



Viabilidade econômica para a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em estação de tratamento de esgoto

Ian Gabriel Brum Garcia¹, Ronaldo Hoffmann², Flávio Dias Mayer³, Patrícia Andrade Paines⁴, Osmar Possamai⁵

¹Mestre em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Santa Maria – UFSM. Santa Maria, RS – Brasil.
ian.gabriel.brum.garcia@gmail.com

²Doutor em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, RS – Brasil.
hoffmann@ct.ufsm.br

³Doutor em Engenharia Química - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Porto Alegre, RS – Brasil.
flaviodymayer@yahoo.com.br

⁴Doutora em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, SC – Brasil.
paines_sm@hotmail.com

⁵Doutor em Génie Mécanique - Université de Technologie de Compiègne – UTC. Compiègne – França.
osmar.possamai@gmail.com

Cite como:

Garcia, I. G. B., Hoffmann, R., Mayer, F. D., Paines, P. A., & Possamai, O. (2020). Viabilidade econômica para a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido em estação de tratamento de esgoto. *Rev. Gest. Ambient. e Sust. - GeAS*, 9(1), 1-17, e13443. <https://doi.org/10.5585/geas.v9i1.13443>.

Resumo

Objetivo do estudo: apresentar a análise dos dados coletados referentes às características de esgoto afluente da Estação de Tratamento de Esgoto Serraria, em Porto Alegre/RS.

Metodologia / abordagem: pesquisa descritiva com abordagem quantitativa e centralizada no estudo de caso da exploração de biogás gerada para produção de energia elétrica.

Originalidade/relevância: este estudo concentra-se na viabilidade técnica e econômica para a geração de eletricidade a partir de efluente de biogás para uso na própria estação, atendendo a maioria das cargas locais, e também, da tecnologia de conversão de energia empregada a partir do ciclo de combustão interna Otto, com seus acessórios.

Principais resultados: os custos de instalação, operação e manutenção por cinco anos estão estimados em torno de R\$ 4.500.000,00. Além disso, o retorno sobre o capital investido ocorre, no máximo, em 4 anos e 7 meses.

Contribuições teóricas / metodológicas: Há uma tendência de aumento da eletricidade a partir da tarifa da rede e do fluxo de insumos nos UASBs, tornando a autogeração ainda mais viável. Atualmente, o biogás é queimado e o lodo gerado é depositado em aterros sanitários, o que possibilita a produção de energia elétrica e fornecimento à rede de distribuição.

Conclusão: as usinas de estação de tratamento de esgoto constituídas de depósito de lodo anaeróbico de fluxo ascendente seguida de lodos ativos têm como objetivo o tratamento de efluentes, isto é, promover a separação dos gases, sólidos e líquidos como forma de tratamento sustentável e, além disso, proporcionar benefícios e recursos sustentáveis para a sociedade.

Palavras-chave: Biogás de Esgoto. Tratamento de Esgoto. Viabilidade Econômica.





Economic viability to generate electricity from the biogas produced in the wastewater treatment plant

Abstract

Objective of the study: to present the analysis of the collected data referring to the characteristics of affluent sewage of the Serraria Sewage Treatment Station, in Porto Alegre/RS.

Methodology / approach: descriptive research with a quantitative approach and centralized in the case study of the biogas exploration generated for the production of electric energy.

Originality / relevance: this study focuses on the technical and economic feasibility for generating electricity from biogas effluent for use at the station itself, serving most of the local loads, as well as the energy conversion technology used from of the internal combustion Cycle Otto, with its accessories.

Main results: installation, operation and maintenance costs for five years are estimated at around R\$ 4.500.000,00. In addition, the return on invested capital occurs, at most, in 4 years and 7 months.

Theoretical / methodological contributions: there is a tendency to increase electricity from the network tariff and the flow of inputs in the UASBs, making self-generation even more viable. Currently, biogas is flared and the sludge generated is deposited in landfills, which makes it possible to produce electricity and supply it to the distribution network.

Conclusion: sewage treatment plants consisting of an upstream flow anaerobic sludge deposit followed by active sludge aims to treat effluents, that is, to promote the separation of gases, solids and liquids as a form of sustainable treatment and, in addition, to provide sustainable benefits and resources for society.

Keywords: Sewage Biogas. Sewage Treatment. Economic Viability.

Viabilidad económica para generar electricidad a partir del biogás producido en la planta de tratamiento de aguas residuales

Resumen

Objetivo del estudio: presentar el análisis de los datos recopilados en referencia a las características de las aguas residuales afluentes de la Estación de Tratamiento de Aguas Residuales Serraria, en Porto Alegre / RS.

Metodología/enfoque: investigación descriptiva con enfoque cuantitativo y centralizada en el estudio de caso de la exploración de biogás generada para la producción de energía eléctrica.

Originalidad / relevancia: este estudio se centra en la viabilidad técnica y económica para generar electricidad a partir del efluente de biogás para su uso en la propia estación, que sirve a la mayoría de las cargas locales, así como la tecnología de conversión de energía utilizada del ciclo de combustión interna Otto, con sus accesorios.

Resultados principales: los costos de instalación, operación y mantenimiento durante cinco años se estiman en alrededor de R \$ 4.500.000,00. Además, el rendimiento del capital invertido se produce, como máximo, en 4 años y 7 meses.

Contribuciones teóricas / metodológicas: existe una tendencia a aumentar la electricidad de la tarifa de la red y el flujo de insumos en los UASB, haciendo que la autogeneración sea aún más viable. Actualmente, el biogás se quema y el lodo generado se deposita en vertederos, lo que permite producir electricidad y suministrarla a la red de distribución.

Conclusión: las plantas de tratamiento de aguas residuales que consisten en un depósito de lodo anaeróbico de flujo aguas arriba seguido de lodo activo tiene como objetivo tratar los efluentes, es decir,



promover la separación de gases, sólidos y líquidos como una forma de tratamiento sostenible y, además, proporcionar beneficios sostenibles y recursos para la sociedad.

Palabras clave: Biogás de aguas residuales. Tratamiento de aguas residuales. Viabilidad económica.

1 Introdução

Mudanças climáticas têm sido acentuadas e aceleradas nas últimas décadas, pelo crescente uso dos recursos naturais, em especial pelo consumo dos combustíveis de origem fóssil. As alterações no clima representam “um grave problema ambiental, causado pelo efeito estufa”. Este fenômeno está diretamente relacionado ao aumento na concentração de certos gases, com propriedades de reter a radiação solar infravermelha (PEREIRA, 2004).

O efeito estufa ocorre naturalmente e é essencial para a manutenção dos climas e da temperatura média do planeta Terra, permitindo a vida vegetal e animal. É caracterizado pelo aprisionamento de energia térmica na baixa atmosfera, aumentando a temperatura média em microclimas, essencialmente, em zonas urbanas. Dentre as atividades humanas que mais interferem para as causas do efeito estufa estão as decorrentes da geração elétrica, transportes, processos industriais, e também aquelas provenientes do ciclo natural da matéria orgânica. Embora estejam em ciclos fechados, o processo de transformação da matéria orgânica pode agravar o efeito estufa, conforme a composição dos gases gerados. O metano (CH_4) é produzido durante a decomposição anaeróbia, proveniente principalmente da atividade agrícola, pecuária, gás natural fóssil, aterros sanitários e esgotos, sendo um dos principais gases causadores do efeito estufa (CHERNICHARO, 2001).

Uma das formas de reduzir o impacto ambiental das emissões do CH_4 para a atmosfera é queimando-o. A combustão converte o CH_4 em dióxido de carbono (CO_2) e energia térmica. Essa alternativa é utilizada usualmente em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), onde ocorre produção de biogás, formado majoritariamente por CH_4 e CO_2 . A energia térmica é frequentemente perdida para o ambiente, sem aproveitamento para sua conversão em energia elétrica.

O objetivo desta pesquisa é efetuar um estudo teórico da viabilidade técnica e econômica da implantação de motor de combustão interna para geração de energia elétrica a partir do biogás da ETE Serraria, Departamento Municipal de Água e Esgoto (DMAE) da cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil.

Para tanto, o biogás visto como insumo, e não como rejeito, muda o paradigma das ETEs, de consumidoras de energia e poluidoras do ambiente para uma importante auxiliar no processo de melhorar a relação do ser humano com a natureza e o desenvolvimento sustentável. Sendo este um dos principais objetivos a serem alcançados com medidas de redução de emissões dos gases estufa.



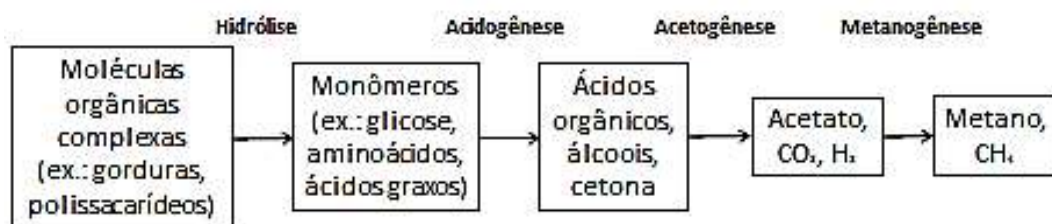
2 Referencial teórico

Esta seção se divide em três partes no âmbito de uma melhor compreensão do tema, sendo eles: o que são o biogás, as estações de tratamento de esgoto, e a conversão energética do biogás.

2.1. Biogás

A mistura de gases resultante do processo de decomposição da matéria orgânica, durante a etapa de digestão anaeróbia, isto é, sem a presença de oxigênio, é chamado biogás que está contido na biomassa (Bitton, 2005). No caso dos esgotos, o biogás está na mistura líquida com sólidos dissolvidos, retiradas a areia, espuma e sólidos grosseiros inorgânicos. Esta matéria é convertida do estado sólido para gasoso, pela ação anaeróbia das bactérias metanogênicas Archaeobacterias, conforme Figura 1.

Figura 1 - Processo de digestão anaeróbia (BITTON, 2005)



Fonte: BITTON, 2005.

A proporção de cada gás na composição do biogás depende de parâmetros como o substrato e o ambiente digestor (COLDEBELLA, 2006). A composição média do biogás é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição do biogás

Componentes	Concentração
Metano (CH_4)	50% - 75% (vol.)
Dióxido de carbono (CO_2)	25% - 45% (vol.)
Água (H_2O) - umidade	2% - 7% (vol.) (20 – 40°C)
Sulfeto de hidrogênio (H_2S)	20 – 20000 ppm
Nitrogênio (N_2)	< 2% (vol.)
Oxigênio (O_2)	< 2% (vol.)
Hidrogênio (H_2)	< 1% (vol.)

Fonte: Autores.

O potencial energético como combustível de 1,0 Nm³ de biogás, com concentração de 50% de CH_4 é equivalente a: 0,53 Nm³ de gás natural, 0,63 litro de óleo diesel e a 0,61 litro de gasolina (COLDEBELLA, 2006).

2.2 Estações de Tratamento de Esgoto (ETE)

As ETEs são sistemas capazes de tratar águas residuais de origem domésticas e/ou industriais, para posteriormente o efluente possa ser escoado com impacto ambiental e sanitário a níveis aceitáveis, utilizando processos físicos, químicos e biológicos. A Figura 2 ilustra o fluxograma de uma ETE, que servirá como referência neste estudo (TREVISAN, ORSSATTO, 2017).

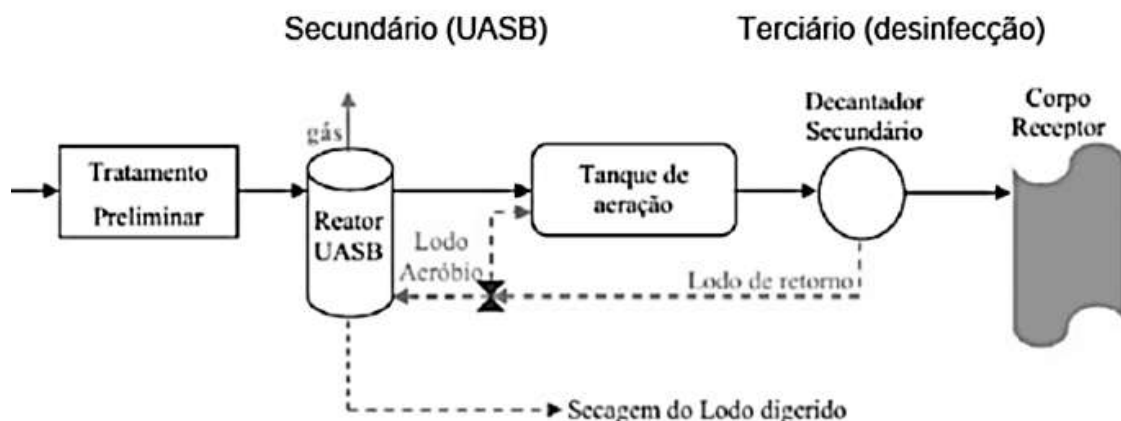
O afluente representa o(s) canal (is) de entrada do esgoto, onde está (ão) a(s) captação (ões). Durante o processo de tratamento há a separação da parte sólida dissolvida na água, resultando em efluentes de três tipos: gasosos, líquidos e sólidos úmidos (lodo) (DMAE, 2009; SALAMA, 2017)

O tratamento preliminar é responsável pela separação dos sólidos grosseiros, espuma, gordura e areia. O tratamento primário visa separar a água pela ação física de sedimentação, auxiliado por agentes químicos coagulantes, floculando a matéria poluente (ZILOTTI, 2012).

O tratamento secundário é um processo biológico, que pode ser do tipo lodos ativado ou filtro, utilizando reatores onde a matéria orgânica será consumida por microrganismos anaeróbios (com ausência de oxigênio) e aeróbios (na presença de oxigenação forçada). A eficiência do tratamento biológico é alta: a redução da matéria orgânica dissolvida na água chega a 95%. Posteriormente os microrganismos passam por um processo de sedimentação nos decantadores secundários (SEMAE, 2011).

O tratamento terciário corresponde à desinfecção das águas, sendo removidos organismos patogênicos ou nutrientes que potencializam a eutrofização das águas receptoras de rios e mares. Normalmente, remove-se nitrogênio e fósforo para evitar o crescimento de algas cianofíceas, as quais diminuem a quantidade de oxigênio dissolvido na água, que acabam por asfixiar peixes (CENBIO, 2004).

Figura 2 - Fluxograma do tratamento de esgoto (PEROVANO, FORMIGONI; 2011)



Fonte: PEROVANO, FORMIGONI; 2011.



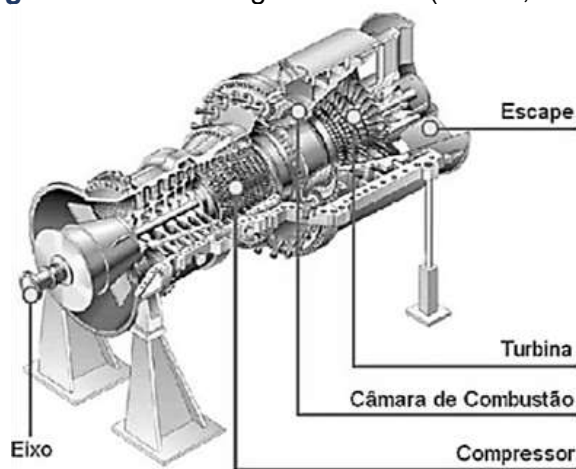
2.3 Conversão energética do biogás

A conversão energética é o processo de transformação de um tipo de energia em outro. O biogás contém energia armazenada nas ligações moleculares do metano, que pode ser convertido em energia térmica ao passar pelo processo de combustão. Para transformar a energia térmica em mecânica, essa deve passar por um processo de combustão controlada, em uma turbina especialmente projetada para trabalhar idealmente com este combustível.

A turbina a biogás pode ativar um gerador convertendo a energia mecânica em elétrica. Para que a produção de energia elétrica a partir do biogás em uma ETE seja ininterrupta, o tamanho da estação deve atender a, no mínimo, uma população de 10.000 habitantes, com respectiva capacidade de geração de 5.544 kWh/mês (COSTA *et al.*, 2001). Das tecnologias disponíveis, as turbinas a gás e motores de combustão baseados no Ciclo Otto são os mais usuais.

As turbinas a gás permitem maior eficiência global na conversão elétrica quando operadas em cogeração de calor e eletricidade (DMAE, 2009). A Figura 3 ilustra uma turbina a gás, que é formada por compressor de ar, câmara de combustão e turbina.

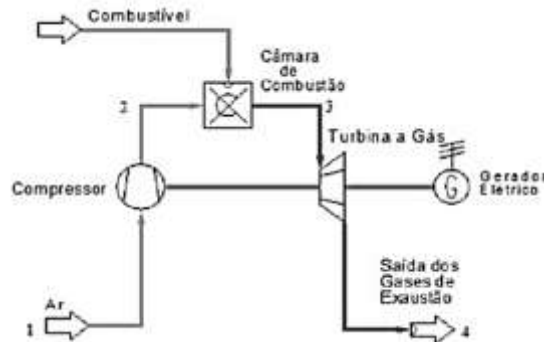
Figura 3 - Turbina a gás em corte (DMAE, 2009)



Fonte: DMAE, 2009.

A turbina a gás possui menor tamanho do que turbinas a vapor, pois não utiliza um fluido intermediário para acionar o compressor. Uma vantagem adicional é a capacidade de operar com diferentes combustíveis, como gás natural, biogás (CH_4 proveniente dele), querosene, gases do carvão e de biomassa. Entretanto, a mesma segue o Ciclo de Brayton com rendimento de aproximadamente 35%, conforme a Figura 4.

Figura 4 - Ciclo de Brayton - turbina a gás (SOUZA et al., 2004)



Fonte: SOUZA et al., 2004.

Para o sistema composto por compressor, câmara de combustão, turbina e gerador elétrico, denomina-se “micro-turbina”, o conjunto com potência inferior a 250 kW e “mini-turbina”, a faixa de potências entre 250 kW a 1000 kW.

3 Metodologia de estudo

O estudo de caso deste trabalho é focado nas características do esgoto encontrado na captação da ETE Serraria, localizada na zona sul do município de Porto Alegre – Rio Grande do Sul.

O afluente passa por tratamento composto de peneiramento mecânico e caixa de areia aerada. Posteriormente, o esgoto é conduzido aos oito reatores anaeróbios do tipo UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket/Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com Manto de Lodo).

A Figura 5 mostra uma visão geral da planta instalada, com indicações dos oito reatores UASBs. A Estação adota um sistema que combina etapas distintas de processo.

Figura 5 - Visão panorâmica da ETE Serraria com destaque aos UASBs



Fonte: ETE Serraria, 2014.



Em seguida, o esgoto passa por um sistema de pós-tratamento por lodos ativados, com fases de nitrificação e desnitrificação, em oito conjuntos de equipamentos chamados Unitank (tecnologia da empresa Keppel Seghers). A vantagem na utilização deste sistema se dá na reduzida área física de instalação e do consumo de energia elétrica necessária para aerar e movimentar os resíduos entre as fases do processo de descontaminação do esgoto. A seguir, são descritos os quatro principais procedimentos utilizados para análise do projeto, sendo eles: análises de esgoto afluente, de biogás, dos equipamentos e da geração de eletricidade.

3.1 Dados de Esgoto Afluente da ETE Serraria

A ETE Serraria foi dimensionada para realizar o tratamento em nível terciário dos efluentes sanitários coletados, incluindo a remoção dos nutrientes nitrogênio e fósforo. Os reatores UASB, objeto de estudo deste trabalho, estão contido na fase secundária do tratamento. O projeto foi concebido para tratar esgotos com características domésticas. Os parâmetros apresentados na Tabela 2 foram adotados para o dimensionamento da unidade (IANNICELLI, 2008).

Tabela 2 - Concentração mensal do esgoto afluente

Parâmetros	Valores
Vazão média (L/s)	2.710,000
Vazão máxima (L/s)	4.115,000
DQO (mg/L)	498,150
DBO ₅ (mg/L)	276,750
Sólidos suspensos totais (mg/L)	266,500
Nitrogênio total Kjeldahl (mg/L)	45,000
PT (mg/L)	7,00
pH	7,0 ~ 7,5
Coliforme fecal (NMP/100mL)	1,00E+07

Fonte: Autores.

Atualmente, a ETE recebe uma vazão afluente média de 1.000 L/s e será aumentada gradativamente a vazão máxima de projeto de 4.115 L/s. O início da operação ocorreu em março de 2014, com vazão inferior a 500 L/s.

3.2 Dados de Biogás da ETE Serraria

O reator utilizado neste estudo de caso é do tipo UASB. O controle operacional dos reatores UASB's é fetuados basicamente em função da avaliação de quatro parâmetros principais:

1 eficiência de remoção de matéria orgânica deve estar na faixa de 60% a 70%;



2 produção de Biogás é o melhor indicador da degradação da matéria orgânica no reator. Teoricamente 1,0 kg de *DQO* consumida deve produzir 0,35 Nm³ de *CH₄*. No entanto, deve ser levado em consideração a possibilidade de 40% do biogás permanecer dissolvido na massa líquida;

3 *pH* do reator deve apresentar um *pH* entre 6,5 e 7,5 na fase metanogênica com temperatura ideal de 35 °C para a digestão anaeróbia. Se o *pH* ficar abaixo desta faixa significa que o reator está na fase acidogênica, concentração ácidos voláteis acima de 500 mg ácido acético/L, geralmente em função de um desequilíbrio entre a carga aplicada e a biomassa no reator. Neste caso é aconselhável reduzir a carga orgânica e não descartar lodo até o *pH* se recuperar. Em casos extremos é possível controlar o *pH* com a aplicação de produtos químicos alcalinos (GLAISTER et al., 2017).

Vale ressaltar a influência de chuva nas taxas de produção de biogás na ETE. A vazão de biogás apresenta um coeficiente de variação de 30%. À medida que as precipitações tornam-se mais intensas (acima de 10 mm) há uma tendência de redução das vazões de biogás. Além disso, estima-se que os eventos de chuva diminui a vazão média anual de biogás em 3,5% (WAISS, POSSETTI, 2015).

Cada reator é atendido por uma linha de coleta de biogás interligada aos dois conjuntos queimadores da ETE, com a capacidade para 550 Nm³/hora. A composição média esperada para o biogás é 65% de *CH₄* e 35% de *CO₂* a 37°C. Até a data de realização deste trabalho não havia produção de biogás na ETE Serraria. Por esta razão, todos os materiais e métodos levantados para este estudo de caso são aqueles considerados em projetos, como os dados das características de esgoto, dimensionamento de equipamentos e sistemas de tratamento.

3.3 Equipamentos propostos no projeto

Para a instalação do sistema de geração de energia elétrica com base no motor de combustão interna de Ciclo Otto, são necessários os seguintes componentes (SEMAE, 2011):

- a) Grupo gerador de motor Ciclo Otto, combustível biogás;
- b) Gasômetro adequado à vazão de biogás esperada;
- c) Interligação do sistema de geração com o sistema de queimadores, previamente instalados;
- d) Sistema de filtragem do biogás, interligado aos queimadores e saída dos UASBs;
- e) Sistema de compressão do biogás;
- f) Instalações hidromecânicas e elétricas do sistema;
- g) Sistema de automação e controle da geração elétrica em paralelismo com a rede;



- h) Fornecimento e instalação do sistema elétrico em 440V e 13.8 kV, incluindo transformador elevador, cabeamento adequado entre o gerador a biogás, transformador, cabine de entrada, tubulações, quadro de comando e controle, sistema de paralelismo com a rede elétrica de distribuição, licenciamento junto à ANEEL e demais serviços referentes de geração de energia elétrica; e
- i) Obras civis correspondentes a construção do sistema de geração de energia elétrica.

Os orçamentos de custos de equipamentos para a geração de energia elétrica a biogás são demonstrados na Tabela III, utilizando-se o sistema proposto pelo Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto de São José de Rio Preto, São Paulo (SEMAE, 2011). Para a relação de custos foi atualizado o Índice Nacional de Preços ao Consumidor - Amplo (IPCA) referente a dezembro de 2014, 2016 e 2018 a fim de confrontar custos de instalações e aquisições com valores de energia elétrica sob a mesma referência.

A Tabela 3 mostra os valores inflacionados sob os seguintes IPCA: 0,6407 para 2014; 0,6280 para 2016; e estimativa de 0,460 para 2018, ou seja, valor total multiplicado pelo índice de IPCA por ano (*).

Tabela 3 - Orçamento de custos dos equipamentos

Descrição	2014	2016	2018
Grupo gerador de 788 kW	1.634.031,53	1.921.949,12	2.010.358,77
Gasômetro e obra civil	1.003.270,50	1.180.047,52	1.185.475,74
Sist. de coleta de biogás	383.733,44	451.347,56	472.109,55
Filtragem do biogás	107.323,13	126.233,54	132.040,28
Sistema de compressão	121.809,33	143.272,22	149.867,74
Controle de paralelismo	473.404,75	556.819,03	582.432,71
Obras civis complementares	322.194,82	378.965,79	396.398,22
Inst. Hidromec. e elétricas	390.207,80	458.962,71	480.074,99
TOTAL (R\$)	4.435.975,3	5.217.597,49	5.408.758,00
* INFLACIONADO (R\$)	7.274.999,492	8.494.248,714	7.896.786,68

Fonte: Autores.

3.4 Capacidade de geração de eletricidade a partir do biogás

Para a transformação da energia química contida no biogás para energia elétrica utilizou-se a equivalência através do poder calorífico inferior do biogás.

A equação 1 realiza a equivalência do potencial calorífico inferior da unidade kcal/kg para potencial calorífico em kWh/m³ de biogás.

$$PCID = PE \times PCI \times K \quad (1)$$



Sendo, $PCID$ é o potencial calorífico inferior em kWh/m^3 ; PE é o peso específico em kg/Nm^3 ; PCI é o potencial calorífico inferior em kcal/kg ; e K é a constante de conversão kcal para kJ para kWh igual a $4,19 \text{ kWh}/3600$.

Como valor de referência para a eficiência global da máquina térmica utilizada com grupos geradores, segundo o Ciclo Otto, é utilizado 25%, (IANNICELLI, 2008) representado pelo fator 0,25 na equação a seguir. A eq. 2 determina a potência elétrica a ser disponibilizada.

$$P = PTB \times PCID \times 0,25 \quad (2)$$

Onde, P é a potência elétrica disponibilizada em kW ; e PTB é a produção total de biogás em m^3/h ;

No entanto,

$$PTB = DQO \times Q \times PTUASB \times CH_4(\text{gasoso}) \quad (3)$$

Sendo, $PTUASB$ é o percentual de tratamento no UASB; $CH_4(\text{gasoso})$ é o percentual de metano aproveitável em gás; e Q é a vazão por hora em m^3/h .

Na eq. 4, demonstra a energia elétrica a ser disponibilizada mensalmente:

$$E_{\text{mês}} = P \times h \times m \quad (4)$$

Onde, $E_{\text{mês}}$ é a energia elétrica em $\text{kWh}/\text{mês}$; h é igual a 24 horas, por dia; e m é igual a 30,4167 dias do mês, considerando 365 dias por ano/12 meses.

Para dados de projeto da ETE Serraria, a composição química do biogás é de 65% de CH_4 para 35% de CO_2 . O respectivo PE , em kg/Nm^3 é de 1,1518 e o PCI , em kcal/kg é de 4.831,14 (DMAE, 2014).

Conforme a Resolução 414/2014 da ANEEL, as unidades consumidoras que possuem demanda contratada acima de 300kW, é compulsória a aplicação da modalidade tarifária horo-sazonal.

Desta forma, o preço pago pela energia da distribuidora varia conforme a hora e o período do ano. O horário denominado ponta caracteriza-se por ser o período de três horas, normalmente das 18 horas às 21 horas, deslocado em uma hora durante o horário de verão.

É neste horário que se dá o pico de consumo de energia na cidade de Porto Alegre/RS e também na própria ETE, pois aumenta também o consumo de água no período, conseqüentemente a vazão de entrada cresce na mesma proporção. O custo da energia é 4,52 vezes maior durante o horário ponta do que no horário fora ponta. O consumo de energia



elétrica inicial da ETE Serraria no mês de referência (dezembro/2014, 2016 e 2018) é demonstrado na Tabela 4 (DMAE, 2014).

Tabela 4 - Consumo de energia elétrica

Ano	Demanda (KW)		Consumo (KWh)		Total (R\$)
	Ponta	Fora	Ponta	Fora	
2014	0,00	12.937,16	31.795,01	74.292,86	119.025,03
2016	234,56	17.260,74	39.566,20	103.593,96	160.655,46
2018	610,23	18.601,80	45.683,35	179.654,65	244.550,03

Fonte: Autores.

A tendência de consumo é crescente, pois a vazão de esgoto tratado inicialmente foi de aproximadamente 1000 L/s em dezembro de 2014, 2800 L/s em 2016 e a estimativa para 2018, será aproximar a vazão de esgoto ao valor máximo de projeto de 4.115 L/s. A ETE encontra-se em fase de comissionamento de seus reatores. Por esta razão, não se faz necessário o levantamento de dados de consumo de meses recorrentes, pois o mês de estudo é o de maior demanda e consumo de energia elétrica, assim como, devido ao reajuste tarifário anual.

4. Análise e discussão dos resultados

4.1. Avaliação do potencial do biogás para conversão em energia elétrica

Aplicando-se a eq. 1 sobre os dados de biogás, que são de concentração de 65% de CH_4 e 35% de CO_2 , obtemos o valor de $PCID$, em kWh/m³. A produção total de biogás depende do percentual de DQO do esgoto tratado nos reatores UASB, que neste caso é de 65% de capacidade máxima. Devido ao desconto de 40% que está retido no lodo, são considerados 60% de biogás efetivamente ao MCI de biogás. E a cada kg de DQO gera 0,35 Nm³ de CH_4 .

A vazão média (Q média) para o mês de referência (maior demanda e consumo) foi de 1000 L/s em 2014, 2800 L/s em 2016 e estimativa de 4100 L/s em 2018. A DQO de entrada no UASB é de 498,150 mg/l, que levando em conta a Q por hora, obtêm-se o valor de DQO em kg/h.

Aplicando-se a eq. 3, obtemos o valor de PTB , em Nm³/h. Os resultados da eq. 1 e da eq. 3 são fatores para encontrar o valor da potência e energia gerada pelo motor a biogás, na eq. 2. A energia elétrica mensal disponível para consumo, considerando uma operação estável e ininterrupta da geração a biogás é encontrada na eq. 4.

A Tabela 5 mostra a evolução da produção de energia da ETE, a médio prazo, com referencia ao mês de maior demanda e consumo de energia elétrica no local.



Tabela 5 - Evolução da produção de energia

Grandezas	1000L/s (2014)	2800 L/s (2016)	4100 L/s (2018)
PCID(kWh/m ³)	6,476	6,476	6,476
DQO(kg/h)	1793,34	5021,35	7352,69
PTB(Nm ³ /h)	244,79	685,23	100.364,16
P _{mês} (kW)	396,32	1.109.387,37	162.489.575,04
E _{mês} (kWh/mês)	289.311,349	809.853,667	11.861.765,309

Fonte: Autores.

A ETE Serraria está liberada para operar com 4.130 L/s, 100% de sua plenitude, que permitirá chegar aos 80% de tratamento de esgotos em Porto Alegre/RS.

4.2 Análise de viabilidade financeira e econômica

Tomando os dados de energia elétrica consumida na ETE Serraria, temos que nas três horas ponta o custo de consumo é de R\$ 0,977 por kWh e no período fora ponta é de R\$ 0,216 por kWh, valores referentes das tarifas em dez/2014 para projeto inicial. O consumo global de energia elétrica foi de 376.698 kWh/mês. A projeção de disponibilidade de energia elétrica produzida pela instalação a biogás é de 289.311 kWh/mês. Esta quantidade é capaz de suprir cerca de 76,80% da energia elétrica consumida na ETE.

Decorrente do custo da energia elétrica da rede ser superior na hora ponta, pode-se inferir que a melhor utilização econômica para o biogás na geração de energia elétrica é o suprimento na totalidade durante a hora ponta, e o restante atende o consumo em horário fora ponta. Isso significa que se pode utilizar 32.538 kWh durante as horas ponta e 256.773 kWh no período fora ponta.

Com base nesta análise pode-se calcular o custo de energia elétrica evitado com a utilização do sistema proposto. Durante a ponta, evita-se o custo de R\$ 31.789,62 e no período fora ponta de R\$ 55.462,97, totalizando em torno de R\$ 87.252,59 ao mês.

A Tabela 6 mostra a evolução das tarifas de energia no país. Estimativas das tarifas de energia elétrica em 2018 visa um custo mensal de 39.566,20kWh durante as horas ponta e 103.593,96kWh no período fora ponta.

Tabela 6 - Evolução das tarifas de energia

Ano	Demanda (R\$/KW)		Consumo (R\$/KWh)	
	Ponta	Fora	Ponta	Fora
2014	0,00	0,201	0,997	0,216
2016	0,279	0,389	1,216	0,279
2018	1,042	0,301	1,404	0,522

Fonte: Autores.

O sistema proposto conta com a estimativa de custos de operação e manutenção (insumos e mão-de-obra) de R\$ 95.207,65 anuais, além de uma revisão geral do sistema a cada cinco anos, com custo de R\$ 238.019,11. Este valor corresponde a R\$ 333.226,76 em cinco anos ou R\$ 5.553,78 mensais. Para realizar a análise de *payback* simples, a qual



desconsidera o desconto ou recuperação de juros no tempo, efetuou-se o seguinte cálculo, com dados do sistema proposto e do custo de energia evitado, apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Payback simples

Variáveis	Valores (2014)
<i>Cft</i> - fluxo de caixa	R\$ (87.252,59 – 5.553,78)/mês
Investimento inicial	R\$ 4.437.989,28
<i>Payback</i> simples	54,34 ~ 55 meses

Fonte: Autores.

Porém, é importante verificar-se também a comprovação do retorno sobre o investimento confrontando-se com uma alternativa de investimento no mercado. Deve levar-se em conta a origem do financiamento do valor de investimento inicial.

Considerando a taxa de juros de 9% ao ano ou 0,75% ao mês, ao longo de 55 meses (4 anos e 7 meses) o valor de investimento inicial do sistema de biogás varia de R\$ 4.437.989,28 em dezembro de 2014 para R\$6.693.669,47 para julho de 2018, ou seja, acréscimo de R\$ 2.255.680,19 ao logo de 4 anos e 7 meses, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Investimento para implantação do projeto

Cenário	Ano	Investimento (R\$)
1	2014	4.437.989,28
2	2016	5.747.324,82
3	2018	6.693.669,47

Fonte: Autores.

As perspectivas de suprimento a médio prazo, a evolução do custo da energia e as estratégias de crescimento da oferta de energia leva em conta o impacto das mudanças climáticas nas vazões do afluente de esgoto e na biomassa, que influenciam na variabilidade na produção de energia.

5 Considerações finais

O estudo de caso permitiu avaliar a viabilidade técnica e econômica para a implantação de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido nos reatores anaeróbios da ETE Serraria. A análise do afluente de esgoto captado para a ETE Serraria possui composição média de 65% de CH_4 , sendo 60% livres para queima, que geram condições de geração elétrica a partir da conversão de energia mecânica, por meio de máquinas térmicas. Verificou-se que a tecnologia mais viável foi o motor de combustão de Ciclo Otto. Levantou-se a estrutura de equipamentos necessários e respectivas obras. O valor de investimento inicial para a instalação foi de R\$ 4.437.989,28 e o valor em gastos de manutenção e operação foi de R\$ 333.226,76, para cinco anos.



A vazão afluyente da ETE Serraria ainda não se estabilizou na sua capacidade de plena carga, isto é, estimativas do processo de *start-up* dos seus reatores. Espera-se que atinja a vazão de 4.115 L/s em quatro anos de operação (em dezembro de 2018). A viabilidade do sistema proposto deve aumentar, à medida que a vazão aproxima-se da máxima de projeto, pois os custos de manutenção e operação permanecem os mesmos, e o retorno sobre a compra de energia elétrica da rede aumenta.

A tarifa de energia elétrica avaliada foi de Dezembro de 2014, 2016 e 2018. Projeta-se que o custo de energia da rede poderá sofrer incrementos, devido a diminuição na produção hidroelétrica (mais barata) e necessidade de geração termoelétrica (mais cara), para compensar. Devido a esta condição, a geração própria de energia elétrica torna-se mais viável a medida que encarece a energia da rede. A partir da análise de *payback* simples pode-se concluir que o retorno sobre o investimento ocorre, no máximo, em 4 anos e 7 meses (segundo semestre de 2018). Considerando juros encontrados no mercado de 9% ao ano o retorno sobre o capital acontece no mesmo tempo.

Contudo, são esperadas grandes variações na produção de biogás conforme as estações do ano e devido ao despejo de altas cargas de água da chuva. Estes fatores influenciam na produção e conversão do biogás para menos. O despejo de água da rede pluvial em esgoto é irregular, porém uma realidade considerando o município de Porto Alegre/RS, que tenta diminuir as ligações clandestinas da rede através de campanhas de conscientização.

A relação de esgoto afluyente para biogás efluyente é de 1L para $6,8 \times 10^{-5}$ Nm³ de biogás (máxima capacidade). Logo, com a vazão máxima de 4100 L/s, é possível gerar 11.861.765,309 kWh/mês. A ETE Serraria foi projetada, considerando o crescimento populacional de Porto Alegre/RS, para o tratamento pleno, de até 4,1 mil litros de esgoto por segundo, em 2018.

Referências

Aisse, M. M. (2000). "Sistemas econômicos de tratamento de esgotos sanitários". Rio de Janeiro: ABRES, 192 p.

Bitton, G. (2005). Microbial indicators of fecal contamination: application to microbial source tracking. *Report submitted to the Florida Stormwater Association*, 719, 4-6.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa (2004). "Relatório de Atividades", Projeto ENER-BIOG, São Paulo: SP.

Chernicharo, C. A. L. (2001). "Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios", Projeto PROSAB, Belo Horizonte: MG, 544 p.



- Coldebella, A. (2006). "Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais". Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Agrícola). UNIOESTE, 75p., Cascavel: PR.
- Costa *et al.* (2001). "Produção de Energia Elétrica a partir de Resíduos Sólidos Urbanos – Análise Custo Benefício". URL: http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/v_en/Mesa4/10.pdf.
- DMAE (2009). "Departamento Municipal de Água e Esgotos". Projeto Executivo da 1ª etapa da Estação de Tratamento de Esgoto Serraria. URL: http://proweb.procempa.com.br/pmpa/prefpoa/pisa/usu_doc/edital__ete_serraria_parte_b.pdf.
- DMAE (2014). "Departamento Municipal de Água e Esgoto", Relatório de Consumo de Energia Elétrica. Porto Alegre: RS.
- França Junior, A. T. (2008). "Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UNESP, 148p., Ilha Solteira: SP.
- Glaister, B. J., *et al.* (2017). "Interactions between design, plant growth and the treatment performance of stormwater biofilters". *Ecological Engineering*, v. 105, p. 21-31.
- Iannicelli, A. L. (2008). "Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira". Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). UNITAU, 83p., Taubaté: SP.
- Moreira, L. (2014). "Cooperação: O caminho para o acesso universal ao saneamento". In 5º Encontro Nacional das Águas. Apresentação oral, Sindicato Nacional das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto (SINDCON).
- Oliveira, P. A. V.; Higarashi, M. M. (2006). "Geração e utilização de biogás em unidades de Produção de suínos". Embrapa suínos e aves, Concórdia/SC, 42 p.
- Pereira, R. S. (2004). "Poluição Hídrica: causas e consequências". *ReRH: Revista Eletrônica de Recursos Hídricos*, v. 1, n. 1, pp.20-36.
- Perovano, T. G.; Formigoni, L. P. A. (2011). "Geração de Energia a Partir de Subprodutos do Tratamento de Esgotos Sanitários". Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental). UFES, 101 p., Vitória: ES.
- Salama, E., *et al.* (2017). Recent progress in microalgal biomass production coupled with wastewater treatment for biofuel generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 79, p. 1189-1211.
- SEMAE. Serviço Municipal Autônomo de Água e Esgoto (2011). "Estudo Técnico de Viabilidade – Cogeração de Energia a partir de Biogás e do Lodo Proveniente de Reatores Anaeróbios da ETE Rio Preto". São José do Rio Preto: SP, 42 p.
- Souza, S. N. M.; Pereira, W. C.; Pavan, A. A. (2004). "Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura", *Acta Scientiarum Technology*, v. 26, n. 2, pp.127-133.
- Trevisan, L. Y. I., & Orssatto, F. (2017). "Tratamento de Águas Residuárias e Mecanismos de Gestão Hídrica de uma Universidade em Foz do Iguaçu/PR". *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade-GeAS*, 6(3), 118-130.



Waiss, T. C. F.; Posseti, G. R. C (2015). Influência de eventos de chuva na produção de biogás de reatores anaeróbios alimentados com esgoto doméstico. In: *28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Anais 2015.

Zilotti, H. A. R. (2012). "Potencial de produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto de Cascavel para a geração de energia elétrica". Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura). UNIOESTE, 52 p., Cascavel: PR.