

Estudo da viabilidade econômica para produção de biogás gerado nas estações de tratamento de esgoto no município de Poços de Caldas

Economic feasibility study for the production of biogas generated in sewage treatment stations in the municipality of Poços de Caldas

Estudio de viabilidad económica para la producción de biogas generado en estaciones de tratamiento de aguas residuales del municipio de Poços de Caldas

Recebido: 22/11/2021 | Revisado: 02/12/2021 | Aceito: 07/12/2021 | Publicado: 15/12/2021

João Marcos Dos Reis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1677-4508>
Universidade Federal de Alfenas, Brasil
E-mail: eng.jmarcosreis@gmail.com

Ana Beatriz Carvalho Terra

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1912-0059>
Universidade José do Rosário Vellano, Brasil
E-mail: anabeatriz.terra@hotmail.com

Daniel Fontes Moreira Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6155-8564>
Universidade Federal de Sergipe, Brasil
E-mail: danielmfl@academico.ufs.br

Rafael de Oliveira Tiezzi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8682-7807>
Universidade Federal de Alfenas, Brasil
E-mail: rafael.tiezzi@unifal-mg.edu.br

Rafael Brito de Moura

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0273-5663>
Universidade Federal de Alfenas, Brasil
E-mail: rafael.moura@unifal-mg.edu.br

Resumo

O tratamento e reutilização de efluentes tem ganhado destaque nas pesquisas científicas, visando a redução de impactos ambientais, soluções associadas à escassez de recursos hídricos e produção de energia (biogás) como alternativa aos combustíveis fósseis. O objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de produção de metano e geração de energia no tratamento de esgoto do município de Poços de Caldas (MG), comparando os indicadores econômicos do custo de implantação de uma usina de geração de energia nesses estabelecimentos. Foram selecionadas três Estações de Tratamento de Esgoto (ETE), sendo que duas possuem reator UASB e uma é composta por um sistema compacto, onde as etapas anaeróbicas e aeróbicas ocorrem no mesmo reator. As amostras do afluente e do efluente foram caracterizadas nos laboratórios do DMAE (ETE 1) e Qualin Serviços LTDA (ETE 2 e 3). Os parâmetros avaliados, através do software probio 1.0, foram a produção de biogás e seu potencial energético, análise técnica-econômica dos custos de implantação de uma usina de geração de energia, custos de investimento e operação, análise energética e a viabilidade econômica. Conclui-se então que, apenas a ETE 1 apresenta viabilidade para instalação de usina de energia a partir do biogás gerado pelo tratamento de esgoto, considerando a sua capacidade de produção energética e o tempo de retorno de investimento.

Palavras-chave: Esgoto sanitário; Produção energética; Sustentabilidade.

Abstract

The treatment and reuse of effluents have gained prominence in scientific research. Therefore, reducing environmental impacts, solutions associated with the scarcity of water resources, and energy production (biogas) as an alternative to fossil fuels. The objective of this work was to evaluate the potential of methane production and energy generation in the sewage treatment in the city of Poços de Caldas (MG), comparing the economic indicators of the cost of implementing an energy generation plant in these establishments. Three Sewage Treatment Plants (ETE) were selected. The Córrego D'antas and Contorno have a UASB reactor, while Bortolan is composed of a compact system, where the aerobic and anaerobic parts occur in the same reactor. The influent and effluent samples were characterized in the laboratories of DMAE (ETE 1) and Qualin Serviços LTDA (ETE 2 and 3). The parameters evaluated, using the Probio 1.0 software, were the production of biogas and its energy potential, technical-economic analysis of the costs

of implementing a power generation plant, investment and operation costs, energy analysis, and economic feasibility. Therefore, it is concluded that only ETE 1 is viable for installing a power plant from biogas generated by sewage treatment, considering its energy production capacity and the return-on-investment time.

Keywords: Energy production; Sanitary sewage; Sustainability.

Resumen

El tratamiento y reutilización de efluentes ha ganado protagonismo en la investigación científica, orientada a la reducción de impactos ambientales, soluciones asociadas a la escasez de recursos hídricos y producción de energía (biogás) como alternativa a los combustibles fósiles. El objetivo de este trabajo fue evaluar el potencial de producción de metano y generación de energía en el tratamiento de aguas residuales en la ciudad de Poços de Caldas (MG), comparando los indicadores económicos del costo de implementación de una planta de generación eléctrica en estos establecimientos. Se seleccionaron tres Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (STP), dos de las cuales cuentan con un reactor UASB y una está compuesta por un sistema compacto, donde las etapas anaeróbicas y aeróbicas se llevan a cabo en el mismo reactor. Las muestras de afluentes y efluentes se caracterizaron en los laboratorios de DMAE (ETE 1) y Qualin Serviços LTDA (ETE 2 y 3). Los parámetros evaluados, utilizando el software probio 1.0, fueron la producción de biogás y su potencial energético, análisis técnico-económico de los costos de implementación de una planta de generación eléctrica, costos de inversión y operación, análisis energético y factibilidad económica. Por tanto, se concluye que solo ETE 1 es viable para instalar una central eléctrica a partir de biogás generado por el tratamiento de aguas residuales, considerando su capacidad de producción de energía y el retorno de la inversión.

Palabras clave: Aguas residuales sanitarias; Producción de energía; Sustentabilidad.

1. Introdução

Diante do aumento da população mundial e a crescente demanda por alimentos e água, associados à intensificação da urbanização, o tratamento e reutilização de efluentes tem ganhado destaque nas pesquisas científicas visando a busca por soluções para reduzir os impactos ambientais e os problemas associados à escassez de recursos hídricos. Segundo Calijuri & Cunha (2013), todo produto gerado em instalações hidráulico-sanitárias é denominado por esgoto sanitário, sendo caracterizado por ter em sua composição o predomínio de matéria orgânica, além de nutrientes como o fósforo e nitrogênio, microrganismos patogênicos e outros componentes com potencial tóxico, como é o caso dos fármacos.

Sendo assim, as Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) são fundamentais para garantir que a água descartada apresente parâmetros adequados e dentro das normas estabelecidas pela legislação vigente (Resolução do CONAMA nº 430/2011 e Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº1/2008), de forma que não haja prejuízos à saúde humana e ao ambiente.

Segundo o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), aproximadamente 43% de todo esgoto produzido no Brasil em 2015 foi tratado (SNIS, 2017). Grande parte desses resíduos são tratados em reatores de digestão anaeróbica de fluxo ascendente e manta de lodo, denominados de reatores de UASB (Gomes *et al.*, 2017), sendo o lodo e o biogás os dois subprodutos principais gerados durante o processo (Amaral *et al.*, 2019).

Diante desse cenário, surge a possibilidade de exploração do potencial energético das ETEs através do uso do biogás como fonte primária de energia. A European Commission (2001) destaca que o uso de biogás para fins energéticos é uma forma promissora para reduzir a emissão de gases causadores do efeito estufa. Dessa forma, é observado que essa pode ser uma alternativa para minimizar os impactos ambientais, maximizar a eficiência energética e reduzir gastos, constituindo assim um processo sustentável de produção de energia.

Nesse sentido, o objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de produção de metano e geração de energia no tratamento do esgoto no município de Poços De Caldas (MG), comparando os indicadores econômicos do custo de implantação de uma usina de geração de energia nesses estabelecimentos.

2. Metodologia

O estudo foi realizado no município de Poços de Caldas (MG), sendo considerado o 15º mais populoso do estado com 166.085 habitantes (IBGE, 2017). Para a implantação da metodologia apresentada foram utilizados os resultados da

caracterização físico-química de amostras obtidas pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE), onde foi verificado três estações de tratamento de esgoto (ETE) em funcionamento. As análises dos esgotos foram realizadas no laboratório do DMAE para a ETE 1 e na QUALIN SERVIÇOS LTDA – ME para as demais ETES. As informações referentes à localização, tipo de reator utilizado e aos dados de vazão de cada estação de tratamento de esgoto estão dispostas na Tabela 1.

Para os dados de demanda química de oxigênio (DQO) foi feito uma regressão linear pelo método dos mínimos quadrados utilizando o software EXCEL. A pesquisa foi dividida em duas seções, a primeira através de uma modelagem de produção de biogás e energia elétrica e a segunda composta pelas análises técnica-econômicas de custo de implantação de uma usina de geração de energia.

Tabela 1: Caracterização das Estações de Tratamento de Esgoto avaliadas.

	Coordenada Geográfica	Reator	Vazão Média e Máxima
ETE 1 – Córrego D’Antas	UTMs 21°44’56’’S, 46°36’09’’	UASB	Vazão média: 270 L.s ⁻¹ Vazão máx: 350 L.s ⁻¹
ETE 2 – Rodovia do Contorno	UTMs 21°50’06’’S, 46°36’02’’O	UASB	Vazão média: 66,88 L.s ⁻¹ Vazão máx: 106,1 L.s ⁻¹
ETE 3 – Bortolan	UTMs 21°46’42’’S, 46°37’35’’O.	Tratamento preliminar (Peneira rotativa, duas caixas de areia e calha parshall) e Tratamento secundário (reator Ubox)	

Fonte: Autores (2021).

A estimativa de produção de biogás e da potência energética foi realizada através dos dados de entrada dos valores médios da concentração de DQO total afluente em mg. L⁻¹ e da vazão média (Q_{méd}) em m³. dia⁻¹. Para isso, foi utilizado o software ProBio 1.0. A modelagem matemática utilizada pelo software, foi proposta por Lobato (2011), que além dos dados de entrada citados acima, considera também a população contribuinte em número de habitantes (Pop) e de esgoto por habitante (QPC) em mg/L. São verificados ainda a concentração de SO₄ (CSO₄) em mg/L, eficiência de remoção de DQO (EDQO) e de redução de SO₄ (ESO₄) em porcentagem.

O sistema permite que sejam calculados também os coeficientes de produção de lodo (Y) em kgSV/kgDQOrem e de DQO-LODO (Ksólidos) em kgDQO-LODO/kgDQOrem, temperatura operacional do reator (T) em graus celsius, fator de supersaturação de CH₄ na fase líquida (Fs), perda de CH₄ na fase gasosa com o gás residual (pw) em porcentagem e outras perdas de CH₄ na fase gasosa (po). Além disso, foram adotadas as seguintes constantes: Constante universal dos gases (R) – 0,08206 atm.L/mol.k; DQO correspondente a um mol de CH₄ (KDQO) – 64 gDQO/mol; DQO utilizada na redução de sulfato – 0,667gDQO/gSO₄; poder calorífico decorrente da combustão do metano – 9,9 kWh/Nm³.

A modelagem ainda estima três cenários: conservador, típico e otimista. para a determinação desses cenários de produção, o programa apresenta parâmetros a serem assumidos de acordo com o cenário escolhido, conforme descrito pelo Quadro 1. Por fim, foi calculado a potência elétrica disponível nos sistemas de acordo com Valente (2015). Para facilitar na escolha do motor-gerador e o contato com fornecedores, foi determinado um rendimento típico de 38% (Brasil, 2015a).

Quadro 1: Parâmetros de cálculo de estimativa de produção de biogás, de acordo com o cenário.

Parâmetro	Unidade	Cenário conservador	Cenário típico	Cenário otimista
Concentração de SO ₄ no afluente (CSO ₄)	mg. L ⁻¹	20	15	10
Eficiência de remoção de DQO (EDQO)	%	60	65	70
Eficiência de redução de SO ₄ (ESO ₄)	%	80	75	70
Coef. de produção de lodo (Y)	kgSV/kgDQOrem	0,15	0,15	0,15
Coef. de produção DQO-lodo (Ksólidos)	kgDQO-lodo/kgDQOrem	0,213	0,213	0,213
Temperatura operacional reator (T)	°C	25	25	25
Fator de supersaturação de CH ₄ na fase líquida (Fs)	-	1,7	1,35	1
Perda de CH ₄ na fase gasosa com o gás residual (pw)	%	7,5	5	2,5
Outras perdas de CH ₄ na fase gasosa (po)	%	7,5	5	2,5

Fonte: Adaptado ProBio (2015).

Para o estudo da viabilidade econômica e análise de custos, foi feito um orçamento no dia 01/06/2021 com a empresa ERBR. De acordo com a ERBR, não foi encontrado um sistema compatível e viável para a ETE 3 (Bortolan), pois o potencial gerado do biogás não satisfaz o consumo do moto-gerador, o que inviabilizaria todo o sistema. Dessa forma, foram feitas as análises econômicas, portanto, das ETEs 1 (Córrego D'Antas), e 2 (Rodovia do contorno), no qual a ERBR apresentou um orçamento. O estudo de viabilidade econômica do sistema proposto iniciou com o levantamento dos custos de implantação (CAPEX – Capital Expenditure), e de operação e manutenção (OPEX – Operation Expenditure).

A partir da estimativa de potência elétrica disponível, concentração de metano no biogás, produção normalizada de biogás e carga atual instalada em cada unidade de tratamento de esgoto, foi simulado pela ERBR o funcionamento de motor-geradores em diferentes regimes de trabalho. Assim, foram dimensionados aqueles equipamentos que produziram o máximo de energia com a melhor relação custo-benefício. Para parâmetros envolvendo os consumos de energia elétrica de cada ETE, utilizou-se os Relatórios de Contas de Energia Elétrica por Unidade Consumidora disponibilizada pelo (DMAE, 2021), os quais apresentam valores de consumo médio entre os meses de janeiro de 2021 e junho de 2021. Optou-se por utilizar apenas os últimos 6 meses, por representarem mais fielmente as condições atuais das ETE's.

O saldo energético mensal foi calculado, então, pela diferença entre a média do consumo mensal de energia de cada ETE e sua produção mensal de biogás. Enquanto o autossuprimento é dado pela relação entre produção e consumo de energia em cada unidade consumidora. Finalmente, para calcular os custos envolvidos nesta análise, utilizou-se valores de tarifa do mês de junho de 2021 (DME, 2021) na classificação B3-Demais Classes (Comercial, Industrial e Outros) de T=0,52554 R\$/kWh. Dessa forma, o custo mensal médio atual com consumo de energia elétrica foi calculado para cada unidade com dados disponibilizados pelo DMAE, e assim calculado a economia mensal após o aproveitamento energético de biogás

Por fim, para a verificação da viabilidade econômica dos sistemas de aproveitamento de biogás, montou-se um fluxo de caixa para cada ETE, contabilizando o consumo, custos, despesas e a produção sem levar em conta a inflação durante o tempo de retorno. Com o auxílio do software excel, foi montado uma Tabela com o tempo de retorno do investimento de cada estação de tratamento.

3. Resultados e Discussão

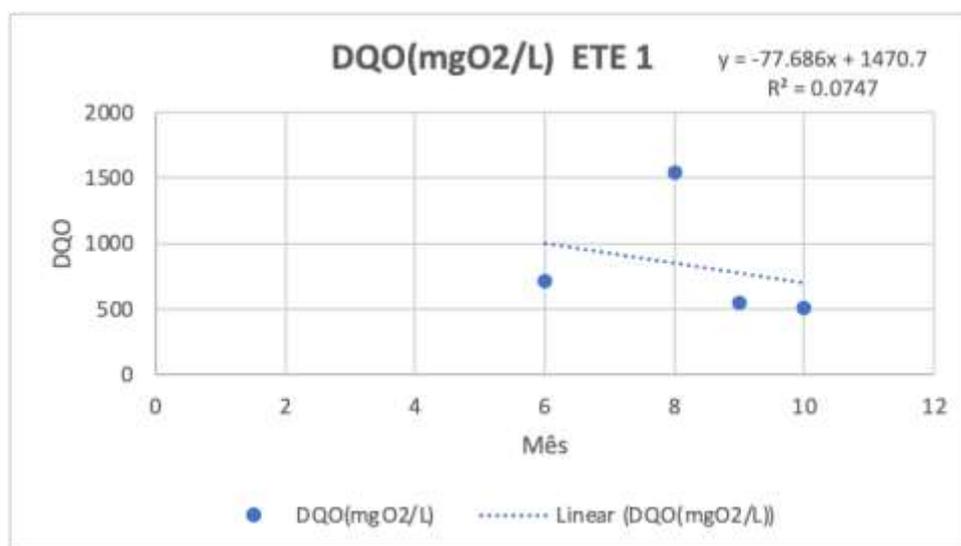
A média dos resultados de cada ETE em relação aos parâmetros físicos e químicos estão dispostos na tabela 2. O gráfico 1 indica o ajuste linear dos valores de DQO para a ETE 1, sendo determinado para o mês de julho o valor de 926,86 mgO₂.L⁻¹, porém, em favor da segurança foi utilizado a média de 829,75 mgO₂.L⁻¹ como parâmetro de entrada. Para a ETE 2, esses valores foram calculados para o mês de abril, resultando em 443,70 mgO₂.L⁻¹ (Gráfico 2). Por fim, a ETE 3 para o mês de abril resultou em 656,15 mgO₂.L⁻¹, no entanto, como esse valor está abaixo da média encontrada de 676,15 mgO₂.L⁻¹, o último valor foi considerado como parâmetro de entrada em favor da segurança (Gráfico 3). É possível perceber que a ETE 1 apresenta uma vazão superior as demais e, conseqüentemente, uma maior carga de DQO.

Tabela 2: Parâmetros físicos e químicos de entrada de esgoto bruto nas estações de tratamento de esgoto.

PARÂMETROS	UNIDADE	RESULTADO ETE 1	RESULTADO ETE 2	RESULTADO ETE 3
Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO	mgO ₂ .L ⁻¹	554,7	174,93	408,86
Demanda Química de Oxigênio - DQO	mgO ₂ .L ⁻¹	829,75	443,70	676,15
Sólidos Sedimentáveis	mL. L ⁻¹	10,5	62	2,25
Sólidos em Suspensão	mL. L ⁻¹	510,35	-	-
Nitrogênio Total	mgN. L ⁻¹	42	-	-
Fósforo Total	mgP. L ⁻¹	2,6	-	-
Vazão Média	L/s e m ³ /dia	270 e 2332,8	66,88 e 5778,43	22,2 e 1918,08
Vazão Máxima	L/s e m ³ /dia	350 e 3024,0	106,1 e 9167,04	30,55 e 2639,5

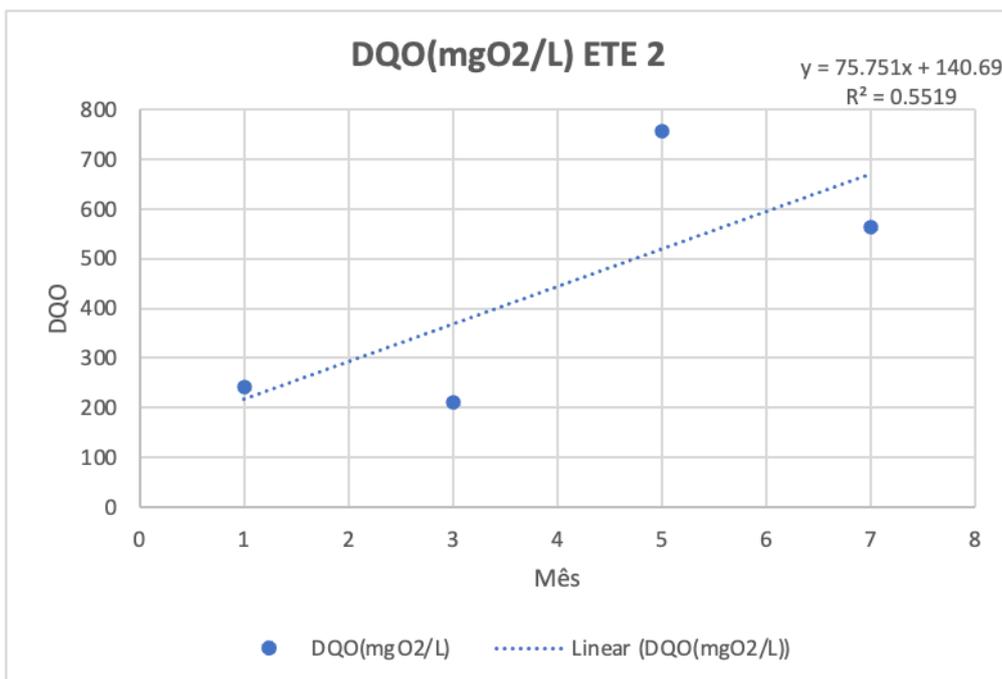
Fonte: Autores (2021).

Gráfico 1: Análise estatística por mínimos quadrados de DQO da ETE 1.



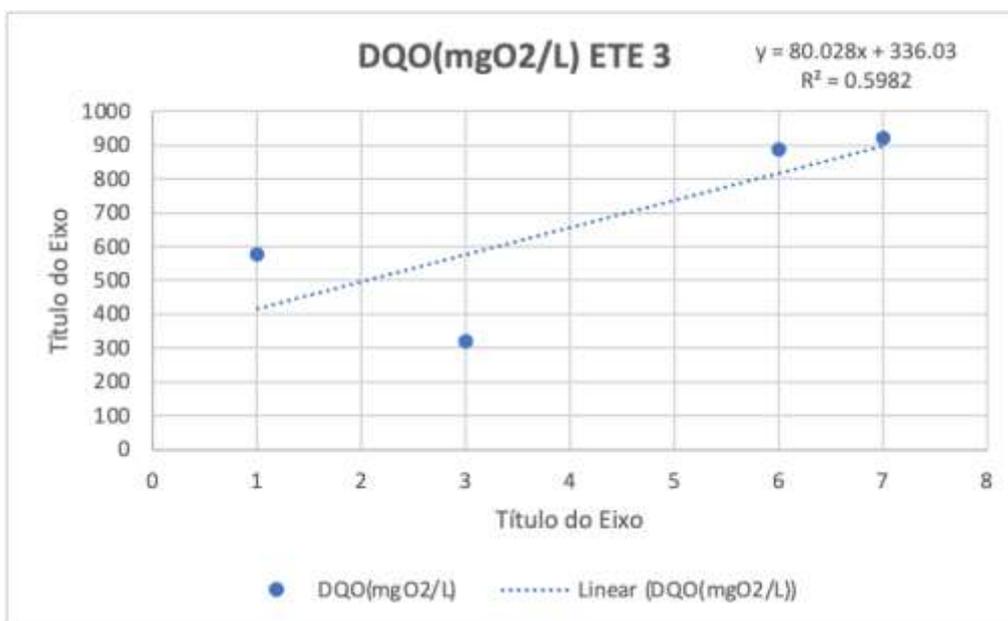
Fonte: Autores (2021).

Gráfico 2: Análise estatística por mínimos quadrados de DQO da ETE 2.



Fonte: Autores (2021).

Gráfico 3: Análise estatística por mínimos quadrados de DQO da ETE 3.



Fonte: Autores (2021).

Os valores de DQO e de vazão supracitados foram aplicados ao software ProBio 1.0, havendo a estimativa da produção de biogás e outros parâmetros ligados a conversão de DQO nos reatores UASB. Foram feitas simulações considerando os três cenários disponibilizados pelo software (pessimista, típico e otimista). As relações unitárias de produção de metano, biogás e de energia apresentaram, na maioria das vezes, valores abaixo das relações unitárias mínimas

determinadas no estudo de Lobato (2011) para cada cenário de produção em exceção da ETE 1(Córrego D'Antas), que possuem valores bem próximos dos limites máximos.

Avaliando a proporção de CH₄ no biogás, através da estimativa gerada, nota-se que, todas as estações apresentam proporções acima de 60% de CH₄ no biogás, valor esperado para o reator UASB, sendo que a ETE 1 foi a que apresentou maior valor (71,1%), seguida da ETE 2 (68,8%) e ETE 3 (68,6%). Na produção de biogás, as estações 2 e 3 se encontraram na média, com valores entre 268,7 e 550,7 m³/dia e 74,8 e 164, m³/dia respectivamente. A estação 1 apresentou-se em torno dos limites máximos, com uma produção diária em m³ de 2.616 para cenários conservadores e de 4.495 para o cenário otimista.

A produção de biogás torna-se interessante para a ETE também do ponto de vista ambiental, uma vez que existem diversos subsídios e linhas de crédito para esse tipo de projeto, a exemplo do BNDES, Caixa Econômica Federal e Banco Mundial (AHK, 2013; CEPEA, 2012). Esse tipo de incentivo surge a partir da necessidade de desenvolvimento de fontes de energia alternativas às fósseis e que sejam sustentáveis.

Em relação aos motores-geradores, com base nos dados de produção de biogás, a empresa ERBR estabeleceu para a ETE 1 o modelo ER-BR GSCA420 e para a ETE 2 foi selecionado o ER-BR GMWM120. É válido ressaltar que para a ETE 3 a quantidade de biogás mínima necessária para o funcionamento do menor motor é insuficiente e, portanto, inviabilizado o uso de motor-gerador. Em todas as ETEs foram definidas pela ERBR um painel de controle modular eletrônico, microprocessado e programável, dotado de instrumentação digital RMS com capacidade avançada de medição, comando, controle e comunicação do motor/gerador, interface com operador, informações de controle, diagnóstico e operação incorporados ao conjunto motogerador. Além disso, o controlador é projetado com as funções de proteção e controle para gerador, com circuitos internos de medição das três fases, disponibilizando em seu display de LCD todas as informações de alarme e grandezas elétricas do grupo motogerador e da rede elétrica.

Assim como o controlador eletrônico foi definido um painel igual para ambas as estações. Nesse painel inclui Relé montado em painel com pintura epóxi e disjuntor de conexão ABB motorizado com bobina de abertura e fechamento, carregador de bateria, NO-BREAK, "DPS-classe1", "TP's" e "TC's" para isolamento galvânico e proteções das entradas de tensão e corrente. Foram definidos como equipamento de monitoramento o ERBR 4.0 - MÓDULO IOT (Internet of things). A sua principal função é o monitoramento remoto on-line das funções e produção do grupo gerador, armazenados em nuvem por 24 meses. Os dados são armazenados em relatórios diários, mensais, anuais ou por intervalo de período desejado. O monitoramento dos parâmetros do motor se dá por rotação, pressão do óleo, pressão do turbo, aceleração, temperatura da água e sonda lambda, bem como do alternador e o envio de relatórios de produção, alarmes e eventos.

A filtragem do H₂S auxilia no aumento do tempo de vida útil dos equipamentos, eliminação de odores e propõe melhorias à qualidade do biogás. Nesse contexto, para a ETE 1 foi estabelecido o filtro ERBR/SFP Secagem do Biogás 3,5 HP/5CV com unidade condensadora 3°C a 5°C em ponto de orvalho. Já para a ETE 2, foi definido o filtro ERBR/SFP secagem do Biogás 2,0 HP/3CV com unidade condensadora 3°C a 5°C em ponto de orvalho. Em ambas as estações (ETE1 e ETE2) foi considerado um abrigo de aproximadamente 53m² feito de container com cobertura de estrutura metálica e telhas em fibrocimento.

Em relação aos custos de investimento, a ETE 1 apresentou um CAPEX de R\$934.33,31, valor superior ao da ETE 2, cujo CAPEX foi R\$446.070,31. Os custos de manutenção foram de R\$60.467,96 e R\$21.967,38, para as ETEs 1 e 2, respectivamente. Associado a esse valor, foram acrescentados os custos de monitoramento remoto online para ambas as estações. Dessa forma, é possível perceber que o custo total anual da ETE 1 (R\$70.467,96) é superior ao da ETE 2 (R\$31.967,38), o que pode ser justificado pelo seu tamanho.

A análise de investimento é um fato decisivo para auxílio na tomada de decisão, de forma a relacionar-se às projeções das condições futuras econômicas (Pelissari *et al.*, 2011). Outro ponto a ser considerado associa-se ao uso do biogás oriundo dessas ETEs como alternativa em momentos de crise energética. Nicolini (2016) observou em seu estudo que a energia oriunda

do processo de digestão anaeróbia, não apenas servia como medida de redução de gases causadores do efeito estufa (GEE), mas também como alternativa a possíveis ineficiências das usinas hidrelétricas.

O uso de ETEs pelo Brasil, com foco na recuperação do biogás, pode se constituir como uma fonte de energia alternativa. Para Chernicharo *et al.* (2006), os custos de implementação de uma planta UASB seguido por tratamento biológico aeróbio podem proporcionar economias no investimento (CAPEX) de 20 a 50% e de OPEX acima de 50% ao se comparar com uma planta convencional.

A análise energética envolveu informações oriundas da determinação dos motor-geradores, das informações energéticas sobre as estações de tratamento e das informações de tarifas e impostos pagos pelo (DME, 2021). De acordo com o Quadro 2 a produção mensal de energia da ETE 1 é superior à ETE 2, assim como a potência do motor dimensionado pelo fabricante.

Quadro 2: Potência e produção de energia das ETEs 1 e 2.

Unidade		ETE 1 (Corrego D'antas)	ETE 2 (Rodovia do contorno)
Potência elétrica disponível	kW	230	75
Grupo gerador recomendado pelo fornecedor	-	GSCA420 420 kVA / 260 kWe (PICO)	GMWM120 120 Kva / 75 kWe
Potência gerada em base load com a concessionária de energia	kW	250	75
Consumo de biogás com 55% de CH ₄	m ³ /h	145	57
Produção normalizada de biogás	Nm ³ /d	3226.2	369,7
Horas de operação diária com potência máxima	h	22	6,5
Produção diária de energia	kWh	5500	487,5
Produção mensal de energia	kWh/mês	165000	14625

Fonte: Autores (2021).

Tsagarakis (2007) e Metcalf & Eddy (2003), evidenciam que a principal vantagem da produção de energia em uma ETE é o fato que o biogás produzido é suficiente para atender toda a demanda energética necessária para a operação da planta. Dessa forma, a análise energética se torna fundamental para avaliar a viabilidade da ETE em termos de produção de biogás.

Valente (2015) demonstrou em seus estudos que a viabilidade econômica encontra-se em ETEs que atendam uma população entre 100 mil e 200 mil habitantes, sendo que vazões a partir de 150 l/s já devem ser consideradas para a análise de uso de biogás para geração de energia. No presente estudo, a ETE 1 apresenta uma vazão média de 270L/s, mais uma vez sendo reforçada a sua viabilidade econômica. O autor complementa que, embora a digestão anaeróbica apresente um custo de investimento alto, em geral ela possui custos inferiores por eletricidade gerada, sendo que para escalas acima de 200 mil habitantes, tanto o custo de investimento como o LCOE (custo nivelado) estão dentro da faixa de 1,2 a 1,6 mil R\$/kW e 144 a 456 R\$/kW, respectivamente.

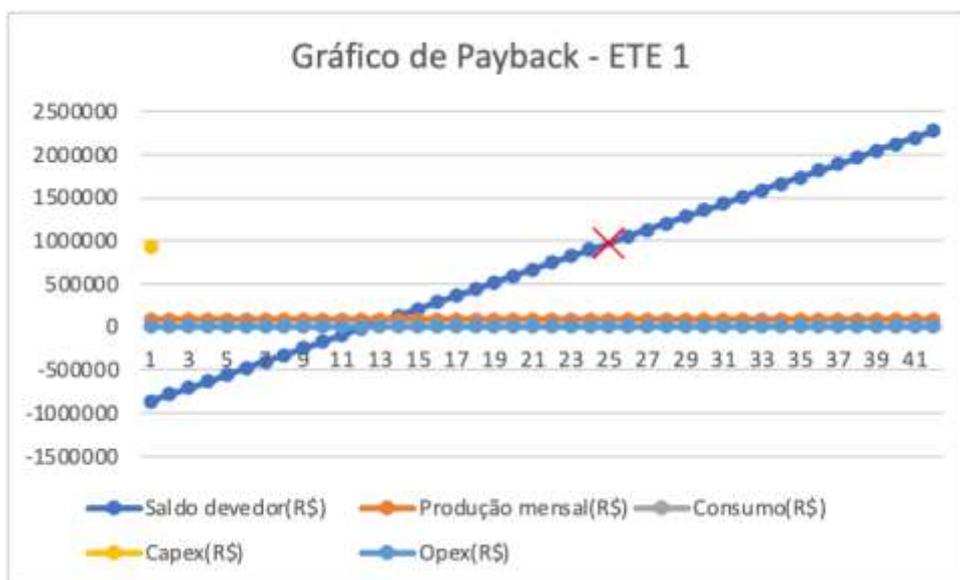
Acrescenta-se como vantagem, além do retorno econômico e da economia que essas usinas podem proporcionar, a possibilidade de geração descentralizada e próxima aos pontos de recarga, a possibilidade de venda de créditos de carbono, geração de empregos e menor emissão de metano, conseqüentemente, menores prejuízos ambientais (Salomon & Lora, 2005). Para o cálculo do crédito de carbono são utilizados os dados relativos à produção e potência de energia produzida pelas ETEs. Nesse estudo, foi observado que para a ETE 1, cuja potência e o tempo de operação são superiores, o crédito de carbono que pode ser obtido é superior à ETE 2. Como a ETE 3 não apresentou viabilidade energética, não foi realizado o seu cálculo de crédito de carbono.

A ETE 1 apresentou um total de carbono evitado de 22.082,5 tCO₂ eq por ano, o que totaliza em Certificado de Emissões Evitadas (CEE), considerando o valor de CEE de US\$10,00 e o tempo de vida útil da planta, segundo dados de Pecora (2006), teria-se um total de US\$2.208.250,00. Já para a ETE 2 esse valor seria de US\$577.703,75. Dessa forma, fica evidente que o uso energético do biogás oriundo das ETEs influencia positivamente o município, não apenas benefícios administrativos, mas também possibilita a geração descentralizada de energia elétrica, bem como retorno financeiro em termos de crédito de carbono (Pecora, 2006).

De acordo com Oliveira e Domingues (2011), ao se enquadrarem no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) do protocolo de Kyoto, as receitas oriundas do crédito de carbono, pode, muitas vezes, ser determinante para a viabilidade de execução de projetos como esse. Acrescenta-se ainda estudos como de Silva (2015), em que foi constatado a redução na emissão de CO₂ em ETE através do aproveitamento de biogás para geração de energia. Porém, ressalta-se que o estudo do aproveitamento energético do biogás oriundo de ETEs deve ser considerado como uma alternativa a longo prazo e com maiores investimentos governamentais (Gomes *et al.*, 2017).

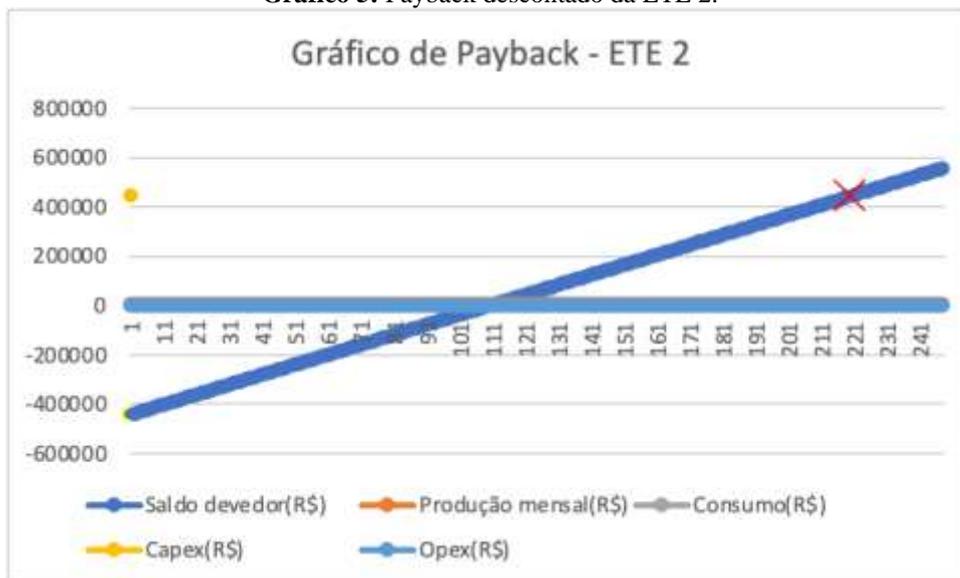
Com base nas avaliações realizadas observa-se que para a ETE 1 o período de retorno (payback) do investimento seria de 25 meses (Gráfico 4), já para a ETE 2, esse tempo está estimado em 221 meses (Gráfico 5). Campello *et al.* (2021), demonstraram em seus estudos que, a média de payback nos municípios onde o investimento foi viável foi de 4.49 anos para uma população entre 150 mil e 250 mil habitantes. Dessa forma, nota-se que o período necessário de retorno pela ETE 1 torna a sua instalação viável. Savi (2019) avaliou o potencial de geração de energia a partir do biogás produzido em uma ETE em Criciúma (SC), obtendo um tempo de payback de 21 meses, concluindo que o investimento é significativamente atrativo. Esse tempo de retorno se assemelha ao da ETE 1, corroborando com os resultados encontrados nesse estudo e indicando a viabilidade de instalação e de aproveitamento do biogás como fonte energética.

Gráfico 4: Payback descontado da ETE 1.



Fonte: Autores (2021).

Gráfico 5: Payback descontado da ETE 2.



Fonte: Autores (2021).

Nesse mesmo sentido, Santos *et al.* (2016) avaliaram a viabilidade econômica e o potencial de geração de energia oriunda do biogás de ETEs com sistemas anaeróbios, indicando que há uma viabilidade econômica para municípios com uma população superior a 300 mil habitantes.

4. Conclusão

Com base nos resultados encontrados é possível concluir que:

- Apenas a ETE 1 apresenta viabilidade para instalação de usina de energia a partir do biogás gerado pelo

tratamento de esgoto, considerando a sua capacidade de produção energética e o tempo de retorno de investimento;

- Há possibilidade de uso de créditos de carbono como forma de aumentar as receitas do projeto, tornando-o ainda mais viável do ponto de vista econômico e ambiental;
- Há a possibilidade de sua utilização em casos de crise energética, em que as hidrelétricas não demonstrem sua capacidade de produção máxima.
- A biomassa oriunda dos esgotos sanitários possui potencial para serem empregados na produção de biogás e sua posterior conversão em energia elétrica nas ETEs;
- Para que o uso do biogás seja de fato amplamente aplicado, são necessárias políticas públicas que incentivem esse tipo de projeto.

Estudos adicionais são necessários para que projetos de manejo sejam elaborados e executados com maior eficiência, garantindo que os propósitos de sustentabilidade estejam sendo atingidos e que os benefícios desses sistemas possam, de fato, melhorar a qualidade de vida e do ambiente ao qual a sociedade está inserida.

Referências

- AHK. (2013). Energias Renováveis – Biogás. AHK – Câmara de Comercio e Indústria Brasil-Alemanha. <http://ahkbusiness.de/pt/energias-renovaveis/biogas/#finanzierung>.
- Amaral, K. G. C. et al. (2019). Sustainability assessment of sludge and biogas management in wastewater treatment plants using the LCA technique. *Ambiente & Água*, 14(5), e.2371.
- Campello, L. D. et al. (2021). Analysis of the economic viability of the use of biogas produced in wastewater treatment plants to generate electrical energy. *Environment, Development and Sustainability*, 23, 2614-2629.
- Calijuri, M. C.; Cunha, D.G.F. Engenharia ambiental: Conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- CEPEA (2012). Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Estatísticas e informações sobre o mercado de carbono. www.cepea.esalq.usp.br.
- Chernicharo, C. A. L. et al. (2006). Post-Treatment Options for the Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater. *Reviews In Environmental Science And Bio/technology*, 5(1), 73-92.
- Beasil. (2011). Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução N° 430, de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.
- European Commission (2001). Environmental pressure indicators for the EU. Office for official publications of the European Communities. Luxembourg, 2001.
- Gomes, G. V. et al. (2017). Estudo da produção de energia elétrica a partir do biogás com e sem purificação de estação de tratamento de esgoto. *The journal of Engineering and Exact Science*, 3(7), 899-919.
- Lobato, L. C. D. S. (2011). Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico. Belo Horizonte: Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA).
- Metcalf & Eddy. (2003). Wastewater Engineering: Treatment, disposal, reuse. 4. ed. New York: McGraw-Hill International Editions, 1848p.
- Nicolini, D. R. W. (2016). Produção de biogás a partir do tratamento de efluentes sanitários. MBA Gestão ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 44f.
- Oliveira, W. R. & Domingues, E.D. (2011). Energia Elétrica e Créditos de Carbono: uma Proposta de Aproveitamento Energético do Biogás Gerado em Estações de Tratamento de Esgoto: Estudo de Caso. *Ciências Exatas Tecnologia*, 10(1), 61-67.
- 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. São Paulo: Universidade de São Paulo USP, 153p. 2006.
- Pelissari, A.S. et al. (2011). Competências gerenciais: um estudo em pequenas empresas de confecções. *Revista de Administração*, 17(1), 149-180.
- Salomon, K., R. & Lora, E. E. S (2005). Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass e Bioenergy*, 33, 1101-1107.
- Santos, I. F. S. S. et al. (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.

Savi, V. G. (2019). Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir de biogás produzido na Estação de Tratamento de Esgoto(ETE) Santa Luzia (Criciúma/SC). Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá. 92f.

Silva, T. C. F. (2015). Utilização de Biogás de estações de tratamento de esgoto para fins energéticos. (Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo). https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-20052015-182523/publico/Dissertacao_Thaisa_Silva.pdf

Sistema Nacional De Informações Sobre Saneamento – SNIS (2017). Diagnóstico dos serviços de água e esgotos. Site institucional.

Tsagarakis, K.P. (2007). Optimal number of energy generators for biogas utilization in wastewater treatment facility. *Energy Conversion and Management*, 38, 2694-2698.

Valente, V. B. (2015). Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 182f.