

# Estudo da viabilidade econômica do aproveitamento energético de biogás em Sergipe considerando o cotratamento de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico em reatores UASB

*Study of the economic feasibility of using biogas energy in Sergipe considering the co-treatment of landfill leachate and domestic sewage in UASB reactors*

• **Data de entrada:**  
03/07/2020


• **Data de aprovação:**  
26/10/2021

Luisa Maria Horta Maia<sup>1\*</sup> | Daniel Moureira Fontes Lima<sup>1</sup> | Camila Figueredo Miranda<sup>2</sup> | Dayane Oliveira Santos Melo<sup>1</sup> | Giovana Nunes Wesz<sup>1</sup> | Florilda Vieira da Silva<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.016>


## ORCID ID


Maia LMH  <https://orcid.org/0000-0003-4232-433X>

Lima DMF  <https://orcid.org/0000-0002-6155-8564>

Miranda CF  <https://orcid.org/0000-0003-4512-4202>

Melo DOS  <https://orcid.org/0000-0003-0345-7017>

Wesz GN  <https://orcid.org/0000-0003-2838-3288>

Silva FV  <https://orcid.org/0000-0002-1333-6553>

## Resumo

Uma das formas utilizadas no tratamento do lixiviado de aterro sanitário é o cotratamento com esgoto em ETEs. No país, muitas estações utilizam reatores anaeróbios (ex: UASB), que produzem biogás, que pode ser utilizado para produção de energia elétrica. Sergipe dispõe de um aterro sanitário que envia o seu lixiviado para uma central de tratamento de efluentes na Bahia. O presente trabalho analisa a viabilidade econômica de implantação de sistemas de aproveitamento de biogás em ETEs sergipanas já equipadas com reatores UASB, adicionando-se o lixiviado ao esgoto. Avaliaram-se proporções de adição de lixiviado entre 0,5% e 5%, utilizando o *software* ProBio 1.0 para estimar a geração de biogás para cada uma das proporções e o potencial energético em cada uma das estações. Determinou-se a economia mensal com a energia gerada pelo uso do biogás. Na análise econômica, os VPLs dos investimentos foram determinados para um horizonte de 25 anos, e seus tempos de retorno foram definidos por *payback* descontado. A implantação do sistema de aproveitamento mostrou-se viável para três das quatro ETEs. A ERQ Sul, a ERQ Oeste e a ETE Rosa Elze, com tempos de retorno do investimento de 11 anos e 10 meses, 12 anos e 11 meses e 19 anos e 7 meses, e VPLs de R\$ 1.225.215, R\$ 1.001.668 e R\$ 208.732, respectivamente, para a proporção de 5% de lixiviado adicionado ao esgoto sanitário.

**Palavras-chave:** Chorume. Biogás. Digestão anaeróbia. Energia.

## Abstract

*One of the treatments of landfill leachate is the co-treatment with sewage in WWTPs. In the country, many stations use anaerobic reactors (ex: UASB), which produce biogas, that can be used to produce electricity. Sergipe has a landfill*

<sup>1</sup> Universidade Federal de Sergipe - São Cristóvão - Sergipe - Brasil.

<sup>2</sup> Institute for Water Education - Delft - Holanda.

<sup>3</sup> Instituto Federal de Sergipe - Aracaju - Sergipe - Brasil.

\* **Autora correspondente:** [luisahortamaia@hotmail.com](mailto:luisahortamaia@hotmail.com).

that sends its leachate to an effluent treatment center in Bahia. This work evaluates the economic feasibility of implementing biogas recovery systems in the WWTPs already equipped with UASB reactors, adding leachate to the sewage. The proportion of leachate addition between 0.5% and 5% was evaluated using the ProBio 1.0 software to estimate the biogas generation for each of the proportions and the energy potential in each of the stations. The monthly energy savings generated by the use of biogas were determined. In the economic analysis, the investment NPVs were determined for a 25-year horizon and their payback times were defined by discounted payback. The implementation of the utilization system proved to be viable for three WWTPs. ERQ Sul, ERQ Oeste and ETE Rosa Elze, with payback times of 11 years and 10 months, 12 years and 11 months and 19 years and 7 months, and NPVs of R\$ 1,225,215, R\$ 1,001,668 and R\$ 208,732, respectively, for the proportion of 5% of leachate added to sanitary sewage.

**Keywords:** Leachate. Biogas. Anaerobic digestion. Energy.

## 1 INTRODUÇÃO

O aterro sanitário é visto como a melhor forma de disposição dos resíduos sólidos urbanos, pela sua segurança em relação à saúde humana e ao meio ambiente, pois permite algum controle do processo de degradação desses resíduos. O efluente gerado a partir da degradação natural do rejeito, um líquido escuro, de odor intenso, turvo e pouco viscoso, é o chorume. Em conjunto com as águas pluviais que percolam no aterro, esse efluente é denominado lixiviado de aterro sanitário, que deve ser devidamente tratado, visando à preservação do solo e das águas. (SANTOS, 2009; MAIA et al., 2019).

Segundo Gomes (2009), o tratamento do lixiviado de aterro sanitário em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) é consolidado nos Estados Unidos, na Europa e no Japão. No Brasil, assim como na América Latina, são amplamente utilizados reatores de digestão anaeróbia (UASB), que têm como uma de suas características a produção de biogás que pode ser utilizado para produção de energia elétrica.

Lobato (2011) ressalta que os digestores anaeróbios, como o reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo - UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), se adaptaram muito bem às condições brasileiras, uma vez que é uma técnica de baixo custo e operacionalmente simples, além de

o clima quente, predominante no país, favorecer o funcionamento das reações anaeróbias, sendo um tipo de tratamento bem consolidado na realidade das estações de tratamento de esgoto (ETEs) brasileiras.

Miorim (2018) aponta que a codigestão de dois ou mais substratos pode melhorar o desempenho na digestão de efluentes, pois compostos tóxicos podem ser diluídos e a diversidade de nutrientes aumentada, além de otimizar a produção de biogás e aumentar a estabilidade da reação.

O biogás é um dos principais subprodutos gerados pelo processo anaeróbio que ocorre nos reatores UASB, sendo um gás com grande potencial energético e ainda subutilizado no Brasil. Sua utilização pode contribuir com a geração de energia térmica e/ou elétrica, trazendo benefícios às ETEs sob perspectiva ambiental, técnica e econômica ao reduzir a demanda de outras fontes de energia (ROSA et al., 2016).

No País já existem plantas de tratamento de esgoto que utilizam o biogás gerado para produção de energia, e alguns trabalhos sobre a viabilidade da implantação de sistemas de aproveitamento energéticos do biogás em ETEs (VALENTE, 2015).

O único aterro sanitário presente no Estado de Sergipe atualmente envia seu efluente para tratamento a uma Central de Tratamento de Efluen-

tes Líquidos na cidade de Camaçari/BA, onde o efluente do aterro passa por uma sequência de tratamentos antes da disposição final. Essa logística de transporte do lixiviado para outro estado torna o processo bastante oneroso.

## 2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo avaliar a viabilidade econômica da implantação da tecnologia de aproveitamento de biogás em ETEs que possuem reatores anaeróbios em Sergipe, considerando o cotratamento do esgoto sanitário com o lixiviado de aterro sanitário do próprio Estado.

## 3 METODOLOGIA

No Estado de Sergipe são quatro as estações de tratamento de esgoto que possuem reatores UASB. Miranda (2018) as identificou a partir dos relatórios de automonitoramento das ETEs da Companhia de Saneamento de Sergipe - DESO, sendo as seguintes estações: ERQ Sul, ERQ Oeste, ETE Barra e ETE Rosa.

Miranda (2018) coletou informações referentes às unidades de tratamento aqui apresentadas, entre as quais os relatórios de automonitoramento das estações dos meses de janeiro/2017 a março/2018, que fornecem dados mensais de parâmetros de tratamento e vazões afluentes e os relatórios de contas de energia elétrica, que apresentam valores de carga instalada e consumos médios mensais na ponta e fora de ponta entre os meses de janeiro e agosto de 2018.

### 3.1 Misturas teóricas de lixiviado de aterro sanitário e esgoto sanitário

Considerando a linearidade do aumento de DQO e outros nutrientes conforme a adição do lixiviado de aterro sanitário ao esgoto sanitário apresentada por Santos (2009), foi calculada a DQO re-

sultante das misturas teóricas nas proporções de 0,5%, 1%, 2%, 3%, 4% e 5% em volume. Para isso foram utilizados os valores médios de DQO do esgoto sanitário apresentados por Miranda (2018) e a média aritmética das médias de DQO do lixiviado do aterro sanitário de Sergipe apresentadas por Lessa (2017) e Santos Júnior et al. (2019).

### 3.2 Cálculo da estimativa da produção de biogás e potência energética

BRASIL (2015a), no âmbito do Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil, apresenta como a melhor estimativa para produção de biogás a partir do tratamento de efluentes em reatores UASB o *software* gratuito ProBio1.0.

Para cada uma das ETEs estudadas, e para cada proporção de lixiviado adicionado ao esgoto sanitário, foram gerados dados de entrada para utilização do *software*. O programa fornece análise detalhada, a partir dos dados de entrada, vazão média afluyente ( $m^3/dia$ ) e concentração média de DQO afluyente (mg/L).

### 3.3 Determinação dos custos de investimento - CAPEX

A estimativa de custos de investimento desse estudo compreende os referentes às adequações das instalações já existentes das estações de tratamento e aos equipamentos necessários para a operação do sistema de aproveitamento de biogás.

Ao final, todos os custos sofreram a incidência do Benefícios e Despesas Indiretas (BDI), o qual agrega custos indiretos relativos a obras ou equipamentos. Segundo o Acórdão 2622/2013 do Tribunal de Contas da União, que traz diretrizes sobre o cálculo do BDI (BRASIL, 2013), os valores médios de BDI são 24,18% e 14,02% para obras e serviços de saneamento e para equipamentos, respectivamente.

### 3.4 Determinação dos custos de manutenção e operação - OPEX

Para a estimativa de custos operacionais e de manutenção do sistema de aproveitamento energético de biogás, foram levados em consideração os valores apontados pelo fornecedor dos motor-geradores, por empresa prestadora de serviço e pela literatura.

No que diz respeito à manutenção e reparação dos motor-geradores, incluindo troca de óleo, reposição de peças, mão de obra e outros, a empresa ER-BR Energias Renováveis traz valores de R\$2,79/ h e R\$1,84/ h por ano, para motores de 120 kVA e 30kVA respectivamente. Como cada ETE possui sua quantidade de horas de operação diária, determinou-se a quantidade de horas de operação anual para cada ETE para estimar o custo anual com manutenção e reparação.

Para a estimativa de custos com a manutenção do sistema de tratamento de biogás, considerou-se a metade do custo unitário de tratamento apresentado por Döhler et al (2013) (R\$ 0,027/ m<sup>3</sup> real de biogás). O autor admite o valor de R\$ 0,035/m<sup>3</sup>, que, atualizado com correção pelo IGP-M (FGV), no presente ano, equivale a R\$ 0,054/m<sup>3</sup> de biogás para a manutenção de dois tratamentos consecutivos, dos quais apenas um foi utilizado neste estudo.

Já para as estimativas de custos anuais de manutenção preventiva e corretiva das outras unidades que compõem o sistema de aproveitamento, adotou-se 2% dos custos de investimentos iniciais de cada unidade (DÖHLER et al, 2013).

Em adição, incluiu-se a análise laboratorial de óleo lubrificante com frequência mensal, a fim de verificar a necessidade de troca de óleo para perfeito funcionamento do motor-gerador. O custo unitário de R\$ 185,00 foi cotado com a empresa *Test Oil* e inclui o kit de coleta, a análise e o frete das amostras.

Foi considerado um custo unitário de R\$ 37,60 por quilowatt instalado para despesas gerais, conforme recomendação de Döhler et al. (2013), em custo corrigido pelo IGP-M (FGV).

Custos relativos à mão de obra não foram incluídos, pois as ETEs em questão já contam com profissionais responsáveis pela sua operação.

Finalmente, visto que o recebimento do lixiviado do aterro sanitário de Sergipe representa, para a empresa gestora, uma economia mensal com o envio desse efluente para estação de tratamento de efluentes da CETREL, em Camaçari no Estado da Bahia, que cobra em média R\$ 30,00/m<sup>3</sup>, e que o transporte gera uma despesa média de R\$ 70,00/m<sup>3</sup> transportado, seria razoável que esse tratamento eventualmente fosse cobrado.

A fim de gerar uma receita pela cobrança do tratamento desse lixiviado, para fins de cálculo, foi admitido um preço médio de R\$ 30,00/m<sup>3</sup> tratado. Como o transporte continuará como uma despesa da empresa gestora do aterro, este valor não será considerado como renda ou despesa para a DESO. Porém, vale ressaltar que a empresa gestora ainda economizaria em transporte, pois o trajeto percorrido por esse efluente seria diminuído de 300 para 50 km.

### 3.5 Análise energética

A partir da estimativa de potência elétrica disponível, concentração de metano no biogás, produção normalizada de biogás e carga instalada em cada unidade de tratamento de esgoto, foi possível entrar em contato com fornecedores que realizaram simulações do funcionamento de motor-geradores em diferentes regimes de trabalho.

Com os dados das potências geradas pelos equipamentos e os seus consumos de biogás, calcularam-se as horas de operação diária, a produção diária de energia e a produção mensal de energia em kWh.

Para parâmetros envolvendo os consumos de energia elétrica de cada ETE, utilizaram-se os adotados por Miranda (2018), que apresenta valores de consumo médio entre os meses de janeiro a agosto de 2018. O saldo energético mensal foi calculado pela diferença entre a média do consumo mensal de energia de cada ETE e sua produção mensal de energia.

Finalmente, para calcular os custos envolvidos nessa análise, de acordo com Brasil (2015b), determinou-se a média ponderada dos valores de tarifa na ponta e fora de ponta, considerando cerca de 780 horas de ponta por ano (das 17h30 às 20h30, nos dias úteis), com posterior incidência de impostos como PIS e COFINS. Assim, para tarifa média (Eq. 1), tem-se:

$$T_{méd} = \frac{[(7980 * T_{fp}) + (780 * T_p)]}{8760} \quad (1)$$

Em que:

$T_{méd}$  é a tarifa média, em R\$/kWh;  $T_{fp}$  é o valor da tarifa no horário fora de ponta correspondente ao grupo tarifário da unidade consumidora, em R\$/kWh; e  $T_p$  é a tarifa no horário de ponta relativa ao grupo tarifário da unidade, em R\$/kWh.

De acordo com o Miranda (2018), a ERQ Sul e ERQ Oeste são unidades consumidoras do grupo tarifário de alta tensão horosazonal verde, enquanto a ETE Barra e a ETE Rosa Elze são unidades de baixa tensão. Os valores das tarifas correspondentes a cada grupo tarifário também foram obtidos com a distribuidora de energia elétrica - Energisa e são de vigência de 04/2020 a 07/2020.

Adicionalmente, obtiveram-se os valores referentes aos impostos PIS e COFINS dos últimos 12 meses cobrados à DESO nas faturas de energia elétrica. Assim, nas tarifas médias calculadas para cada grupo tarifário incidiu o valor médio de PIS e COFINS desse período.

O custo mensal médio atual do consumo de energia elétrica foi calculado para cada unidade (Eq. 2), assim como a economia mensal após o aproveitamento energético de biogás (Eq. 3).

$$custo_{mensal\ méd} = consumo_{mensal\ méd} * T_{méd} * (1 + I_{méd}) \quad (2)$$

Em que:

$Custo_{mensal\ méd}$  é o custo médio referente ao consumo de um mês, em R\$;  $Consumo_{mensal\ méd}$  é o consumo mensal médio calculado para cada unidade, em kWh;  $T_{méd}$  é o valor da tarifa média correspondente à unidade consumidora, em R\$/kWh; e  $I_{méd}$  é o valor médio dos impostos PIS e COFINS, em %.

$$Econ_{mensal\ méd} = Produção\ mensal * T_{méd} * (1 + I_{méd}) \quad (3)$$

Em que:

$Econ_{mensal, méd}$  é o valor economizado após a implantação do sistema de aproveitamento de biogás, em R\$;  $Produção\ mensal$  é a energia gerada pelo motor-gerador durante 1 mês, em kWh;  $T_{méd}$  é o valor da tarifa média correspondente à unidade consumidora, em R\$/kWh; e  $I_{méd}$  é o valor médio dos impostos PIS e COFINS, em %.

### 3.6 Análise de viabilidade econômica

Foi utilizado o Valor Presente Líquido (VPL) para a verificação da viabilidade econômica dos sistemas de aproveitamento de biogás. Montou-se o fluxo de caixa para cada ETE, contabilizando custos, despesas e receitas relativas ao aproveitamento, sem levar em conta os custos operacionais atuais das ETEs nem as receitas oriundas do serviço de esgotamento sanitário prestado à sociedade.

Para cada ano presente no fluxo de caixa, os valores de despesas e receitas foram ajustados pela taxa de inflação, prevista em um teto de 4% em 2020 (pré-pandemia) (BRASIL, 2020). Para determinar a taxa de juros aplicada, utilizou-se a taxa de juros para empréstimos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) para empreendimentos abaixo de 20 milhões de reais e relacionados à redução do consumo de energia ou aumento de eficiência energética. Assim, a taxa é composta por custo financeiro de 1,05% a.a., remuneração básica de 0,9% a.a. e taxa de risco de crédito para Estados, Municípios e Distrito Federal de 1,3% a.a., resultando em uma taxa de juros de 3,27% a.a.

O cálculo de viabilidade foi realizado com um horizonte de planejamento de 25 anos para todas as ETEs. E, para calcular o tempo de retorno do investimento em cada estação, foi utilizada a técnica de *payback* descontado, avaliando, então, os resultados acumulados dos fluxos de caixas descontados e identificando o momento em que o ganho acumulado se iguala ao valor do investimento.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Parâmetros de entrada do esgoto sanitário e do lixiviado do aterro sanitário de Sergipe

Os dados dos valores de DQO de entrada e vazão média de entrada do esgoto sanitário, em cada uma das ETEs estudadas, foram obtidos no trabalho de Miranda (2018), enquanto os dados de DQO e vazão média do lixiviado do aterro sanitário de Sergipe foram obtidos dos trabalhos de Lessa (2017) e Santos Júnior et al. (2019). Os três trabalhos utilizaram dados coletados entre 2017 e 2018. Na Tabela 1, são apresentados os resul-

tados médios de DQO e vazão na entrada de cada uma das ETEs, DQO e vazão média da produção de lixiviado do aterro sanitário.

**Tabela 1** - Vazão e DQO do esgoto sanitário e do lixiviado

ESGOTO SANITÁRIO (Miranda, 2018)		
	DQO média de entrada (mg/L)	Vazão média de entrada (m <sup>3</sup> /dia)
ERQ Sul	356,25	6060,08
ERQ Oeste	279,50	6407,49
ETE Barra	329,83	597,80
ETE Rosa Elze	476,86	1605,31
LIXIVIADO DO ATERRO SANITÁRIO DE SERGIPE		
	DQO média (mg/L)	Vazão média (m <sup>3</sup> /dia)
Lessa (2017)	3676,92	200,00
Santos et al. (2019)	4344,95	200,00
Média	4010,94	200,00

Fonte: Autora (2020)

### 4.2 Misturas teóricas

Foram calculados os valores teóricos de DQO em misturas de lixiviado do aterro sanitário nas proporções de 0,5%, 1%, 2%, 3%, 4% e 5% em volume. Tais valores foram definidos a partir dos resultados disponíveis na literatura.

Santos (2009) chegou à conclusão de que a adição de lixiviado de aterro sanitário ao esgoto sanitário em proporções de até 2,5% de lixiviado não apresenta efeitos adversos significativos, entre 2,5% e 5% os efeitos são reversíveis, e acima disso o processo de digestão entra em desequilíbrio permanente. Além disso, o autor demonstrou a linearidade do aumento de DQO e outros nutrientes conforme a adição do lixiviado de aterro sanitário ao esgoto sanitário.

A Tabela 2 mostra os resultados de DQO das misturas teóricas do lixiviado de aterro sanitário de Sergipe e esgoto sanitário recebido em cada uma das ETEs avaliadas, além de DQO do esgoto sanitário bruto.



**Tabela 2** - DQO do esgoto sanitário e DQO teórico das misturas em porcentagem do lixiviado do aterro sanitário de Sergipe com o esgoto sanitário nas estações que possuem reatores UASB

	Esgoto sanitário	0,5%	1%	2%	3%	4%	5%
ERQ Sul	356,25	374,52	392,80	429,34	465,89	502,44	538,98
ERQ Oeste	279,50	298,16	316,81	354,13	391,44	428,76	466,07
ETE Barra	329,83	351,34	366,64	403,46	440,27	477,08	513,89
ETE Rosa Elze	476,86	494,53	512,20	547,54	582,88	618,22	653,56

Fonte: Autora (2020)

### 4.3 Estimativa da produção de biogás e potencial energético

Foram utilizados os valores de DQO das misturas e do esgoto sanitário bruto, apresentados na Tabela, e os valores de vazão de cada uma das ETEs como dados de entrada no *software* ProBio 1.0, que fornece estimativas da produção de biogás e outros parâmetros relacionados à conversão de DQO nos reatores UASB.

Avaliando a proporção de CH<sub>4</sub> no biogás por meio da estimativa gerada, percebeu-se que a partir de 3% de adição de lixiviado de aterro sanitário ao esgoto todas as estações apresentam proporções acima de 60% de CH<sub>4</sub> no biogás, valor esperado para o reator UASB, segundo Cabral et. al. (2015).

O poder calorífico inferior do biogás está diretamente ligado à proporção de metano. Considerando que o poder calorífico inferior do metano é de, conforme Lobato (2011), 9,96 kWh/Nm<sup>3</sup>, observa-se que a partir de 2% de adição de lixiviado, as ETEs (com exceção da ERQ Oeste, onde o afluente é mais diluído) apresentam poder calorífico inferior do biogás maiores que 6kWh/Nm<sup>3</sup><sub>biogás\*</sub>.

### 4.4 Definição dos principais componentes do sistema de aproveitamento do biogás

Dentre as principais tecnologias disponíveis no mercado para conversão da energia química do biogás em energia elétrica, optou-se pelo motor-gerador de ciclo Otto, que além de menor custo tem menos exigências em relação à qualidade do

gás e pode operar com proporção de metano no biogás acima de 45%.

A partir das estimativas de produção de biogás, obtidas por meio do ProBio 1.0, e assumindo uma proporção de metano de 60% no biogás, a empresa ER-BR Energias sugeriu um grupo de geradores para cada uma das estações e forneceu informações dos equipamentos, como a potência gerada em carga base e o consumo de biogás. Para a ERQ Sul e a ERQ Oeste foram recomendados motor-geradores nas potências de 120 kVA ou 50 kVA; para a ETE Barra e a ETE Rosa Elze foram sugeridos motor-geradores nas potências de 30 kVA. Para a ERQ Sul e a ERQ Oeste, optou-se por utilizar o gerador de 120 kVA, uma vez que o gerador de 50 kVA apresentou horas de operação diária superiores a 24h para as maiores proporções de lixiviado adicionadas.

Assim como em Miranda (2018), as outras unidades componentes foram escolhidas com base no estudo de viabilidade realizado por Brasil (2015b). Adotaram-se gasodutos em polietileno de alta densidade (PEAD), válvulas de bloqueio, removedores de água condensada e manômetros para indicação de sobrepressão para as unidades de coleta e transporte do biogás.

Para o armazenamento, consideraram-se gasômetros de baixa pressão com membrana dupla, que de acordo com Brasil (2015b) são recomendados para pequenas e médias plantas de biogás, por serem mais viáveis economicamente do que os gasômetros de alta pressão. Miranda (2018) ressalta que, por falta de prognósticos

precisos relativos à geração de biogás ao longo de um período suficientemente longo, os volumes dos gasômetros foram estimados a partir da proporção entre o volume de biogás gerado em cada ETE e o volume de biogás do estudo de Brasil (2015b).

No que diz respeito ao tratamento do biogás, optou-se pela biodessulfurização interna (no interior do gasômetro), por ser uma alternativa que agrega a qualidade adequada ao biogás exigida pelos motor-geradores a gás a um menor custo.

Por fim, medidores de vazão tipo vortex, monitores de composição de biogás (analisador) e queimador aberto também foram incluídos nos custos.

## 4.5 Custos

### 4.5.1 CAPEX - Custos de investimento

Os custos apresentados nesta seção são relativos aos equipamentos dos sistemas de aproveitamento e às adequações adicionais. A Tabela 3 mostra o detalhamento dos custos acrescidos do BDI em cada ETE, para cada proporção adicionada de lixiviado de aterro sanitário ao esgoto sanitário recebido em cada uma das estações.

### 4.5.2 OPEX - Custos de Operação de Manutenção

Os custos com manutenção e reparo foram calculados para o período de um ano e estão descritos nas Tabela 4.

**Tabela 3-** Custos de investimento - CAPEX para as estações, em cada proporção de lixiviado adicionada (em R\$)

	ERQ Sul	ERQ Oeste	ETE Barra	ETE Rosa Elze
Esgoto sanitário	926.930,92	883.395,95	594.299,24	654.176,34
0,5% Lixiviado	941.190,08	897.363,90	596.452,16	657.372,78
1% Lixiviado	955.740,46	910.222,45	597.083,12	655.122,79
2% Lixiviado	941.141,55	940.481,14	596.355,09	662.770,67
3% Lixiviado	967.676,83	971.807,62	599.138,97	669.155,01
4% Lixiviado	975.640,19	955.832,36	601.922,85	675.435,07
5% Lixiviado	1.002.005,60	986.139,58	602.335,41	682.985,88

Fonte: Autora (2020)

**Tabela 4-** Custos com manutenção e reparo - OPEX para as estações, em cada proporção de lixiviado adicionada (em R\$)

	ERQ Sul	ERQ Oeste	ETE Barra	ETE Rosa Elze
Esgoto sanitário	27.515,48	23.838,66	11.649,90	22.297,75
0,5% Lixiviado	29.045,52	25.353,90	11.716,72	19.731,19
1% Lixiviado	29.572,01	25.836,99	11.748,78	19.659,44
2% Lixiviado	29.043,06	27.924,59	11.711,79	20.591,94
3% Lixiviado	27.953,30	28.649,62	11.637,23	20.893,70
4% Lixiviado	31.303,52	29.510,11	12.581,16	22.408,36
5% Lixiviado	33.278,43	29.510,11	12.602,12	23.335,93

Fonte: Autora (2020)

Percebe-se pouca diferença nos custos OPEX para as diferentes proporções de lixiviado de aterro sanitário adicionado ao esgoto sanitário, mas é necessário que essa diferença seja consi-

derada, uma vez que os custos de manutenção e reparo são relacionados com o tamanho da estrutura e, para cada proporção, há uma produção estimada de biogás.



### 4.6 Análise energética

Para a análise energética utilizaram-se informações dos motor-geradores, informações de consumo elétrico das estações e informações de tarifas e impostos pagos pela DESO (MIRANDA, 2018).

As tarifas médias correspondentes a cada grupo tarifário foram calculadas de acordo com a Eq. 1 e são apresentadas na Tabela 5.

**Tabela 5-** Tarifas de diferentes grupos tarifários envolvidos na análise

Grupo tarifário	Tarifa em horário fora de ponta (R\$/kWh)	Tarifa em horário de ponta (R\$/kWh)	Tarifa média (R\$/kWh)
Baixa tensão	0,40093	1,09491	0,48485
Alta tensão - Horosazonal verde	0,24104	1,55875	0,37551

Fonte: ENERGISA (2020)

Além disso, determinou-se uma alíquota efetiva média de 4,782% de PIS/COFINS cobrados nas contas de energia elétrica da DESO, considerando os valores praticados no último ano.

Com essas informações, calculou-se então o custo médio do consumo de energia das ETEs e a economia mensal após o aproveitamento energético do biogás, em cada proporção de adição de lixiviado de aterro sanitário ao esgoto sanitário.



**Figura 1-** Custo médio mensal e economia mensal em cada estação para cada proporção de lixiviado adicionado ao esgoto sanitário

Fonte: Autora (2020)

Percebe-se que a ETE Rosa Elza produz quase 10 vezes mais energia do que consome, sendo seu saldo energético positivo. Miranda (2018) mostra, porém, que esta é a ETE onde o custo unitário da energia produzida é mais caro, uma vez que seu investimento de adequação é muito alto em relação à produção de biogás.

A ERQ Sul e ERQ Oeste produziram até, aproximadamente, 65% da energia de que elas precisam, obtendo economias mensais expressivas. Por outro lado, a ETE Barra é capaz de suprir apenas de 10% a 20% do seu consumo atual de energia, não trazendo economia mensal significativa.

#### 4.7 Análise de viabilidade econômica

Com os fluxos de caixa de cada ETE, para cada condição de mistura de lixiviado de aterro sa-

nitário e esgoto sanitário, determinou-se o VPL de cada situação e o tempo de retorno do investimento por meio do *payback descontado*. Consideram-se para a análise dois cenários: o primeiro em que há a cobrança pelo tratamento do lixiviado, utilizando o valor médio atualmente pago pela empresa gestora do aterro sanitário de Sergipe à central de tratamento de efluentes na Bahia, e o segundo em que a DESO não cobraria por este tratamento.

O objetivo dessa comparação é servir de apoio à negociação para que, futuramente, o lixiviado do aterro sanitário seja de fato tratado em alguma ETE da DESO.

A Tabela 6 apresenta o resumo da análise de viabilidade econômica para cada uma das ETEs.

**Tabela 6-** Resumo da análise de viabilidade econômica nas estações

	ERQ Sul		ERQ Oeste	
	CCTL	SCTL	CCTL	SCTL
<b>Esgoto sanitário puro</b>				
VPL	-	R\$ 602.018,00	-	R\$ 175.510,00
<i>PayBack descontado</i>	-	15 anos e 8 meses	-	21 anos e 2 meses
<b>0,5% lixiviado</b>				
VPL	R\$ 9.804.845,00	R\$ 831.237,00	R\$ 9.893.475,00	R\$ 405.426,00
<i>PayBack descontado</i>	2 anos e 5 meses	13 anos e 10 meses	2 anos e 3 meses	17 anos e 9 meses
<b>1% lixiviado</b>				
VPL	R\$ 18.749.466,00	R\$ 802.249,00	R\$ 19.355.418,00	R\$ 379.320,00
<i>PayBack descontado</i>	1 ano e 4 meses	14 anos e 2 meses	1 ano e 3 meses	18 anos e 2 meses
<b>2% lixiviado</b>				
VPL	R\$ 36.725.787,00	R\$ 831.353,00	R\$ 38.529.446,00	R\$ 577.250,00
<i>PayBack descontado</i>	9 meses	13 anos e 10 meses	9 meses	16 anos
<b>3% lixiviado</b>				
VPL	R\$ 54.961.785,00	R\$ 1.120.134,00	R\$ 58.025.204,00	R\$ 1.096.909,00
<i>PayBack descontado</i>	6 meses	12 anos e 2 meses	6 meses	12 anos e 4 meses
<b>4% lixiviado</b>				
VPL	R\$ 72.809.170,00	R\$ 1.020.302,00	R\$ 76.708.247,00	R\$ 803.854,00
<i>PayBack descontado</i>	5 meses	12 anos e 8 meses	5 meses	14 anos e 1 meses
<b>5% lixiviado</b>				
VPL	R\$ 90.961.300,00	R\$ 1.225.215,00	R\$ 95.882.159,00	R\$ 1.001.668,00
<i>PayBack descontado</i>	4 meses	11 anos e 10 meses	4 meses	12 anos e 11 meses

CCTL: com cobrança pelo tratamento do lixiviado (R\$30,00/m³), SCTL: sem cobrança pelo tratamento do lixiviado

Fonte: Autora (2020)

Considerando a geração de renda pela cobrança do tratamento do lixiviado de aterro sanitário, to-

das as estações apresentam viabilidade econômica para instalação do aproveitamento do biogás.

Os resultados mostram, porém, que o sistema de aproveitamento energético do biogás na ETE Barra não é viável sem a cobrança pelo tratamento do lixiviado, ou seja, somente a economia gerada pela produção de energia elétrica a partir do biogás não é suficiente para que a implantação do sistema se pague.

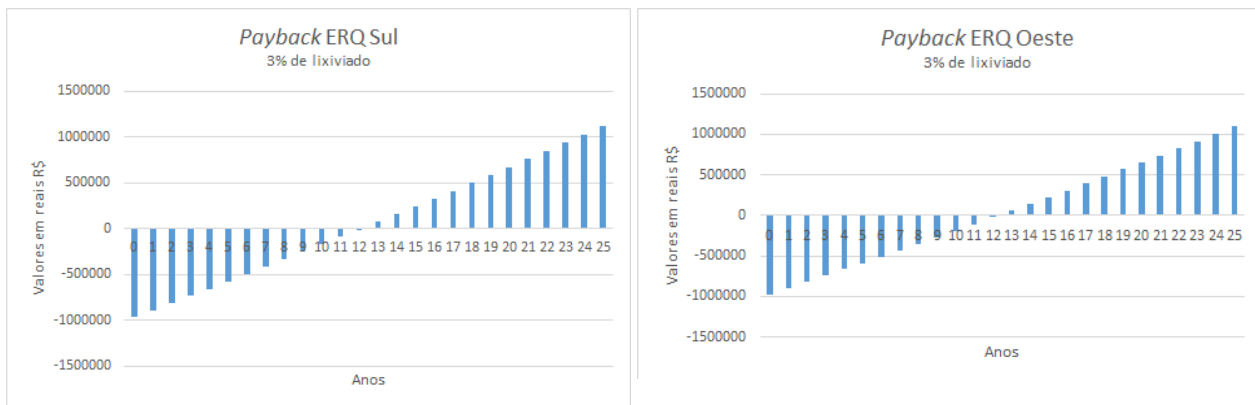
A ETE Rosa Elze se mostra viável em ambos os cenários, desde que com proporções de lixiviado de aterro sanitário a partir 2%, mas ainda não sendo atrativa para adequação ao sistema de aproveitamento do biogás, visto que, com exceção da ETE Barra, é a estação com o menor VPL e maior *payback* descontado.

A instalação do sistema de aproveitamento energético do biogás tanto na ERQ Sul como na ERQ Oeste se mostrou viável em todas as condições. Mesmo sem a cobrança pelo tratamento do lixiviado do aterro sanitário, apresentam *payback* descontado, com esgoto puro, de no máximo 15 e 21 anos, respectivamente. Com a cobrança pelo tratamento o *payback* descontado passa a ser de apenas 4 meses, tornando-se um investimento

atrativo, pois em pouco tempo é capaz de pagar os custos de investimento e manutenção, além de gerar lucro para a companhia de saneamento.

Percebe-se que, para tratar o montante de 200 m<sup>3</sup>/dia de lixiviado, é necessária a adequação de apenas uma das estações, ERQ Sul ou ERQ Oeste, uma vez que ambas possuem grandes vazões de chegada de esgoto, de 6060,08 m<sup>3</sup>/dia e 6307,49 m<sup>3</sup>/dia, respectivamente, e tratariam em proporções médias, 3,3% e 3,1% de lixiviado, respectivamente.

Conforme é mostrado nos gráficos de *payback* (Fig. 2) da ERQ Sul e da ERQ Oeste, de forma ilustrativa, somente na proporção de 3% de lixiviado adicionado a ERQ Oeste se mostra economicamente mais atrativa para essa adequação, uma vez que tem VPL maior, porém sua localização geográfica pode ser um impeditivo, uma vez a estação está cercada de construções verticais, dificultando uma expansão da estação. A ERQ Sul tem mais espaços livres no entorno da estação, o que pode ser um diferencial em um projeto de viabilidade técnica para implantação do sistema.



**Figura 2** - Gráficos de *payback* da ERQ Sul e da ERQ Oeste, para proporção de 3% de lixiviado adicionado  
 Fonte: Autora (2020)

É importante destacar que esta é uma análise teórica do tratamento, baseada somente na remoção de DQO. Caso a companhia de saneamento opte por realizar o cotratamento do lixiviado do aterro sanitário em suas ETES,

são necessárias análises complementares em termos de remoção dos demais nutrientes e tóxicos, garantindo um efluente final que atenda às exigências para lançamento no corpo hídrico receptor.

## 5 CONCLUSÃO

O estudo de viabilidade econômica mostrou que a eventual arrecadação pelo tratamento do lixiviado supera em muito o ganho econômico gerado pela redução nas contas de energia elétrica.

Com a instalação do sistema de aproveitamento do biogás e o cotratamento do lixiviado do aterro sanitário, a ERQ Sul teria uma redução no consumo de energia elétrica de até aproximadamente 60% do que é consumido atualmente. Somente com esta economia, o sistema teria um *payback* descontado em 11 anos e 10 meses e VPL ao fim de 25 anos de R\$ 1.225.215,00. Considerando também a receita gerada pelo recebimento do lixiviado, o *payback* descontado cairia para até 4 meses e um VPL de R\$ 90.961.300,00. Esta estação seria suficiente para receber todo o lixiviado produzido no aterro sanitário de Sergipe.

O aproveitamento do biogás na ERQ Oeste reduziria em até 65% do seu gasto com energia elétrica, e isso geraria um VPL de R\$ 1.001.668,00, além de um *payback* descontado de 12 anos e 11 meses. Acrescido o recebimento da taxa do tratamento do lixiviado do aterro sanitário, o *payback* descontado cairia para até 4 meses e o VPL aumentaria para R\$ 95.882.159,00.

A ETE Barra é a única estação onde o aproveitamento do biogás, de forma exclusiva, não geraria um VPL positivo no prazo de 25 anos, ou seja, o sistema não se pagaria. O recebimento do lixiviado, entretanto, custearia o sistema, fornecendo um VPL de R\$ 8.287.066,00 em 1 ano e 10 meses. Esta estação também é a que menos reduz seu gasto com energia elétrica, uma vez que o uso do biogás supriria no máximo 21% da sua necessidade.

A ETE Rosa Elze gasta menos energia elétrica do que todas as outras, provavelmente pela tecnologia utilizada no tratamento do esgoto. A energia produzida através do biogás supre sua demanda em 1132%. Apesar disso, somente com a economia com energia elétrica, o VPL é de apenas

R\$ 208.732,00, atrelado a um *payback* descontado de 19 anos e 7 meses. Entretanto, a receita gerada pelo tratamento do lixiviado do aterro sanitário aumentaria o VPL para R\$ 23.979.694,00 e reduziria o *payback* descontado para 10 meses.

Conclui-se que o cotratamento do lixiviado de aterro sanitário nas ETES pode significar um grande ganho econômico para empresa, além de tornar o sistema de aproveitamento energético do biogás mais viável, favorecendo também o meio ambiente.

Vale ressaltar que todos os autores falam que o cotratamento do lixiviado com o esgoto sanitário exige que outras etapas sejam adicionadas, para a remoção adequada da matéria orgânica, outros nutrientes e dos metais presentes. Sugere-se o estudo das etapas necessárias, análise da viabilidade e precificação para o tratamento combinado nas ETES existentes.

## 6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

## 7 REFERÊNCIAS

BRASIL. Tribunal de Contas da União – TCU. **Acórdão nº 2622 / 2013**. Brasília, 2013.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Probiogás. ISBN 978-857-958-070-3. **Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto**. Brasília, 2015a.

BRASIL. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. Probiogás. ISBN 978-85-7958-061-1. **Viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETES a partir do biogás**. Brasília, 2015b.

BRASIL. Banco Nacional do Desenvolvimento – BNDES. **Finem – Financiamento a Empreendimentos**. 2020. Disponível em: <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finem-saneamento-ambiental-recursos-hidricos>>. Acesso em: 13/10/2020.

CABRAL, B. G. C.; PLATZER, C. J.; ROSENFELDT, S.; HOFFMANN, H.; CHERNICHARO, C.A.L. Caracterização do biogás gerado no tratamento de efluentes domésticos em reatores UASB no Brasil.

In: 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, **Anais...** 2015.

DÖHLER, H.; HARTMANN, S; KEYMER, U; NIEBAUM, A; PATERSON, M; REINHOLD, G; STADELMANN, M.; WIRTH, B. Faustzahlen Biogas. 3. ed. Darmstadt: Kuratorium Für Technik Und Bauwesen In: **Der Landwirtschaft e.V. (KTBL)**, 2013.

GOMES, L. P. (coord.). **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras**. 1a ed. Rio de Janeiro: ABES/Projeto PROSAB, 2009. v. 3

ENERGISA. **Tipos de Tarifa**. Disponível em: < <https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>>. Acesso em: 29/10/2020

LESSA, A. C. V. **Caracterização do Chorume do Centro de Gerenciamento de Resíduos Sólidos de Sergipe**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Técnico em Saneamento Ambiental) - Instituto Federal de Sergipe, Aracaju, 2017.

LOBATO, L. C. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SOUZA, C. L. Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater. **Water Science and Technology**, v. 66, n. 12, p. 2745–2753, 2012. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.514>

MAIA, L. M. H.; LIMA, A. DE J.; MENDONÇA, L. C.; MICHELAN, D. C. DE G. S. Avaliação do Tratamento do Lixiviado de Aterro Sanitário por Processo Físico-Químico. In: 30º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente. **Anais...** São Paulo, 2019.

MIORIM, M. **Tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico por processo anaeróbio em reator UASB**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2018.

MIRANDA, C. F. **Estudo de viabilidade técnica e econômica do aproveitamento energético de biogás em Sergipe**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. (Bacharelado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2018.

ROSA, A. P.; NEVES, R. C.; CHERNICHARO, C. A. DEL. Aproveitamento Energético dos Subprodutos, Lodo e Biogás, a Partir do Tratamento Anaeróbio de Efluentes pelo Uso de Processos Termoquímicos. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 26, n. 01, p. 26–34, 2018. <https://doi.org/10.13083/reveng.v26i1.932>

SANTOS, A. F. DE M. S. **Tratamento Anaeróbio de Chorume em Conjunto com Esgoto Sanitário**. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.

SANTOS JÚNIOR, E. G.; SOUZA, C. S. DE; SILVA, F. V. DA; MENESES, F. M. S. Caracterização do Lixiviado de Aterro Sanitário de Sergipe. In: 30º Congresso ABES. **Anais...** Natal, 2019

VALENTE, V. B. **Análise de Viabilidade Econômica e Escala Mínima de Uso do Biogás de Reatores Anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.