto

Equipamentos	Custo
Gaseificador + MCI	R\$ 9.854.000,00
Secador	R\$ 251.435,29
Campo solar	R\$ 785.850,00
BOP (7,5%)	R\$ 816.846,40
Sub-total	R\$ 11.708.131,69
Obras (adm.) (5,0%)	R\$ 585.406,58
Engenharia (2,5%)	R\$ 292.703,29
Total	R\$ 12.586.241,57

BOP (balance of plant): auxiliares

1US\$ = 5,192 R\$

Fonte: elaboração própria.

Em termos da tarifa de comercialização da energia elétrica gerada, utilizou-se uma faixa que considera os valores praticados em leilões da ANEEL [30] para

energia produzida a partir de diferentes biomassas, sendo 0,35 R\$/kWh (cana-de-açúcar) a 0,65 R\$/kWh (resíduo sólido urbano). Assim, considerou-se o limite inferior e o superior da faixa formada por estes valores, bem como um valor intermediário (0,50 R\$/kWh).

Com base nos valores descritos anteriormente foram elaborados fluxos de caixa do projeto e, com estes, foram calculados os indicadores econômicos (VPL, TIR e payback), cujos resultados são apresentados na Tabela 7. Para tarifas de 0,35 e 0,50 R\$/kWh o projeto não se mostrou viável. Os melhores indicadores econômicos são obtidos quando a tarifa de eletricidade corresponde a 0,65 R\$/kWh, apresentando VPL positivo, TIR maior do que a TMA e tempo de payback, dentro da vida útil do projeto.

Tabela 7. Resultados da Análise Econômica

Tarifa de E.E. R\$/kWh	VPL R\$	TIR %	Payback anos
0,35	- 5.677.264,90	3,3	-
0,50	- 1.492.212,56	8,39	-
0,65	2.692.839,78	12,8	14,16

Fonte: elaboração própria

O LCOE obtido, considerando as condições apresentadas para o cenário A, foi de 0,58 R\$/kWh, valor que está dentro da faixa de preços de venda de energia de outras biomassas em leilões da ANEEL, se aproximando do preço de proposto para energia produzida a partir de RSU [30].

Por último foi avaliada a influência do preço de venda energia elétrica e do CAPEX sobre os indicadores econômicos VPV e TIR do sistema proposto. Para a energia elétrica considerou-se a faixa de valores usada anteriormente, com o limite superior sendo aumentado em 20%, o que resulta 0,80 R\$/kWh. Já para o CAPEX considerou-se uma variação de $\pm 20\%$ em relação ao valor de referência calculado para o cenário A (vide Tabela 6).

Os resultados desta análise de sensibilidade são apresentados na Figura 7 para o VPL e na Figura 8 para a TIR.

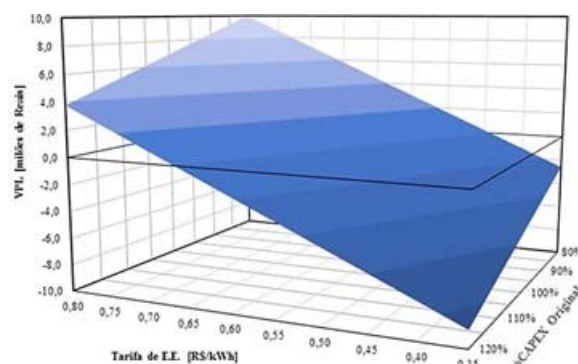


Figura 7. VPV em função da tarifa de eletricidade e da %CAPEX original. Fonte: elaboração própria.

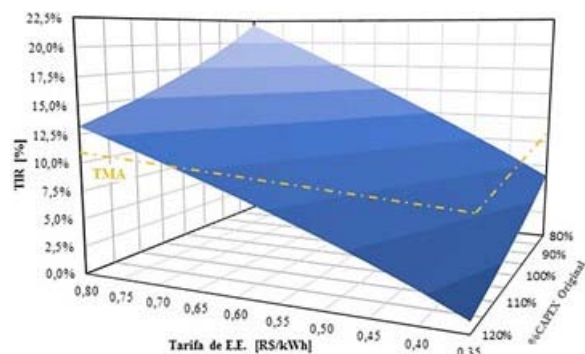


Figura 8. TIR em função da tarifa de eletricidade e da %CAPEX original. Fonte: elaboração própria.

A análise das Figuras 7 e 8, releva que se o CAPEX aumenta em 20% o sistema começa a apresentar indicadores positivos ($VPL > 0$ e $TIR > TMA$) somente quando a eletricidade for comercializada a 0,685 R\$/kWh, valor superior ao utilizado com referência para o RSU. Por outro lado, se o CAPEX é reduzido em 20%, os indicadores econômicos começam a ser favoráveis quando o preço da eletricidade comercializada é superior a 0,443 R\$/kWh.

4. Conclusões

O presente trabalho avaliou a viabilidade técnico-econômica de um sistema para geração de eletricidade a partir do gás de síntese produzido na gaseificação de lodo sanitário seco. Para suprir a demanda térmica do secador, considerou o uso combinado de energia solar térmica e da recuperação de calor do motor de combustão interna usado para geração de eletricidade. Verificou-se que a composição do lodo de esgoto utilizado nos experimentos se aproxima dos valores reportados por outros autores. Ao submeter o lodo seco a um processo de gaseificação, usando ar como agente de gaseificação, obteve-se um gás de síntese com PCI de 7,42 MJ/kg, quando a RE é de 0,25. Este valor de PCI possibilita a utilização do gás para geração de eletricidade, mediante sua queima em motores de combustão interna.

Ao queimar o gás de síntese em um motor de combustão interna, a potência elétrica obtida foi de 379,2 kW. Além disso, foi possível recuperar 55.120 kWh/dia energia térmica dos gases de exaustão do motor. Observou-se que a energia recuperada dos gases de exaustão é insuficiente para suprir as demandas térmicas do secador de lodo. No entanto, considerando-se um sistema híbrido, no qual se usa energia solar captada em coletores cilíndrico parabólicos, pode-se atender adequadamente a demanda térmica do coletor. Porém, o aproveitamento energético dos gases de exaustão permitiu reduzir a área espelhada do campo solar para 35,8% do valor necessário, caso as demandas elétricas do secador fossem supridas exclusivamente com energia heliotérmica. Ressalta-se que no caso de secagem ser realizada somente a partir da energia heliotérmica, sem o uso energético do lodo, se estaria

negligenciando uma receita importante: a comercialização de eletricidade.

A análise econômica permitiu verificar que o cenário no qual se considera o uso do lodo para geração de eletricidade em um sistema de cogeração, com aproveitamento energético dos gases de exaustão para suprir parcialmente as demandas do secador de lodo, também pode ser uma opção viável do ponto de vista econômico. Para as condições avaliadas e considerando o preço de venda da eletricidade de 0,56 R\$/kWh, o sistema apresentou VPL positivo (R\$2.692.839,78) TIR (14,6%) superior a TMA adotada (11,75%), e tempo de retorno de 12,8 anos (inferir a vida útil do empreendimento). Além disso, o LCOE obtido para esse cenário foi de 0,58 R\$/kWh, próximo ao valor estabelecido pela ANEEL para a venda de eletricidade gerada a partir de RSU (0,65R\$/kWh). Embora estes indicadores econômicos possam parecer modestos, a análise de sensibilidade mostrou que é possível obter melhores desempenhos econômicos, sendo que uma das possibilidades seria fornecer incentivos tarifários para comercialização da eletricidade gerada a partir deste resíduo (lodo) ou para a aquisição e instalação do sistema proposto (coletores solares, sistema de cogeração, etc.), bem como incentivos ao desenvolvimento da indústria nacional, visando redução de custos de produção dos componentes deste sistema.

Por último ressalta-se que o sistema proposto permite dar um valor agregado a um resíduo cujo volume de produção tende a aumentar nos próximos anos, e cujos métodos tradicionais de disposição são custosos e nem sempre bem aceitos pela sociedade.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro para realização do projeto que deu origem a este trabalho.

6. Referências

- [1] R. Chen, Q. Sheng, X Dai. "Upgrading of sewage sludge by low-temperature pyrolysis: fuel properties and behavior". Fuel, v. 300, p. 121007, 2021.
- [2] IEA. World Energy Outlook 2023. International Energy Agency, 2023.
- [3] ANEEL. Sistema de Informação da Geração da ANEEL. 2023, Disponível em: <https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/siga>
- [4] EPE. Balanço Energético Nacional. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2023>.

- [5] World Health Organization. Sanitation. 2024. Disponível em: 2024<<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/sanitation>.
- [6] Agência Senado. Situação do Saneamento Básico Ainda é “Catastrófica” no Brasil. 2023. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/materias/2023/1/16/situacao-do-saneamento-basico>
- [7] L. N. B Menezes. “Proposta de gerenciamento de lodos de esgotos por processo termoquímico”. 2022.
- [8] L. A. Gomes. Aproveitamento do lodo gerado em estações de tratamento de esgoto e a relação com o meio ambiente. Dissertação, UFMG. 2019.
- [9] A. Ding. “Life cycle assessment of sewage sludge treatment and disposal based on nutrient and energy recovery”. *Science of the Total Environment*, v. 769, p. 144451, 2021.
- [10] A. G. Capodaglio. “Biorefinery of sewage sludge: overview of possible value-added products and applicable process”. *Water*, v. 15, n. 6, p. 1195, 2023.
- [11] R. E. Miki. “Biometano produzido a partir de biogás de ETEs e seu uso combustível veicular”. *Revista DAE*, v. 66, n. 209, 2018.
- [12] V. Singh, H. C., M. K. Chandel. “Estimation of energy recovery potential of sewage sludge in India”. *Journal of Cleaner Production*, v. 276, p. 122538, 2020.
- [13] U. Lee, J. Dong, J. Chung. “Experimental investigation of sewage sludge solid waste conversion to syngas using high temperature gasification”. *Energy Conv. and Management*, v. 158, p. 430–436, 2018.
- [14] A. G. Capodaglio, A. Callegari. “Energy and resources recovery from excess sewage sludge”, *Conserv. & Recycling Advances*, 19, p. 200184, 2023.
- [15] I. Svenson. “Using solar thermal energy in the sludge drying process of a wastewater treatment plant a case study of Kattastrand”. Sweden. 2021.
- [16] C. Baresel, M. Lüdtkke. “Slamtorkning som en del av slamhantering vid Syvab Himmerfjärdsverket.” 2017. Disponível em: <https://www.diva-portal.org/sma/sh/record.jsf>
- [17] Z. Peterli. Avaliação energética e experimental da secagem em baixa temperatura de lodo sanitário com o uso de energia heliotérmica. UNIFEI. 2019.
- [18] Z. A. Zainal, et al. “Prediction of performance of a downdraft gasifier using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy Conversion and Management*, v. 42, n. 12, p. 1499–1515, 2001.
- [19] M. Collard, B. Teychené, L. Lemée. “Comparison of three different wastewater sludge and their respective drying processes”. *Journal of Environmental Management*, v. 203, p. 760-767, 2017.
- [20] E. Marchioro. “A Incidência de Frentes Frias no Município de Vitória (ES)”. *Revista ACTA Geografia*, pp. 49-60, 2012
- [21] ASPE. A energia solar no Espírito Santo. Vitória, Espírito Santo. 2013, 120 p.
- [22] F. N. Sidek, N. A., Samad. “Review on effects of gasifying agents, temperature and equivalence ratio in biomass gasification process”. *IOP Conference Series*, 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/863/1/012028/>
- [23] F. C. Luz. Avaliação Técnico-Econômica de Plantas de Gaseificação do Lixo Urbano para Geração Distribuída de Eletricidade. UNIFEI, 2013.
- [24] BACEN. Taxas de Juros Básicas. Banco Central Brasileiro. 2024. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>
- [25] REA. “Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series - Biomass for Power Generation”. Disponível em: www.irena.org/publications.
- [26] M. C. Marsiglia. “Projeto conceitual de uma planta industrial de geração de eletricidade a partir de CDR”. 2019.
- [27] G. Lourinho et al. “costs of gasif. technologies for energy and fuel production: Overview, Analysis, and Numerical Estimation”. *Recycling* 2023, 8, 49, 2023.
- [28] N. Schuknecht, J. Mcdaniel, H. Filas, “Achiev. of the \$100/m² parabolic trough”. *AIP Conference*, 2018. Disponível em: <https://pubs.aip.org/ip/acp/article/2033/1/030019/1023297>.
- [29] M. Tańczuk, M.; W. Kostowski, M. Karaś, M. “Applying waste heat recovery system in a sewage sludge dryer”. *Energy Conversion and Management*, v. 125, p. 121–132, 2016.
- [30] ANEEL. Edital do Leilão nº 42022. ANEEL. 2022.