

Geração de eletricidade com biogás: estudo de viabilidade em estação de tratamento de esgoto no Paraná

Electricity generation using biogas: study of feasibility in sewage treatment station in Paraná

Generación de biogás electricidad: un estudio de viabilidad en una estación de tratamiento de aguas residuales de Paraná

Recebido: 03/12/2021 | Revisado: 11/12/2021 | Aceito: 15/12/2021 | Publicado: 22/12/2021

Karl Haruo Kimura de Moraes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3158-1576>
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil
E-mail: karlharuo87@gmail.com.br

Samuel Nelson Melegari de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3581-902X>
Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil
E-mail: ssouza@unioeste.br

Resumo

A geração distribuída de energia elétrica produzida a partir de resíduos orgânicos trata-se de uma alternativa que demanda uma análise cuidadosa, devido aos inúmeros fatores econômicos e ambientais associados a esse processo de produção. Considerando que toda atividade humana consome recursos naturais e ao final dessa resultam rejeitos, o esgoto urbano apresenta aspectos que o classifica como resíduo de elevado poder poluidor, sendo o seu tratamento necessário para a manutenção da sustentabilidade da sociedade e do meio ambiente, uma vez que remove os poluentes da água anteriormente utilizada, devolvendo-a aos corpos hídricos em boas condições, bem como pode-se gerar biogás se empregado um processo anaeróbico controlado. O biogás oferece um potencial para geração de energia elétrica, exigindo, assim, uma avaliação da viabilidade econômica da utilização de moto-gerador para o aproveitamento desse recurso natural nos reatores UASB já instalados nas estações de tratamento de esgoto. O levantamento do VPL e o LCOE surgem como ferramentas apropriadas. O estudo avaliou o volume de esgoto tratado de algumas cidades do Estado do Paraná, principalmente a relação entre a quantidade de população atendida com o esgotamento sanitário e o seu potencial de produção de biogás, e conseqüentemente, o seu potencial de geração de energia elétrica. O método de avaliação apontou o biogás como recurso energético viável economicamente, conforme o resultado da cidade de Curitiba que obteve o VPL de 87.834.069,69 reais, uma TIR de 18,04% a.m. com payback de 5 meses, assim como o seu valor de LCOE de 34,53 R\$/MWh.

Palavras-chave: Estação de tratamento de esgoto; Biogás; Geração de eletricidade; Avaliação econômica.

Abstract

The distributed generation of electricity produced from organic waste is an alternative that requires careful analysis, due to the numerous economic and environmental factors associated with this production process. Considering every human activity consumes natural resources and in the end it results in tailings, urban sewage has aspects which classify it as a waste of high polluting power, and its treatment is necessary to maintain the sustainability of society and the environment, once it removes pollutants from previously used water, returning it to water bodies in good condition, as well as generating biogas if a controlled anaerobic process is used. Biogas offers a potential for electricity generation, thus requiring an assessment of the economic feasibility of using motor generators to take advantage of this natural resource in UASB reactors already installed in sewage treatment plants. The survey of the NPV and the LCOE emerge as appropriate tools. The study evaluated the volume of treated sewage in some cities in the State of Paraná, mainly the relationship between the amount of population served with sewage and its potential for biogas production, and consequently, it's potential for generating electricity. The evaluation method identified biogas as an economically viable energy resource, according to the result of the city of Curitiba, which obtained a NPV of 87,834,069.69 reais, an IRR of 18.04% am with a 5-month payback, as well as its LCOE value of 34.53 R\$/MWh.

Keywords: Sewage treatment plant; Biogas; Electricity generation; Economic evaluation.

Resumen

La generación distribuida de electricidad producida a partir de residuos orgánicos es una alternativa que requiere un análisis cuidadoso, debido a los numerosos factores económicos y ambientales asociados a este proceso de producción. Considerando que toda actividad humana consume recursos naturales y al final de ella resulta en relaves,

el alcantarillado urbano presenta aspectos que lo catalogan como un residuo de alto poder contaminante, y su tratamiento es necesario para el mantenimiento de la sustentabilidad de la sociedad y el medio ambiente, ya que elimina los contaminantes del agua utilizada anteriormente, devolviéndola a los cuerpos de agua en buen estado, además de generar biogás si se utiliza un proceso anaeróbico controlado. El biogás ofrece un potencial para la generación de electricidad, por lo que requiere una evaluación de la viabilidad económica de utilizar motores generadores para aprovechar este recurso natural en los reactores UASB ya instalados en las estaciones de tratamiento de aguas residuales. La encuesta del VPN y el LCOE surgen como herramientas adecuadas. El estudio evaluó el volumen de aguas residuales tratadas en algunas ciudades del Estado de Paraná, principalmente la relación entre la cantidad de población servida con alcantarillado y su potencial para la producción de biogás, y en consecuencia, su potencial para generar electricidad. El método de evaluación identificó al biogás como un recurso energético económicamente viable, según el resultado de la ciudad de Curitiba, que obtuvo un VPN de 87.834.069,69 reales, una TIR de 18,04% am con una amortización de 5 meses, así como su valor LCOE de 34,53 R\$/ MWh.

Palabras clave: Planta de tratamiento de águas residuales; Biogás; Generación eléctrica; Evaluación econômica.

1. Introdução

Historicamente, a energia sempre atuou como fator preponderante no desenvolvimento das civilizações. O avanço da urbanização favoreceu o consumo predatório dos recursos naturais potencializado pela busca por novas fontes energéticas capazes de sustentar o estilo de vida emergente (Pereira et al., 2012).

A demanda por energia elétrica é crescente em todo mundo, uma vez que o aumento populacional, a dependência a cada vez maior em equipamentos elétricos, que satisfazem diversas necessidades, e a importância da energia elétrica para o crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) tem despertado o interesse das nações em formas alternativas de geração de energia elétrica, dentro de um contexto sustentável e não poluente (Pereira et al., 2012).

Todo resíduo orgânico, seja ele de origem agrícola, pecuária, industrial, residencial ou dos comércios em geral, se sujeito a um processo de digestão anaeróbia controlada, gera como produto o biogás. Composto por 50 a 75% de metano, o biogás pode ser utilizado para gerar energia, biometano, ou ser queimado para atender a uma demanda térmica (Brasil, 2015), (Bley, 2015).

No percorrer de milhares anos, a biomassa atendia a grande parte das necessidades de energia da humanidade. No entanto, com a introdução do uso de combustíveis fósseis, nos meados do século XIX, a sua utilização decaiu nos países industrializados (Klass, 1998). Com isso, surgiu o carvão sendo a principal fonte primária de na matriz energética mundial, sendo extrapolado pelo petróleo na década de 1960. Entretanto, a biomassa voltou a ser vista após dos choques do petróleo na década de 1970 como um recurso energético viável e doméstico, com grande potencial para amortizar a dependência do petróleo (Smil, 2002).

A maior proeminência das fontes renováveis seria a biomassa, consiste que essa parcela correspondente alterou com o decorrer do tempo, sendo mesclado no seu momento inicial somente por carvão vegetal e lenha, e presentemente se constitui em parte com etanol de cana, biodiesel e dejetos de animais (Carvalho, 2021).

Por distintas rotas tecnológicas, moldadas as diversas características físicas e químicas das matérias-primas e da utilização requerida, são utilizadas para transformar a biomassa em um produto energético final. Em meio às tecnologias utilizadas para a exploração da energia da biomassa, a digestão anaeróbica está ganhando espaço na utilização por consentir a recuperação da energia a partir do aproveitamento do biogás e nutrientes, bem como prevenir a poluição ambiental (IEA, 2005).

É notório que umas das fontes renováveis de energia que tem potencial para contribuir com a diversificação da matriz energética nacional é o biogás, assim como poderá reduzir a necessidade de construir grandes centrais elétricas convencionais. Os referidos empreendimentos causam impactos sociais em razão da área ocupada por eles, a proximidade com as áreas urbanas, dentre outros fatores. Do mesmo modo, em torno de 13,5% da energia brasileira é desperdiçada entre geração e

consumo, assim como aproximadamente 70% desse total costuma ser perdido no sistema de distribuição (Currado, 2015). O Brasil evidencia como vantagens para a utilização do biogás como fonte energética a grande quantidade de matéria orgânica de qualidade e o clima adequado, tornando-se uma geração local tendo uma perda reduzida (Furtado, 2010).

Com o aumento do consumo de recursos, a urbanização também culminou no aumento da emissão de resíduos e efluentes. Dentre eles, pode-se destacar o volume crescente de esgoto doméstico gerado. A deficiência no tratamento do esgoto doméstico (efluentes líquidos residenciais) é um problema que atinge todo o Brasil (Costa, 2006). Com base no levantamento do (SNIS, 2018), apenas 46% do esgoto no país passa por algum tipo de tratamento. Há ainda 35 milhões de brasileiros sem acesso à água tratada, o que equivale a 17% da população.

No entanto, o esgoto doméstico não deve ser considerado apenas como um causador de impactos ambientais, mas também como uma alternativa na geração de energia de forma renovável. A partir da degradação anaeróbia da matéria orgânica contida em materiais residuais como resíduos sólidos urbanos, dejetos de animais, efluentes industriais e esgoto sanitário é gerado um gás combustível chamado comumente de biogás (Pecora, 2006).

Para a produção de biogás, pode ser utilizada a matéria orgânica proveniente de resíduos sólidos, esgotos domésticos e resíduos rurais, como subprodutos agroindustriais e dejetos pecuários (CETESB, 2006). O aproveitamento energético de resíduos do processo de tratamento do esgoto objetiva a melhoria do desempenho global dele, reduzindo a emissão de gases efeito estufa, incentivando para aumentar a eficiência energética da estação de tratamento e, conseqüentemente, a viabilidade do saneamento básico do país.

A geração de biogás pela digestão anaeróbia é a forma eficaz de tratamento de resíduos, pois possuem parcela de contribuição para a redução da emissão de gases do efeito estufa. Com o custo baixo de montagem e operação destes biodigestores é uma conveniência, pois tal pode o potencial de geração de eletricidade e biofertilizantes, mitigando os custos da utilização dos mesmos (Santos, et al., 2020).

A biodigestão anaeróbia é o processo de decomposição de matéria orgânica por organismos vivos (bactérias) em um meio no qual há ausência de oxigênio. Extremamente importante para a realização de atividades como o tratamento de resíduos (Estações de Tratamento de Esgoto), a digestão anaeróbia é também usada para a geração de biogás (por meio da decomposição de matéria orgânica em biodigestores), uma opção de combustível, principalmente para residências em meio rural (Chernicharo, 2007).

A utilização do biogás como fonte primária para geração de energia elétrica também colabora com a redução das emissões de gases de efeito estufa, já que o biogás gerado pela decomposição anaeróbia de matéria orgânica é composto, em sua maior parte, por metano, que contribui 21 vezes mais para o efeito estufa que o dióxido de carbono (CETESB, 2006), (Bley, 2015). Além de metano, o biogás tem em sua formação dióxido de carbono e, por volta de 1 a 5% de gases traços, dentre eles o ácido sulfídrico (Bley, 2015), (Coelho, 2006). Assim, nota-se que a utilização do biogás como fonte primária de energia, além do potencial econômico, possui também um grande potencial de caráter ambiental, mostrando que os benefícios de seu uso devem ser analisados de uma maneira global, a fim de se considerar todos os aspectos envolvidos.

Nesse contexto, faz-se necessária o estudo que englobe aspecto de potencial de geração de biogás e a geração eletricidade em estações de tratamento de esgoto urbano sendo, então, realizada uma avaliação econômico-financeira de sua geração e utilização (Coelho, 2006).

O objetivo do trabalho de pesquisa é avaliar o potencial de geração de biogás e o seu uso para fins energéticos, compensação no consumo da própria estação de tratamento de esgoto urbano do estado do Paraná e elaborar uma viabilidade econômica no âmbito de Resolução Normativa ANEEL 482/2012.

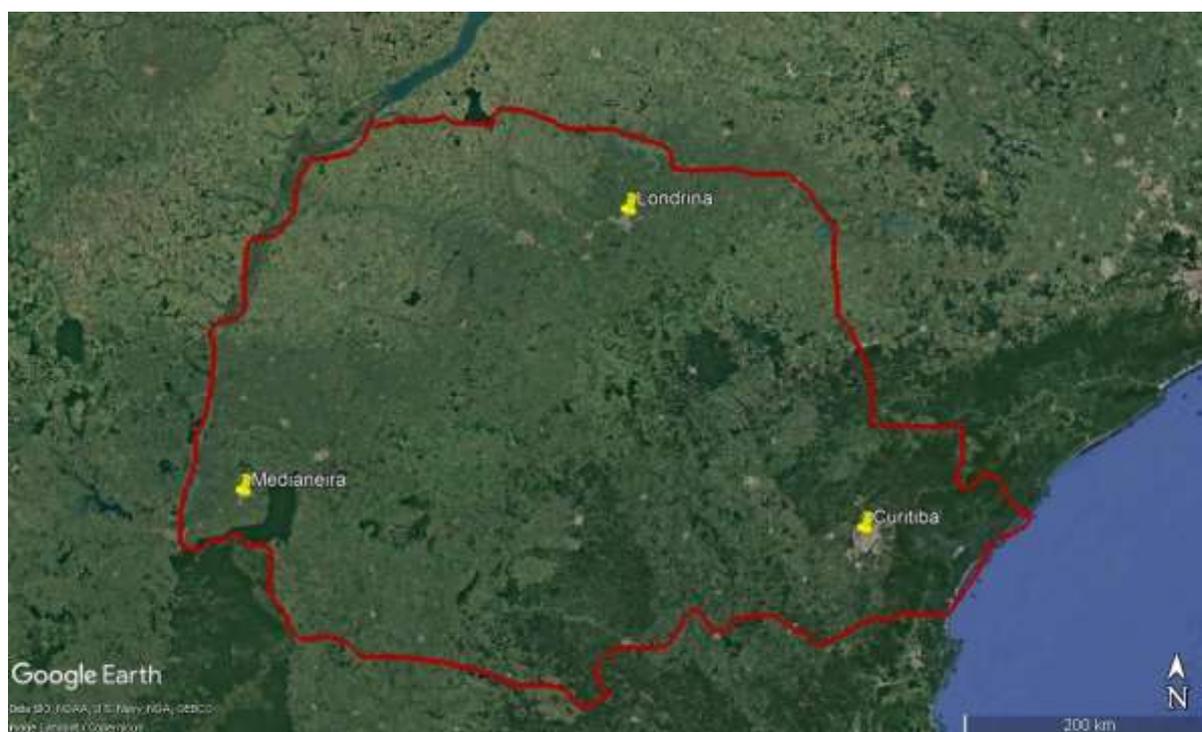
2. Metodologia

Trata-se de um estudo descritivo exploratório com abordagem quantitativa com viés qualitativo com obliquidade qualitativo como recomendado por (Shitsuka et al., 2018), que esse estudo, além disso, é de caráter bibliográfico, que compõe de um estudo de casos, o qual a metodologia aplicada é baseada na energia e na economia gerada pela implantação de motores geradores utilizando biogás como combustível em estações de tratamento de esgoto para diferentes populações atendidas, obter uma análise completa dos parâmetros em função da população e a geração de energia elétrica. A seção a seguir detalha cada etapa desta metodologia.

2.1 Localizações populacionais e cálculo da geração de resíduos

Os cálculos foram realizados para 3 conjuntos de dados populacionais, sendo elas as cidades de Medianeira, Londrina e de Curitiba com respectivamente 14.981, 563.832 e 1.916.994 população atendida com esgotamento sanitário, como exposto na Figura 1. Referenciados ao Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (2018).

Figura 1 - Localidades de estudo no estado do Paraná.



Fonte: Google Earth.

A identificação das cidades de estudo em suas posições geográficas no estado do Paraná representado na Figura 1.

Um habitante consome em média 200 Litros de água por dia, sendo que 80% se tornam esgoto, ou seja, tem-se uma taxa de produção de esgoto de 160 litro/dia por habitante, de acordo com a (NBR 7229, 1997), (França, 2008).

No estado do Paraná, no ano 2018, o total de habitantes atendidos com o fornecimento de água foi de 9.965.721 habitantes, gerando um consumo de 186,04 litros por habitante ao dia e para o esgoto coletado atingindo 129,73 litros por habitantes ao dia. Tem-se um percentual de conversão de esgoto de 69.73% (SNIS, 2018), seguem abaixo:

Tabela 1 - Lista de cidades do Paraná para o estudo e volume de esgoto coletado.

Escala	Cidades	População total atendida com esgotamento sanitário	Volume de esgoto coletado (1000m ³ /ano)	Volume de esgoto coletado (L/hab.dia)
Baixa	Medianeira	14.981	827,7	151,37
Média	Londrina	563.832	31.696,63	154,02
Alta	Curitiba	1.916.994	102.513,55	146,37

Fonte: Autores (2020); (SNIS, 2018).

Na Tabela 1, é importante observar que algumas variáveis que expressa à quantidade de população ela aumenta conforme o tamanho da cidade, porém a variável de que expressa quantidade de esgoto por habitante não tem uma variação expressivo, podendo então considerar a sua média como constante.

2.2 Carga Orgânica de esgoto afluente de ETEs e eficiência de remoção

Neste estudo, foram constituídas escalas de ETEs, assumindo que elas sejam estações de tratamento de esgotos com reatores UASB. Equivale a uma estação de tratamento para 1.000.000 de habitantes necessita de 20 reatores tipo UASB (França, 2008).

O sistema de tratamento de esgoto com o reator tipo UASB, tem a demanda química de oxigênio (DQO) de esgoto afluente e a eficiência de remoção de DQO no tratamento demonstrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados de DQO e eficiência de remoção de DQO em reatores tipo UASB.

Referências	DQO afluente (mg/L)	Eficiência de remoção de DQO (%)
(Tachini, Belli, & Piheiro, 2002).	481,7	66
(Lopes, 2015).	631,8	77
(Metcalf, & Eddy, 2003).	491,3	80
(Oliveira & Von Sperling, 2005).	714,0	77
(Zilotti, 2012).	572,9	84
(Matsuura, Hatamoto, Smunino, Syutsubo, Yamaguchi, & Ohashi, 2015).	335	83
(Khan, Gaur, Tyagi, Khursheed, & Lew, 2001).	503	70
(Van, & Lettinga, 1994).	563	67
(Lettinga, & Hulshoff, 1991).	402	74

Fonte: Khan (2011).

Tendo como parâmetros, conforme a Tabela 2, que a DQO de esgoto varia de 714 a 335 mg/L, e que este valor tem essa diferença em função do tipo de esgoto, ou seja, esgotos com percentual maior derivam de esgoto industrial tendo uma concentração maior de DQO. Portanto, obteve-se uma média de 521.63 mg/L de DQO no afluente, e a eficiência de remoção de DQO, obteve-se uma média 75,33%, com base nos dados apresentados pelos autores referenciados na Tabela 2.

2.3 Cálculos de produção de biogás

É preciso determinar o potencial de produção de biogás de um reator UASB, que está baseado na demanda química de oxigênio (DQO), transformado pelo reator e sua conversão em metano (CH₄) denominada de DQO_{CH4}. Para tanto, utilizou-se a Equação 1 (Chernicharo, 2007). Onde: Q = Vazão do esgoto afluente (m³/dia); S_0 = DQO afluente (kg DQO/ m³); S = DQO efluente (kg DQO/ m³); Y_{abs} = Coeficiente de produção de sólidos no sistema, em termos de DQO (0,11 a 0,23) kg DQO_{lodo}/DQO_{aplicada}); o índice S , usa a equação 2 que está em função da eficiência da remoção do reator (E).

$$DQO_{CH_4} = Q \cdot (S_0 - S) - Y_{abs} \cdot Q \cdot S_0 \quad (1)$$

$$S = (1 - E) \cdot S_0 \quad (2)$$

A partir dos resultados obtidos acerca das variáveis, é possível dar continuidade para calcular a conversão da massa do metano em volume de metano produzido, representando pela equação (4 e 5), sugerida em (Chernicharo, Van, Noyola, & Bressani, 2015). Onde: Q_{CH_4} = Produção volumétrica de metano (m^3 /dia); $K(t)$ = Fator de correção para a temperatura operacional do reator ($kgDQO/m^3$); onde $K(t)$ é representado pela equação (4); P = Pressão atmosférica (1 atm); k = DQO correspondente a 1 mol de CH_4 (64 $gDQO/mol$); R = Constante dos gases (0,08206 $atm.L/mol.K$); t = Temperatura operacional do reator ($^{\circ}C$);

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (3)$$

$$K(t) = \frac{P \cdot k}{R \cdot (273 + t)} \quad (4)$$

2.4 Estimativas do potencial de geração de eletricidade

Levando em conta o uso de motores geradores e a combustão interna para o potencial de geração de energia elétrica, estabelecendo-se cenários com diferentes eficiências de conversão, a eficiência de geração de eletricidade utilizada foi referente aos motores geradores, sendo considerados 20% e 30% da eficiência para motores fabricados no Brasil (Pipatmanomai et al., 2009).

O valor do poder calorífico do biogás pode ser obtido com a porcentagem de concentração do metano na mistura, sendo que essa pode variar de 50 a 80%, (Delazare, 2004), (Oliveira, 2009). O Poder calorífico inferior do biogás é de 6,5 kWh/m^3 , para uma concentração do metano de 65% na mistura. No biogás purificado (biometano), pode chegar ao valor de 9,5 kWh/m^3 , (Oliveira, 2009).

A Equação (5) determina a potência elétrica de geração em função da produção de biogás em uma estação de tratamento de esgoto. Onde: PT_E = Potência de geração de eletricidade (kW); P_B = Quantidade média de biogás captada na estação de tratamento (m^3/h); PCI = Poder calorífico do biogás (kWh/m^3); η_E = Eficiência de conversão de biogás em energia elétrica (0-1.0);

$$PT_E = P_B \cdot \eta_E \cdot PCI \quad (5)$$

2.5 Cálculos de viabilidade econômica

Para as considerações econômicas deste estudo, duas variáveis foram usadas como parâmetros de avaliação, sendo utilizadas conforme o tamanho da população: Valor Presente Líquido (VPL) e Custo Nivelado de Eletricidade (LCOE). Além disso, os custos de investimento correspondentes à aquisição e a instalação do equipamento também foi considerada.

As equações (6) e (7) permitem os cálculos para a verificação da viabilidade econômica da implementação do sistema de motores geradores, foi utilizado o Valor Presente Líquido (VPL) e a Taxa Interna de Retorno (TIR) (Abdallah et al., 2018). Inicialmente, foi estruturado o fluxo de caixa, ou seja, o somatório de todos os custos e receitas em cada período. Em seguida, foi descontado o valor anual pela taxa mínima de atratividade (TMA), sendo o somatório destes valores anuais descontados iguais ao valor presente líquido (Casarotto, & Kopittke, 1994).

O VPL é a diferença entre o valor investido e o valor resgatado ao fim do investimento, trazidos ao valor presente. Se o VPL for positivo, então, o valor investido será recuperado e haverá um ganho. Se o VPL for zero, significa que aplicar não fará diferença. Agora, caso o VPL seja negativo significa que o investido resgatará um valor menor, então, não se deve aplicar neste investimento (Casarotto, & Kopittke, 1994).

$$VPL = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (6)$$

Onde: VPL = Valor presente líquido; I_0 = Investimento inicial na planta; FC_t = Fluxo de caixa no período; i = Taxa de juros em % a.m.; n = Número de períodos (mês);

A TIR é a taxa que relaciona o valor investido com valor resgatado ao fim do investimento. Ou seja, a taxa necessária para que o VLP seja igual a zero (Casarotto, & Kopittke, 1994).

$$TIR = i^* \rightarrow VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i^*)^t} = 0 \quad (7)$$

Os analistas criaram, há décadas, uma abordagem que tenta integrar algumas das principais variáveis de custo das tecnologias de geração. Ela é chamada de “Levelized Cost of Energy” (LCOE). É uma medida usada para avaliar e comparar métodos alternativos de produção de energia. O LCOE de um ativo gerador de energia pode ser apreciado como o custo total médio de construção e operação do ativo, por unidade de eletricidade total gerada ao longo de uma vida útil presumida (Branker et al., 2011).

O LCOE é citado como uma medida conveniente da competitividade de diferentes tecnologias de geração. Ele representa o custo por megawatt-hora, em unidades monetárias descontadas, da construção e operação de uma usina geradora durante todo seu ciclo de vida útil econômica (Rangel, 2016).

O cálculo do custo nivelado de energia no Brasil é realizado pela metodologia proposta por (Nakabauashi, 2015) e (USA, 2018).

Este valor, dado em R\$/MWh, é comparado ao preço da tarifa de energia elétrica vigente a fim de julgar a sua viabilidade com base no horizonte da vida útil dos sistemas.

O LCOE pode ser calculado tomando primeiro o valor presente líquido do custo total da instalação e operação do ativo gerador. Esse número é, então, dividido pela geração total de eletricidade ao longo de sua vida útil. Apresentado na equação (9).

$$LCOE = \frac{\sum_t^n \frac{I_t + M_t + F_t}{(1+r)^t}}{\sum_t^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (8)$$

Onde: I_t =Despesas de investimento no ano t (R\$); M_t =Despesas de operação e manutenção no ano t (R\$); F_t =Despesas com combustível no ano t (R\$); E_t =Geração de eletricidade no ano t (MWh); n =Vida do sistema (anos); r = Taxa de desconto (% a.a.);

Por meio do ganho com a compensação da energia, atendendo à NR 482/2012 de ANEEL, foi possível obter o payback e taxa interna de retorno, pois estes dois parâmetros são obtidos quando o VPL é nulo.

Para efeito de cálculo do custo de geração de eletricidade, foram estabelecidos parâmetros econômicos. Sendo assim, um dos dados é o custo do sistema de geração de eletricidade, com a participação de valores de custo da Empresa Biogás Motores Estacionários LTDA. Com isso, foi constituída uma linha de tendência que tem como função o tamanho de geração da planta, sendo então apresentada a equação (9) do custo específico (R\$/kW). Onde: P =Potência do sistema de motor gerador estimada para unidade de tratamento (kW); C_g =Custo específico (R\$/kW).

$$C_g = 700 + 2002,6.P^{-0,106} \quad (9)$$

Para efeito de cálculo do VPL de aproveitamento de biogás para geração própria de energia, adotou-se a tarifa da Resolução ANEEL nº 2.559 de 18 de junho de 2019, correspondente à tarifa horo-sazonal verde, subgrupo A4, a qual é cobrada pela COPEL (Companhia de Energia Elétrica do Paraná), cujos valores são de 1,28701 R\$/kWh na ponta e 0,33929 R\$/kWh fora de ponta. Com isso, foi possível estabelecer um ganho monetário pela ETE ao evitar comprar energia da CE (Companhia Energética). Vale frisar que o referido ganho foi considerado porque a ETE é uma taxa mensal no horário de ponta (3 horas por dia) e horário fora de ponta (21 horas por dia).

3. Resultados e Discussão

3.1 Cálculos da quantidade de esgoto por habitantes

Para o cálculo da vazão de esgoto efluente na ETE, foram utilizados os valores da população atendida com esgotamento sanitário e os dados acerca da quantidade de esgoto coletado, sendo que se calcula a produção de resíduos e esgotos por dia (SNIS, 2018), como segue na Tabela 3.

Tabela 3 - Vazão de esgoto afluente por quantidade de habitantes.

Cidades	População total atendida com esgotamento sanitário	Vazão de Esgoto Afluente (Q), (m ³ /dia).
Medianeira	14.981	2.267,67
Londrina	563.832	86.840,08
Curitiba	1.916.994	280.859,04

Fonte: Autores (2020).

Na Tabela 3, deve ser observada a proporção de esgoto produzido em relação à quantidade de população total atendida, para constituir a quantidade de esgoto acumulado para estabelecer o potencial de geração de biogás em casa cidade.

3.2 Cálculos da vazão de metano

Utilizando a equação (4) e os valores de: Pressão atmosférica (P) = 1 atm; DQO correspondente a 1 mol de CH_4 (k) = 64g DQO/mol; Constante dos gases (R) = 0,08206 atm.L/mol.K; Temperatura operacional do reator (T) = 30 °C, obtém-se Fator de correção para a temperatura operacional do reator ($K(t)$) = 2.57398394 kg DQO/m³.

Estimando-se o fluxo de DQO efetivamente removido pelo reator, DQO efluente (S) = 0,1225 kg DQO/m³ com a equação (2). E a média dos dados de DQO efluente (S_o) = 0,5216 (kg DQO/m³) e eficiência de remoção de DQO (E) = 75,33%,

O potencial de produção de biogás de uma ETE é baseado na quantidade da demanda química de oxigênio (DQO) removida pelo reator e sua conversão em metano (CH_4), sendo chamada de DQO_{CH_4} . A vazão de metano (CH_4) é obtida com a equação (3), que faz a relação de DQO_{CH_4} com o fator de correção para a temperatura operacional do reator. Para efetuar os cálculos, foi considerada a concentração do metano na mistura bruta de 65% e Coeficiente de produção de sólidos no sistema de 0,23 (Kg DQO_{lodo}/Kg DQO_{aplicada}), (Oliveira, 2009).

Através da Equação (1), os valores do potencial de produção de metano para todas as cidades de referência foram obtidos e podem ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Potencial de produção de metano.

Cidades	População total atendida com esgotamento sanitário	Vazão de Esgoto Afluente (Q), (m ³ /dia).	DQO _{CH₄} (kg/dia)	Q _{CH₄} (m ³ /dia)	Q _{biogás} (m ³ /dia)
Medianeira	14.981	2267,67	619,008	240,486	369,979
Londrina	563.832	86840,08	23704,800	9209,381	14168,279
Curitiba	1.916.994	280859,04	76666,296	29785,071	45823,187

Fonte: Autores (2020).

Na Tabela 4, identifica a vazão de biogás e a sua proporção de metano no gás referente a todas as cidades referidas.

3.3 Estimativas da produção de biogás e potência gerada na ETE

Com a vazão de CH_4 calculada, pode-se, então, estimar o potencial de geração de energia elétrica, usando a equação 5, sendo o poder calorífico do biogás de 6,5 kWh/m³ para a mistura com concentração de metano de 65% (Oliveira, 2009).

Com a vazão de CH_4 e a porcentagem de CH_4 removida, têm-se a vazão de biogás em m³/dia que deve ser transformada em m³/h e com eficiência de conversão de 20% e 30% para se estimar o potencial de produção de energia elétrica pela unidade de tratamento de esgoto, tendo como especificação do equipamento em kW, demonstrada na Tabela (5).

Tabela 5 - Potencial de produção de metano e biogás para cada localidade estudada.

Cidades	População total atendida com esgotamento sanitário	Q _{biogás} (m ³ /dia)	Q _{biogás} (m ³ /h)	P 20% (kW)	P 30% (kW)
Medianeira	14.981	369,979	15,416	19,980	29,971
Londrina	563.832	14.168,279	590,345	765,146	1.147,719
Curitiba	1.916.994	45.823,187	1.909,299	2.474,643	3.711,965

Fonte: Autores (2020).

É possível observar, na Tabela (5), o quanto a estimativa de biogás a produzido, e como esse biogás deve ser utilizado para gerar energia elétrica. Sendo que em Medianeira representada com escala baixo com 14.981 habitantes atendidos com

esgotamento sanitário tem potencial de produção de biogás de 15,416 m³/h e uma estimativa de potencial de energia elétrica de 19,98 kW para 20% de eficiência e 29,971 kW para eficiente 30%. O patamar médio por habitante atendido de 563.832, que é representado pela cidade de Londrina, tem estimativa de 590,345 m³/h, bem como potencial de geração de 20% e 30% de 765,146 kW e 1.147,719 kW, respectivamente. O patamar alto, representado pela cidade de Curitiba, com 1.916.994 habitantes atendidos em razão do esgotamento sanitário, atingiu a produção de biogás de 1.909,299 m³/h. Com esse nível de produção de biogás, estima-se que o potencial de geração de energia elétrica alcance os níveis de 2.474,643 kW para 20% e eficiência e 3.711,965 kW para 30% de eficiência dos equipamentos de geração de energia.

No ano de 2018, o consumo de energia elétrica em sistema de esgotamento sanitário por horas foi de 615,12 kWh para cidade de Londrina e 2.691,56 kWh para cidade de Curitiba (SNIS, 2018). Portanto, o potencial de geração de energia elétrica com 20% de eficiência chega próximo de atender o consumo, porém a geração de 30% de eficiência provê a energia elétrica com sobras para que possa ser reaproveitada em outros consumos, como o tratamento de água.

3.4 Valores presente líquido

Para os cálculos do valor presente líquido, foram estabelecidos os parâmetros com base na Tabela (6), assim como utilizadas as informações das estimativas de estação de tratamento de esgotos calculadas anteriormente.

A Tarifa da Resolução ANEEL nº 2.559 de 18 de junho de 2019, que apresenta correspondência com a tarifa horazonal verde, subgrupo A4, é cobrada pela COPEL (Companhia de Energia Elétrica do Paraná), cujos valores são de 1,28701 R\$/kWh na ponta e 0,33929 R\$/kWh fora de ponta. Com isso, pode ser estabelecido um ganho monetário pela ETE ao evitar comprar energia da CE (Companhia Energética), esse ganho foi considerado levando em conta que a ETE é taxada mensalmente no horário de ponta (3 horas por dia) e horário fora de ponta (21 horas por dia), com as tarifas mostradas na Tabela 6.

Tabela 6 - Variáveis para o cálculo de VPL.

Variáveis	Valores
Tarifa na Ponta	1,28701 R\$/kWh
Tarifa Fora de ponta	0,33929 R\$/kWh
Hora de trabalho efetivo ao ano	8.000 h
Horas na ponta em 30 dias	59,523 h
Horas fora de ponta em 30 dias	607,143 h
Despesas de operação e manutenção em percentual do investimento inicial.	4% a.a. (0,33% a.m.)
Taxa de desconto (d) ao mês	1% a.m.
Período (n) em meses	240 meses

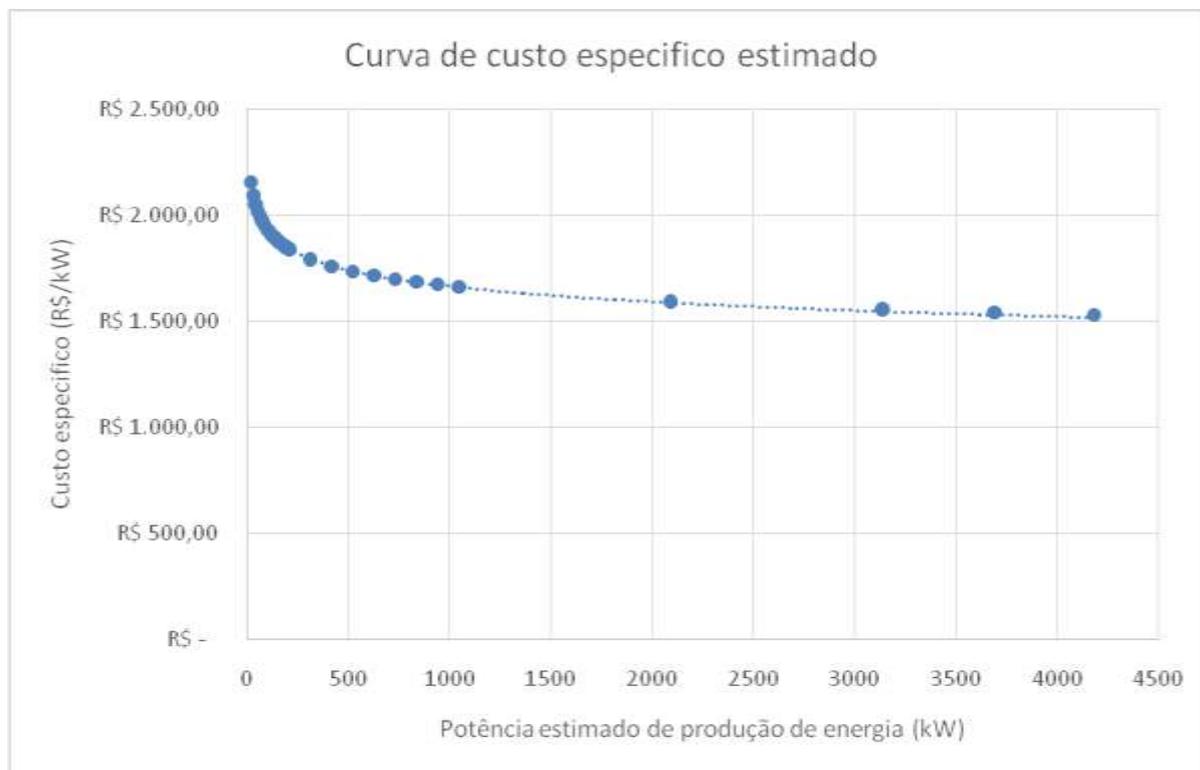
Fonte: Autores (2020).

Na Tabela 6, é importante observar que as variáveis o custo da energia e a quantidade de horas trabalhadas para podemos estabelecer a quantidade de energia economizada para podemos estabelecer o VPL no período e taxa conforme estabelecido na tabela.

Por meio das ponderações obtidas na RN 482/2012 ANEEL, pode-se prever o gasto total que a ETE teria ao comprar energia da concessionária de energia elétrica local. Utilizando-se os dados de custo de sistema de geração de eletricidade com a

Empresa Biogás Motores Estacionários LTDA, quando se tem os custos específicos (R\$/kW) da potência do equipamento representado na equação (9) e demonstrado na Figura 7.

Figura 7 - Curva de custo específico do sistema por sua capacidade de geração.



Fonte: Autores (2020).

A Figura 7 representa o resultado da equação (9), da curva de custo específico do sistema de geração de energia elétrica calculado para todas as variações de capacidade de produção de biogás das ETE, proporcional ao número de habitantes atendidos pela ETE. Consegue-se observar que quanto maior for à capacidade do sistema de geração ocorre uma queda do seu valor específico, comparando com os de baixa capacidade tornando o custo mais acentuado.

Conforme o a eficiência do motor gerador for selecionado estabelece o potencial de geração e o seu custo, obtendo por as vez o valor de investimento para implementar o sistema de geração de energia por biogás, conforme a demonstrada na Tabela 7.

Tabela 7 - Variáveis para o cálculo de VPL.

Cidades	Eficiência do motor gerador	Potencial de geração (kW)	Custo Específico (R\$/kW)	Investimento (R\$)
Medianeira	20%	19,98	2.157,91	43.115,87
	30%	29,97	2.096,58	62.835,64
Londrina	20%	765,15	1.690,64	1.293.589,15
	30%	1.147,72	1.648,97	1.892.552,35
Curitiba	20%	2.474,64	1.574,75	3.896.933,78
	30%	3.711,96	1.537,95	5.708.802,26

Fonte: Autores (2020).

A Tabela 7 ressalta o valor do investimento em função do custo específico em escala, conforme a equação (9), para sistemas de geração de energia elétrica com eficiência de 20% e 30%.

O levantamento dos custos e o investimento da geração de biogás não foram incluídos, pois foi considerado que as estações de tratamento de esgoto são contempladas com o uso do reator UASB no seu sistema de tratamento de efluente e há biogás disponível, sendo necessária só a sua captação para o motor gerador.

O custo de manutenção em 3% do RAV tornaria as práticas de manutenção dessa indústria entre as melhores do mundo. No entanto, os valores de operação e Manutenção foram estabelecidos com 4% do investimento por ano, deixado 1% para margem de segurança de riscos (Walter, 2019), assim como o tempo de trabalho efetivo do equipamento de 8.000 h de trabalho anual. Assim, tem 760 h ao ano de parada para a manutenção do sistema de geração e essas horas foram divididas e descontadas no período de cada mês tendo como desconto por mês de 63,33 h. Destaca-se 666,667 h/mês de funcionamento entre essas horas de 59,523 h/mês com tarifa na ponta e 607,143 h/mês com tarifa fora de ponta.

Com essas variáveis, então, é possível estabelecer um fluxo de caixa para calcular o VPL, sendo a energia gerada e consumida pela própria ETE. Tem-se também uma economia no custo da tarifa de energia, portanto essa economia será a receita do fluxo de caixa. Para tais despesas, iremos considerar o custo de operação e manutenção.

A partir do fluxo de caixa, tem-se que efetuar os cálculos do VPL de acordo com a equação (6) e TIR com a equação (7). Será usada a taxa de desconto equivalente a taxa mínima de atratividade (TMA) de 1% a.m., pois está em um patamar considerável de investimento, em um período de 240 meses que corresponde à vida útil do equipamento. Os resultados na Tabela 8 com motor gerador com 20% de eficiência e na Tabela 9 com motor gerador de 30% de eficiência.

Tabela 1 - VPL, TIR e Payback com eficiência do motor gerador de 20%.

Escala	Cidades	Investimento (R\$)	VPL (R\$)	TIR (%)	PayBack (meses)
Baixa	Medianeira	R\$ 43.115,87	R\$ 456.647,67	12,76%	8
Média	Londrina	R\$ 1.293.589,15	R\$ 17.953.004,63	16,38%	6
Alta	Curitiba	R\$ 3.896.933,78	R\$ 58.437.412,43	17,61%	5

Fonte: Autores (2020).

Tabela 2 - VPL, TIR e Payback com eficiência do motor gerador de 30%.

Escala	Cidades	Investimento (R\$)	VPL (R\$)	TIR (%)	PayBack (meses)
Baixa	Medianeira	R\$ 62.835,64	R\$ 687.366,15	13,15%	7
Média	Londrina	R\$ 1.892.552,35	R\$ 26.991.818,37	16,80%	6
Alta	Curitiba	R\$ 5.708.802,26	R\$ 87.834.069,69	18,04%	5

Fonte: Autores (2020).

Na Tabela 8 e 9, pode-se observar que os VPLs das cidades citadas estão todos com VPLs acima de 0 (zero) sendo que, então, todos os projetos de investimento são economicamente viáveis. Além disso, a Taxa de Retorno Interno (TIR) está entre os valores de 12,76% a.m. a 18,04% a.m. estando acima do valor da taxa mínima de atratividade de 1% a.m., confirmando que o investimento é viável. Tem-se também o Payback, visto que o tempo de retorno do valor do investimento ficou entre 5 a 8 meses.

3.5 Levelized Cost of Energy (LCOE)

O LCOE foi obtido a partir da equação (8), que relaciona o custo do valor de investimento, custo de manutenção e operação do sistema motor gerador com a quantidade de energia gerada, ambos reajustados para o valor presente.

Usada a potência de geração do sistema de motor gerador e do investimento inicial do mesmo, considerando que o custo de manutenção e operação do sistema seja 4% do investimento inicial para cada ano. E que as horas de trabalho do sistema no ano seja 8.000 horas, obtém-se então a quantidade de energia elétrica gerada anual. E utilizado a taxa de desconto de 12.68% a.a. equivalente a taxa de 1% a.m., e considerado a vida útil do sistema de 20 anos. Tem-se então o valor do LCOE com o uso da equação (8), demonstrada nas Tabelas 10 para a eficiência de conversão de 20% e na tabela 11 com a eficiência de 30%.

Tabela 10 - Valores para o cálculo de LCOE para motor gerador com 20% de eficiência.

Cidades	Potência (MW)	Investimento (R\$)	Custo de Manutenção e Operação anual (R\$)	Energia Elétrica gerada anual (MWh)	LCOE (R\$/MWh)
Medianeira	0,01998	43.115,87	1.724,63	159,84322	48,45
Londrina	0,76514	1.293.589,15	51.743,57	6.121,16890	37,96
Curitiba	2,47464	3.896.933,78	155.877,35	19.797,14417	35,36

Fonte: Autores (2020).

Tabela 11 - Valores para o cálculo de LCOE para motor gerador com 30% de eficiência.

Cidades	Potência (MW)	Investimento (R\$)	Custo de Manutenção e Operação anual (R\$)	Energia Elétrica gerada anual (MWh)	LCOE (R\$/MWh)
Medianeira	0,02997	62.835,64	2.513,43	239,76483	47,07
Londrina	1,14772	1.892.552,35	75.702,09	9.181,75334	37,02
Curitiba	3,71196	5.708.802,26	228.352,09	29.695,71625	34,53

Fonte: Autores (2020).

Ao levar em conta a tarifa da resolução ANEEL nº 2.559 de 18 junho de 2019, correspondendo a tarifa horo-sazonal verde, subgrupo A4, somente o valor de fora de ponta que consiste no valor de 0,33929 R\$/kWh, corresponde a 339,29 R\$/MWh. Portanto, pode-se comparar o LCOE obtido com a tarifa. Nota-se na Tabela 11, que a cidade de Medianeira com o maior valor de LCOE de 47,07 R\$/MWh, está 7 vezes menor que o valor da tarifa. No caso da cidade de Curitiba, tem-se o valor de 34,53 R\$/MWh e a comparação 9.8 vezes menor que a tarifa.

Em comparação com outras fontes de energia elétrica renovável como, por exemplo, o painel fotovoltaico, prevalece no Brasil um preço médio de 86,25 R\$/MWh no leilão 2019/4 da Secretaria Executiva de Leilões (SEL) (ANEEL, 2019). O LCOE mais alto do estudo de 48,45 R\$/MWh tem uma comparação de 1,78 vezes menor.

No mesmo Leilão de 2019/04 (SEL), o preço médio da energia Eólica no Brasil foi de 101,06 R\$/MWh (ANEEL, 2019). Comparando o preço médio da energia eólica leiloadas com o maior LCOE obtida no estudo, tem-se que o LCOE é 2,08 vezes menor que o preço médio da energia eólica.

4. Conclusão

Procurou-se esclarecer o método de utilização do biogás, a partir do esgoto urbano, quanto à busca atual de novas fontes renováveis de energia para a matriz energética. Constatou-se que a geração de energia com biogás mostra resultados estimulantes por contribuir com a geração de energia.

Os resultados obtidos nas viabilidades econômicas realizadas mostram todas as simulações do uso de sistema motor gerador com aproveitamento do biogás em estações de tratamento de esgoto que são viáveis, pois todos os VPLs são positivos,

sendo mais animador a TIR. Assim, existe uma variação de 12,76% a.m. a 18,04% a.m., sendo que o valor da taxa de desconto foi de 1% a.m., assim como a taxa SELIC é de 0,35% a.m. (2019). Portanto, tem-se uma grande margem para usar valores de taxa maiores de empréstimos e ainda obter um VPL positivo. Tem também o payback com menos de 12 meses sendo considerado um investimento de curto prazo.

Por intermédio dos resultados do custo nivelado de energia neste trabalho, os sistemas motores geradores com o maior valor correspondem a 42,41 R\$/MWh, e comparado com o valor da fatura de fora de ponta estabelecida no trabalho um valor de 339,29 R\$/MWh. Tem uma comparação que o LCOE obtido é pelo menos 7 vezes menor, portanto, é considerado um ótimo investimento.

Nesse sentido, o uso do biogás como fonte de combustível para geração de energia elétrica não é somente viável economicamente, mas também pode levar em conta alguns outros valores intangíveis como na variação de fonte de energia da matriz energética nacional, além de ocasionar a diminuição das emissões de gases poluentes e da contaminação dos mananciais de água. Dará condição econômica para tratar um volume maior de água e esgoto, ao apresentar uma fonte diferente de lucro no processo.

A produção energética, a partir do uso de um subproduto do processo do tratamento do esgoto, é o fator econômico mais importante por agregar valor ao que se considera resíduo, cujo destino final é o descarte no meio ambiente.

Políticas públicas devem ser efetivamente implementadas para incentivar com mais vigor a utilização desta fonte alternativa de geração de energia.

Para os futuros trabalhos, recomendo a utilização de outra elaboração com os novos modelos de reatores, análise da viabilidade e qualidade dos biodigestores possa ter maior eficiência e eficácia.

Referências

- Abdallah, M., Shanableh, A., & Shadiib, (2018). *Financial feasibility of waste to energy strategies in the United Arab Emirates*, Waste Manag.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas, (1997). *NBR 7229: Projeto, Construção e Operação de Sistemas de Tanques Sépticos* – Rio de Janeiro, Brasil.
- Bley, C., (2015). *Biogás: a energia invisível*. CIBiogás.
- Branker, K., Pathak, M. J. M., & Pearce, J. M., (2011). *A review of solar photovoltaic levelizedcost of electricity*. Renew Sustain Energy.
- Brasil, (2015). FEAM – *Fundação Estadual de Meio Ambiente*. Guia técnico ambiental de biogás na agroindústria.
- Casarotto, F. N., & Kopittke, B. H., (1994). *Análise de Investimentos*Atlas.
- Carvalho, M. S., (2021). *Modelo de regressão linear múltipla aplicada a dados para geração de energia através do biogás*. Bibliográfico. Research, Society and Development.
- Chernicharo, C. A. L., (2007). *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: reatores anaeróbios*. Brasil. Departamento de Engenharia Sanitária e ambiental.
- Chernicharo, C. A. L., Van, L. J. B., Noyola, A., & Bressani, R. T., (2015). *Anaerobic sewage treatment: state of the art, constraints and challenges*. Reviews in Environmental Science and Bio/technology.
- Coelho, S. T., (2006). *A conversão da fonte renovável biogás em energia*. Brasil. V Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, 31 de maio a 2 de julho de 2006.
- Coelho, S. T., Velázquez, S. M. S. G., Silva, O. C., Varkulya, A., & Pecora, V., (2003). *Relatório de Acompanhamento - "Biodigestor Modelo UASB"*. Brasil. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa.
- Companhia Ambiental Do Estado De São Paulo, (2006). *Biogás: projetos e pesquisas no Brasil*. São Paulo, Brasil.
- Costa, D. F., (2006). *Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto*. São Paulo-SP. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo.
- Currado, M. I. C., (2015). *Localização de perdas não técnicas de energia em sistemas de distribuição utilizando o método PQ*. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.

- Delazare, T., (2004). *Desnitrificação de esgoto Sanitário tratado a nível secundário através de biofiltros submersos utilizando comparativamente Metanol e Metano como fonte de Carbono*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, Brasil.
- Diretriz de controle de carga orgânica biodegradável em efluentes líquidos de origem sanitária, (2007). DZ 215-R4. <<http://www.inea.rj.gov.br/cs/groups/public/documents/document/zwew/mde0/~edisp/inea0014063.pdf>>.
- Fachagentur, N. R., (2010). *Guia prático do Biogás – Geração e Utilização*. Gulzow, Alemanha.
- França, A. T., (2008). *Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.
- Furtado, M. C., (2010). *Avaliação das oportunidades de comercialização de novas fontes de energias renováveis no Brasil*. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- IEA, (2005). *Biogas production and utilization*. Disponível em: < www.ieabioenergy.com >.
- Lettinga, G., & Hulshoff, P. W., (1991). *UASB process design for various types of wastewater*. Wat. Sci. Tech, p. 87-107.
- Lopes, T. R., (2015). *Caracterização do esgoto sanitário e lodo proveniente de reator anaeróbio e de lagoas de estabilização para avaliação da eficiência na remoção de contaminantes*. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais), UTFPR.
- Khan, A. A., Gaur, R. Z., Tyagi, V. K., Khursheed, A., & Lew, B., (2011). *Sustainable options of post treatment of UASB effluent treating sewage: A review*. Resources, Conservation and Recycling, p. 1232-1251.
- Klass, D. L., (1998). *Biomass for Renewable Energy Fuels and Chemicals*. Academic Press, San Diego.
- Nakabauashi, R., (2015). *Microgeração Fotovoltaica no Brasil: viabilidade Econômica – março 2015*. Instituto de Energia e Ambiente da USP, Laboratório de Sistema Fotovoltaico. Divulgado pela Associação Brasileira da Indústria Elétrica e Eletrônica (ABINEE).
- Matsuura, N., Hatamoto, M., Sumino, H., Syutsubi, K., Yamaguchi, T., & Ohashi, A., (2015). *Recovery and biological oxidation of dissolved methane in effluent from UASB treatment of municipal sewage using a two-stage closed downflow hanging sponge system*. Journal of Environmental Management, p. 200-209.
- Metcalf, L., & Eddy, H., (2003). *Wastewater Engineering: treatment and reuse*. Revisado por George Tchobanoglous.; Franklin L.; Burton, H.; David Stensel. McGraw –Hill.
- Ministério das Cidades, (2016). *Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos, 2014*. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Brasília, Brasil.
- Oliveira, R. D. (2009). *Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação) – Universidade de São Paulo, Brasil.
- Oliveira, S. M. A., & Von Sperling, M., (2005). *Avaliação de 166 ETES em operação no País, compreendendo diversas tecnologias*. Parte I e Análise de Desempenho. Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. 347 - 357.
- Pecora, V., (2006). *Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: estudo de caso*. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Pereira, F. J., & Shitsuka, R., (2018b). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFMS. Acesso em: 20 março 2020. Disponível: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1.
- Pereira, M. G., Camacho, C. F., Freitas, M. A. V., & Silva, N. F. D. (2012). *The renew-able energy market in Brazil: current status and potential*. Elsevier, São Paulo.
- Pipatmanomai, S., Kaewluan, S., & Vitidsant, T., (2009). *Economic assessment of biogás-to-electricity generation system with H₂S removal by activated carbono in small pig farm*. Applied Energy. PP. 669-674.
- Rangel, M. S., (2016). *Study of Costs and Economic Feasibility of Electricity Generation from Renewable Energy in Brazil*. Final Graduation Work (Environmental Engineer), Federal University of Itajubá, Brazil.
- Santos, A. A. S., Cutrim, C. F. J., & Oliveira, L. L., (2020). *Biódigestor anaeróbio para produção sustentável de biogás em propriedade rural da cidade de Açailândia, Maranhão, Brasil*. Descritivo exploratório. Research, Society and Development.
- Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento. (2018). *24º Di-agnóstico dos serviços de água e esgotos – 2018*. Brasília: Ministério do Desenvolvimento Regional Secretaria Nacional de Saneamento
- Smil, V., (2002). *Energy Resources and Uses: A Global Primer for the Twenty-First Century*. Current History. pp 126-132.
- Tachini, M., Belli, F. P., & Pinheiro, A., (2002). *Avaliação do tratamento conjunto de lodo de tanques sépticos e esgotos domésticos em um RALF*. VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental – SIBESA.
- USA, (2018). EIA (U.S. Energy Information Administration). *Annual Energy Outlook 2018 with Projections to 2050*. Washington, D.C.: U.S. Department of Energy. February 6, 2018. <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/AEO2018.pdf>.

Van, H. A. C., & Lettinga, G., (1994). *Tratamento Anaeróbio de Esgotos: um Manual para Regiões de Clima Quente*. Campina Grande, Brasil.

Walter, P., (2019). *Qual o custo que a manutenção deve ter?* Engenharias.net. blog. Brasil. 2008. <<https://engenharias.net/paulo-walter/2008/05/qual-o-custo-que-a-manutencao-deve-ter/#.XkWWQmhKhPY>>.

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) - Programa de Pós-graduação em Energia na Agricultura - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Brasil.