

# AVALIAÇÃO DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE BIOGÁS GERADO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO<sup>1</sup>

Mateus Weitgenant Crispim<sup>2</sup>

Ewerthon Cezar Schiavo Bernardi<sup>3</sup>

## RESUMO

Ao longo do processo de tratamento do esgoto doméstico, são gerados diferentes subprodutos que devem receber um tratamento e destinação adequados. Entre esses subprodutos, destaca-se o lodo de esgoto, que é um resíduo sólido rico em matéria orgânica e nutrientes, possuindo uma elevada quantidade de microrganismos patogênicos e alto teor de água em sua composição inicial. Esse subproduto é o que apresenta maior impacto nos custos operacionais em uma estação de tratamento. Outro subproduto que pode ser gerado ao longo do tratamento do esgoto doméstico é o biogás, produzido quando a estação de tratamento se utiliza de processos anaeróbios de tratamento. Ele é composto por uma mistura de gases, resultantes do processo de digestão da matéria orgânica, e possui grande potencial de aproveitamento energético. Usualmente, o biogás não é aproveitado nas estações de tratamento, sendo apenas encaminhado para queima. Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo investigar as possibilidades de uso do biogás como fonte energética, para realizar o tratamento de lodo por secagem térmica, e para geração de energia elétrica, que pode ser usada na própria estação de tratamento.

**Palavras-chave:** Aproveitamento energético. Biogás. Lodo de esgoto. Secagem térmica.

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, vem ocorrendo no Brasil uma expansão dos serviços de saneamento, tanto na coleta quanto no tratamento dos esgotos sanitários. Entretanto, apenas 54,1% da população total é atendida com redes de esgotamento sanitário e, apenas 49,1% do volume total coletado é tratado (BRASIL, 2020a). Nesse sentido, o novo marco legal do saneamento, sancionado em Julho de 2020, pretende universalizar e qualificar a prestação dos serviços do setor nos próximos anos. Entre suas metas, é previsto alcançar a universalização do saneamento até 2033, garantindo que 90% do esgoto seja tratado e coletado (BRASIL, 2020b).

<sup>1</sup> Artigo Apresentado à Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL) como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, em 2021.

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia Civil. E-mail: [mateuscrispim@gmail.com](mailto:mateuscrispim@gmail.com).

<sup>3</sup> Professor orientador. Mestre em Engenharia Ambiental. Docente na Universidade do Sul de Santa Catarina (UNISUL). E-mail: [ewerthon.bernardi@animaeducacao.com.br](mailto:ewerthon.bernardi@animaeducacao.com.br).

Ao longo do tratamento do esgoto doméstico, são gerados diferentes subprodutos que devem receber um tratamento adequado. O lodo de esgoto, por exemplo, é um resíduo sólido rico em matéria orgânica e em nutrientes, entretanto, possui uma elevada quantidade de microrganismos patogênicos e um elevado teor inicial de água em sua composição. Esse subproduto é o que apresenta os maiores custos operacionais em uma estação de tratamento de esgoto (ETE), e o seu processamento pode representar de 20 a 60% dos custos operacionais totais (ANDREOLI et al., 2014).

A escolha da melhor alternativa para o tratamento de lodo de esgoto, contudo, nem sempre é simples, pois envolve aspectos de ordem técnica, econômica e ambiental. No Brasil, em geral, a decisão fica limitada a alternativas caras como, por exemplo, a redução parcial de seu volume seguido de seu transporte e a disposição final em aterros sanitários. Após a promulgação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (2010), que prevê a redução dos resíduos encaminhados para aterros sanitários, a tendência é que haja a diminuição na quantidade de lodo destinada para esses locais (JORDÃO e PESSÔA, 2017).

Outro subproduto que pode ser gerado ao longo do tratamento do esgoto doméstico é o biogás, produzido nos processos anaeróbios de tratamento. Ele é composto por uma mistura de gases, resultantes do processo de digestão da matéria orgânica, e possui grande potencial de aproveitamento energético (CHERNICHARO et al., 2007).

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo geral investigar o uso do biogás e o seu aproveitamento como fonte de energia e a relação destes com os possíveis custos evitados. Já os objetivos específicos consistiram na proposição de cenários de utilização do potencial energético do biogás para secagem térmica (processo que consiste na elevação da temperatura desse material o que provoca a evaporação da água e a destruição de organismos patogênicos, havendo a redução significativa do volume final de lodo), geração de energia elétrica e a cogeração de energia elétrica mais a secagem térmica.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Os principais objetivos do tratamento de esgoto doméstico são a separação da parte sólida e a promoção da redução da carga orgânica presente nesse efluente, seja por meio de processos químicos, físicos ou biológicos. O esgoto doméstico é constituído por uma mistura de água, sólidos orgânicos e minerais, e contém aproximadamente 99,9% de água e o restante (0,1%) de sólidos (VON SPERLING, 2014). Cerca de 70% dos componentes sólidos do esgoto são constituídos de matéria orgânica, como por exemplo: carboidratos, gorduras e proteínas. O restante é composto de material inorgânico, como sal, metais e areia (DAVID, 2002).

### 2.1 SISTEMAS DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS: REATORES UASB E LODOS ATIVADOS

Os sistemas de tratamento de esgotos são caracterizados por uma série de processos, entres eles destacam-se os biológicos, que podem ser realizados, basicamente, por sistemas aeróbios e anaeróbios.

Entre as tecnologias que se utilizam de sistemas aeróbios, destacam-se a de filtros biológicos, lagoas aeradas e os sistemas de lodos ativados com suas variações (VON SPERLING, 2014). As principais vantagens dos sistemas aeróbios de tratamento estão principalmente relacionadas à maiores taxas de remoção da carga orgânica e riscos reduzidos de emissões de odores. Entre as desvantagens, destacam-se a alta dependência de energia para os sistemas de aeração e uma maior geração de lodo quando comparado com os sistemas anaeróbios (VON SPERLING, 2012).

Em relação aos sistemas anaeróbios, destacam-se os reatores UASB (Reator Anaeróbio de Manta de Lodo de Fluxo Ascendente, em inglês *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*), as lagoas anaeróbias e os biodigestores. As principais vantagens dos processos anaeróbios são a maior capacidade de absorver grandes cargas orgânicas do efluente, os menores custos de operação e baixo consumo energético comparando com os sistemas aeróbios, bem como a menor produção de lodo quando comparado com os sistemas aeróbios e a possibilidade de aproveitamento do biogás resultante do processo anaeróbio. Já em relação às desvantagens têm-se a menor

eficiência de remoção de cargas orgânicas que os processos aeróbios, muitas vezes necessitando tratamento complementar do efluente para atender aos padrões ambientais, além da possibilidade de geração de maus odores nas proximidades da estação de tratamento (CHERNICHARO et al., 2007).

A melhor escolha entre os sistemas de tratamento de esgoto depende das características do esgoto afluente, da necessidade de atender padrões ambientais mais ou menos restritivos impostos pelas leis, os custos de implantação e operação dos sistemas, área disponível para realizar os processos de tratamentos, entre outros. Nesse sentido, é usual que seja adotada combinação de processos para o tratamento.

Destaca-se, assim, uma das combinações utilizadas em estações de tratamento: reator UASB, seguido de sistemas de lodos ativados. Ela é bastante positiva, pois além de associar as vantagens de cada processo de tratamento, obtém-se uma minimização das desvantagens (JORDÃO e PESSÔA, 2017).

Originalmente, os reatores UASB foram desenvolvidos na Holanda. Apresentam uma aplicabilidade em grande escala no tratamento anaeróbio do esgoto, gerando subprodutos como lodo, água e gases (principalmente gás carbônico e metano).

O reator consiste em três partes fundamentais: o leito do lodo, a zona de sedimentação e o separador físico. O efluente, ao entrar pelo fundo do reator, segue em sentido ascendente através de um leito de lodo denso e de elevada atividade microbiológica, onde ocorrerá a digestão anaeróbia. Este fluxo ascendente, associado à presença de bolhas, resulta na mistura do efluente com o lodo, gerando assim a degradação da matéria orgânica.

Como resultado, há a produção de biogás e o crescimento da biomassa bacteriana. Com a passagem pelo leito e manta de lodo, o biogás gerado e o líquido seguem em fluxo ascendente até o separador trifásico pelo defletor de gases, e a biomassa segue para o fundo do reator, onde passará pelo processo de sedimentação. Os sólidos que acabam sendo carregados por bolhas de gases através da manta de lodo, retornam à câmara de digestão ao sedimentar no decantador (CHERNICHARO et al., 2007).

Outro sistema de tratamento, o de lodos ativados, consiste num processo biológico onde o esgoto afluente e o lodo ativado (que é o floco produzido no esgoto bruto ou no decantador, pelo crescimento de bactérias e outros organismos na

presença de oxigênio dissolvido) são misturados, agitados e aerados em tanques de aeração, para que possam ser separados do efluente quando submetido à sedimentação (JORDÃO e PESSÔA, 2017). Tal processo é utilizado mundialmente em larga escala, especialmente quando é necessária elevada qualidade do efluente final com baixo requisito de área para tratamento. Apesar disso, essa forma de tratamento exige maior complexidade nos aspectos operacionais e maior consumo de energia elétrica na ETE (VON SPERLING, 2012).

## 2.2 SUBPRODUTOS GERADOS NO TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO

Inevitavelmente, os sistemas de tratamento de esgotos domésticos geram subprodutos nas formas líquida, sólida e gasosa, que devem receber um tratamento e destinação adequados. A parte líquida é o próprio efluente tratado, que pode retornar aos rios ao final do processo, sendo a principal forma de destinação de efluentes no Brasil. Como resultado do esgoto tratado são gerados resíduos, tais como: espuma (camada de materiais diversos que flutuam superficialmente nos reatores), material gradeado (materiais diversos retidos na etapa de tratamento preliminar de esgoto), areia, lodo, gases, entre outros (VON SPERLING, 2014). Em termos de custos operacionais da ETE, o lodo é o que apresenta maior percentual dos custos totais (20 a 60%) e maior complexidade operacional (ANDREOLI et al., 2014).

O lodo é um material, que se constitui na forma sólida, produzido após os processos de tratamento do esgoto doméstico sendo constituído principalmente de materiais orgânicos (sólidos voláteis), minerais (sólidos fixos) e água. As características desse subproduto dependem do tipo de tratamento empregado, sendo assim bastantes variáveis e, portanto, dificultando o manejo e a disposição final, gerando necessidade de submetê-lo a diversas etapas de tratamento (JORDÃO e PESSÔA, 2017).

## 2.3 ETAPAS DE TRATAMENTO DE LODOS DE ESGOTO

As principais etapas do tratamento do lodo são: adensamento, estabilização, desaguamento/desidratação, higienização e disposição final (VON SPERLING, 2014). Tais etapas visam reduzir o teor de material biodegradável, promover higienização e

reduzir a quantidade de água presente a níveis que possibilitem a manipulação sem oferecer riscos à saúde e facilitem o transporte e disposição final (ANDREOLI et al., 2006).

### **2.3.1 Adensamento**

O adensamento consiste na redução do volume do lodo para as demais etapas do tratamento, facilitando o manuseio e processamento do material, bem como reduzindo as dimensões das unidades seguintes de tratamento (JORDÃO e PESSÔA, 2017).

### **2.3.2 Estabilização**

Na estabilização, o objetivo é reduzir os riscos de degradação do material e a quantidade de microrganismos patogênicos (VON SPERLING, 2014), e são de três tipos: biológica, que utiliza microrganismos específicos que promovem a destruição de microrganismos patogênicos e estabilizam a fração orgânica em material estável; química, que consiste na adição de produtos químicos alcalinos capazes de elevar o pH do lodo a 12 por pelo menos 2 horas, impedindo ou retardando a ação dos microrganismos presentes no subproduto, que consumiriam matéria orgânica e poderiam gerar maus odores (JORDÃO e PESSÔA, 2017); e térmica, que é obtida pela introdução de calor sobre a fração volátil em ambientes fechados, tendo como principal vantagem a obtenção de um produto com alto teor de sólidos (ANDREOLI et al., 2014).

### **2.3.3 Desidratação**

A desidratação pode ocorrer em meios naturais ou de forma mecanizada, onde a principal diferença é que nos meios naturais, a remoção ocorre pela evaporação da água, um processo mais lento, necessitando de um longo período de exposição do material às condições de secagem (VON SPERLING, 2014). Entre os processos naturais utilizados, os mais usados são os leitos de secagem, constituídos na forma de tanques retangulares, onde ocorre a redução da umidade com a drenagem e

evaporação da água. Já nos processos mecânicos, há a compactação ou centrifugação do material de forma acelerada, utilizadas principalmente nas estações de tratamento de médio ou grande porte (JORDÃO e PESSÔA, 2017).

#### **2.3.4 Higienização**

Diversos parasitas intestinais e seus ovos são pouco afetados pelos processos citados acima (VON SPERLING, 2014), por esta razão, outra etapa adicional é necessária, chamada de higienização. Essa pode ser realizada por vias térmica, química, biológica ou por radiação solar, todas visando reduzir o potencial patogênico a níveis aceitáveis e que não possam trazer riscos à saúde humana. As principais formas de higienização são: compostagem, que elimina os agentes patogênicos por efeito da temperatura e tempo de exposição do material; a calagem, que associa o efeito da ação de altos níveis de PH ao calor gerado pelos processos químicos de hidratação; e a secagem térmica, que reduz os agentes pela exposição aos raios solares ou calor (ANDREOLI et al., 2014).

#### **2.3.5 Disposição final de lodo**

As formas de destino do lodo tratado mais utilizadas no Brasil são: a disposição final em aterro sanitário, acondicionados na forma de células onde o lodo passa por processos de biodegradação, sem nenhum aproveitamento do mesmo (LIMA, 2010); o uso em áreas agrícolas, desde que submetidos à controles rígidos no tratamento do lodo, seguindo requisitos exigidos em norma (ANDREOLI et al., 2014); e, por fim, a incineração, que promove a redução do volume por meio da transformação dos sólidos fixos em cinzas e, dos sólidos voláteis em gás carbônico, água e dióxido de enxofre. (JORDÃO e PESSOA, 2017).

### **2.4 SECAGEM TÉRMICA DE LODO DE ESGOTO DOMÉSTICO**

A secagem térmica do lodo é o processo no qual ocorre a redução da umidade do lodo por perda de água promovido por evaporação e destruição de

microrganismos. Neste processo, há a remoção de grande quantidade de água do lodo, mas sem alterar a maior parte dos sólidos totais (ANDREOLI et al., 2006).

Dois processos devem ocorrer de forma simultânea durante a secagem térmica, sendo elas, a evaporação da umidade da parte superficial do lodo, a partir da transferência de energia e, a transferência da umidade do lodo para a sua superfície, de modo que o processo de evaporação tenha continuidade (MUDUMDAR et al., 2006).

Os principais benefícios dessa técnica são a redução do peso e volume do lodo tratado de forma significativa, assim como a destruição de organismos patogênicos (FRANÇA JUNIOR, 2008). Além disso, possibilita a redução de etapas no tratamento do lodo, por conta da estabilização e higienização promovida (BUX et al., 2001).

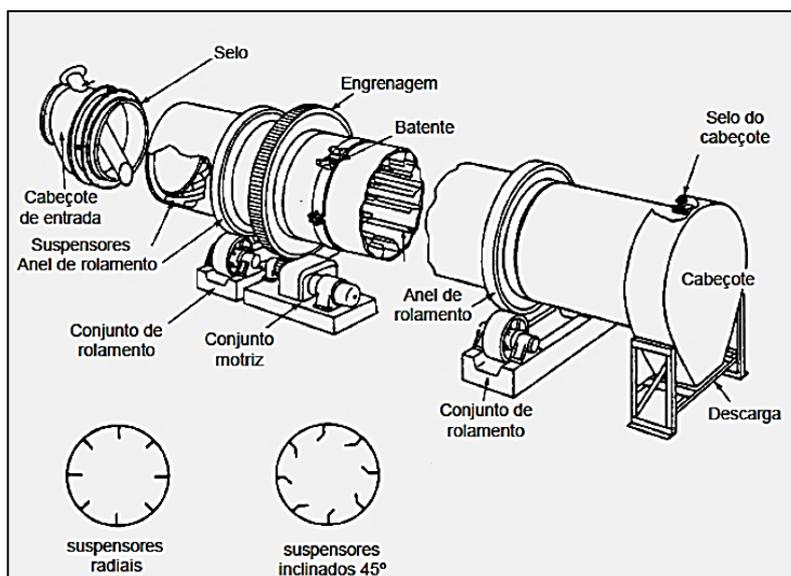
Durante a secagem térmica, a transferência de energia pode ocorrer por meio de: condução (secagem indireta), nesse caso o calor é fornecido pelo contato do lodo com uma parede que o separa do material que transfere o calor, (DAVID, 2002); processo convectivo (secagem direta), o calor é transferido através do agente de secagem (ar aquecido) que passa sobre ou através do sólido; e radiação, com a transmissão do calor radiante para o lodo sem haver contato com gases provenientes da combustão (PARK, 2007).

Os métodos de transferência de calor podem ser classificados em: indiretos, por condução através do contato com superfícies aquecidas por ar quente, vapor ou óleo; diretos, com contato direto do ar com o lodo (por convecção); radiantes (ou infravermelhos); e mistos, quando há a utilização de mais de um método (DAVID, 2002).

As tecnologias de secagem térmica que se destacam são as de secadores rotativos (diretos e indiretos), de esteira (túnel) e plantas de secagem (ANDREOLI et al., 2006).

Os secadores rotativos utilizam cilindros horizontais, levemente inclinados, onde o material é introduzido na parte superior e progride até a outra extremidade através da gravidade ou por pás dispostas nas paredes internas. Podem ser divididos em diretos e indiretos, com base na forma como o calor é transferido, sendo direta a que o lodo entra em contato direto com o gás, e indireta, quando o meio de aquecimento está separado por outro cilindro (ANDREOLI et al, 2006), conforme a Figura 1.

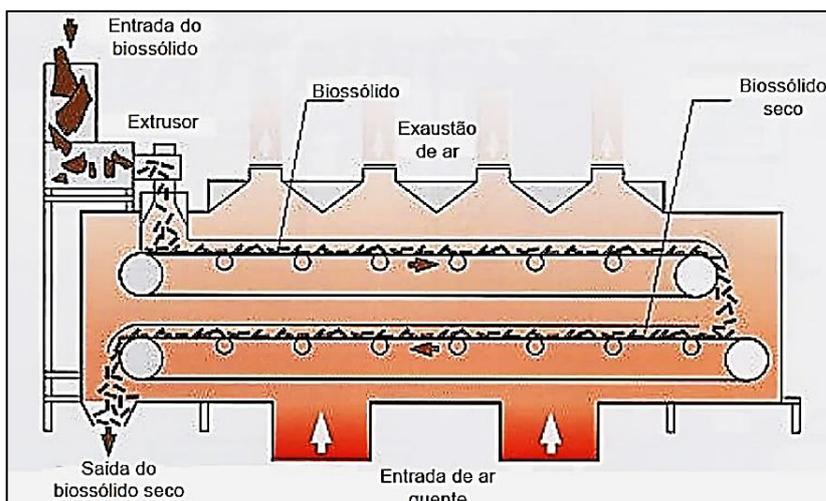
**Figura 1 – Exemplo de Secador Rotativo**



Fonte: WEF, 1992 apud Andreoli et al, 2006.

Os secadores do tipo esteira, ou túnel, são aqueles em que o material passa por um processo sucessivo de secagem através da circulação de ar quente constante. Nesse caso, o lodo úmido é transportado lentamente numa esteira transportadora, que se desloca dentro da câmara de secagem (ANDREOLI et al, 2006), vide Figura 2.

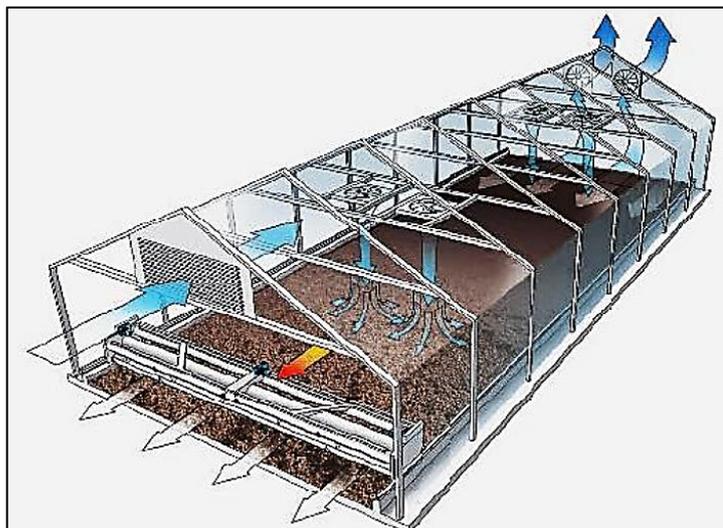
**Figura 2 – Secador transportador de esteira (túnel)**



Fonte: Catálogo Netzsch, 1999 apud Andreoli et al., 2006

Já em relação às plantas de secagem solar, estas utilizam radiação solar e potencial do ar ambiente para secar o lodo, não obrigatoriamente utilizando outra forma de energia para tal (Figura 3).

**Figura 3** – Esquema geral de uma planta de secagem solar



Fonte: Catálogo HUBER (2021).

As principais vantagens desse método são a redução do consumo de energia elétrica, minimizando o custo operacional associado; e a obtenção de um produto com alto teor de sólidos, possibilitando aplicação para outros fins.

Apesar disso, necessita de grandes áreas para instalação das plantas de secagem, além de estarem suscetíveis a influência de variações climáticas ao longo do ano, principalmente em regiões mais frias e chuvosas (BUX et al., 2001).

## 2.5 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO BIOGÁS GERADO EM ETE

O biogás é definido como uma mistura de gases resultantes da digestão anaeróbia da matéria orgânica, e sua composição é bastante variada, dependendo da concentração da matéria orgânica a ser tratada e das condições físico-químicas no digestor. Em reatores anaeróbios que tratam esgoto doméstico, caracterizam-se por apresentar composição de metano na faixa de 70% a 80%, de nitrogênio na faixa de 10% a 25% e de dióxido de carbono entre 5 e 10% (NOYOLA et al., 2006). No Quadro 1, apresenta-se, de acordo com Lobato (2011), a composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbios.

**Quadro 1** – Composição volumétrica típica do biogás em reatores anaeróbios

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica típica
Metano – CH <sub>4</sub>	%	60 – 85
Gás Carbônico – CO <sub>2</sub>	%	5 – 15
Monóxido de Carbono – CO	%	0 – 0,3
Nitrogênio – N <sub>2</sub>	%	10 – 25
Hidrogênio – H <sub>2</sub>	%	0 – 3
Sulfeto de Hidrogênio – H <sub>2</sub> S	ppmv	1000 a 2000
Oxigênio – O <sub>2</sub>	%	Traços

Fonte: adaptado de LOBATO (2011).

É importante que sua composição seja conhecida, principalmente quando for utilizado como fonte energética, em razão da presença de contaminantes, acidez e condições de pressão do biogás. A partir da análise da composição do biogás, é possível conhecer seu poder calorífico, que está diretamente relacionado à quantidade de metano da sua composição (COSTA, 2006). Em condições normais de temperatura e pressão, o metano puro possui um poder calorífico de 9,96 kWh/m<sup>3</sup>, já em concentrações entre 50 e 80%, o poder calorífico fica entre 4,95 e 7,9 kWh/m<sup>3</sup>, respectivamente (VALENTE, 2015).

## 2.6 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO EM ETE

No Brasil, o biogás gerado nas estações de tratamento em sua maioria é captado e levado até queimadores abertos, onde é submetido à destruição térmica com baixa eficiência. Por isso, tem-se incentivado o aproveitamento energético do biogás, principalmente utilizando do potencial calorífico para a geração de energia elétrica e/ou térmica, com o objetivo de promover soluções que minimizem os impactos ambientais (POSSETTI et al, 2015).

### 2.6.1 Combustão direta sem aproveitamento de energia

A combustão direta sem recuperação de energia é o processo realizado por meio de queimadores (dispositivos que possibilitam a ignição e queima desses gases). Essa é a forma mais simples de transformação do biogás. Mesmo que não seja previsto o seu aproveitamento energético, essa modalidade ainda assim deve existir

nos locais em que é gerado biogás por motivo de segurança, para evitar possíveis explosões, para o controle de odores e outras questões ambientais (LOBATO, 2011).

### **2.6.2 Combustão direta com aproveitamento de energia**

Nesse caso, o biogás é submetido à combustão, por exemplo, em câmaras de combustão, onde gera gases quentes que podem ser utilizados no processo de secagem térmica ou aquecimento de caldeiras. Na modalidade de combustão direta com geração e aproveitamento do calor, é possível recuperar 80% do valor calorífico do metano em energia útil. O biogás pode ser canalizado diretamente até o consumidor, onde é utilizado nos equipamentos de combustão, em substituição ou em complementação ao combustível utilizado anteriormente, ou então utilizado em equipamentos como caldeiras e secadores térmicos (LOBATO, 2011).

### **2.6.3 Cogeração de energia elétrica e térmica**

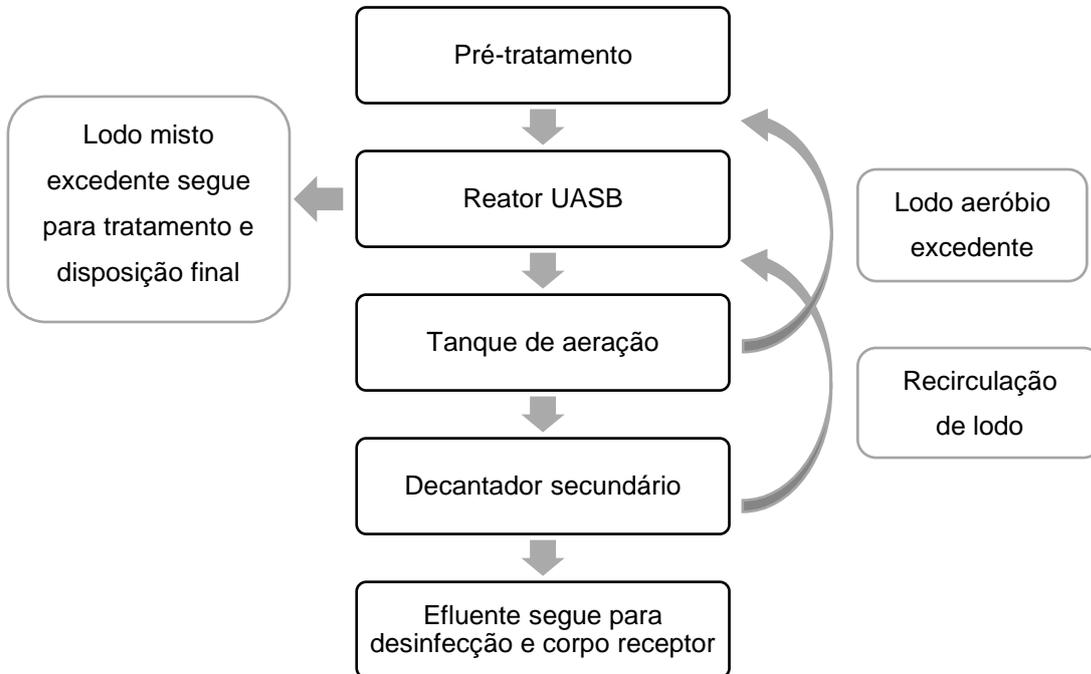
A cogeração é o processo de geração simultânea de múltiplas formas de energia útil, geralmente na forma mecânica e térmica em um único sistema integrado (USEPA, 2011). Na cogeração de energia, onde o biogás é utilizado em motores de combustão interna ou turbinas, a transformação do potencial energético do biogás em energia elétrica também gera calor residual proveniente dos processos de conversão energética. Essa energia pode ser utilizada em processos que necessitem de energia térmica, ou seja, é possível utilizar de duas formas benéficas de energia a partir de apenas uma única fonte primária de energia (JORDÃO e PESSÔA, 2017).

## **3 METODOLOGIA**

O presente trabalho foi desenvolvido com base no dimensionamento preliminar de uma ETE pensada em atender uma população de 100 mil habitantes. A estação apresenta unidades de pré-tratamento de esgotamento sanitário, seguido de tratamento biológico anaeróbio por meio de reatores UASB, de tanque de aeração de tratamento biológico aeróbio por Lodos Ativados, sistema de decantadores secundários e desinfecção do efluente (Figura 4). Nesse tipo de configuração de

tratamento, o lodo aeróbio excedente ainda não estabilizado retorna ao reator UASB para que ele seja estabilizado, em conjunto com o lodo anaeróbio do reator UASB.

**Figura 4** – Sistema de tratamento de esgoto por reator UASB e lodos ativados



Fonte: desenvolvido pelo autor (2021).

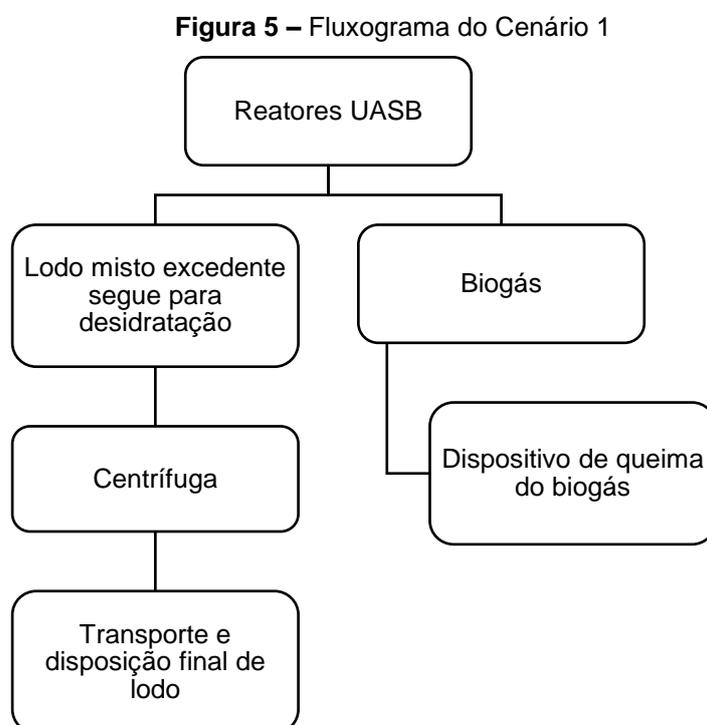
No caso de estações que utilizem de sistemas anaeróbios de tratamento de efluentes, têm-se a vantagem da produção de biogás devido à degradação dos microrganismos anaeróbios presentes no tratamento (CHERNICHARO et al., 2007). Por esse motivo, o presente estudo se propôs a trazer alguns possíveis cenários de utilização do potencial energético do biogás, tanto para a secagem térmica de lodo, quanto para a produção de energia elétrica, que pode ser utilizada na própria estação e, assim, reduzir custos com o consumo de energia elétrica dos demais processos de tratamento.

Assim, para estimar o potencial energético, utilizou-se de estudos acadêmicos publicados a respeito, e informações técnicas sobre as tecnologias empregadas para aproveitamento energético de biogás. Desta forma, foram delineados quatro cenários, sendo três deles com o aproveitamento energético do biogás para a secagem térmica de lodo e geração de energia elétrica, bem como um cenário sem a utilização do biogás gerado na estação para fins de comparação.

### 3.1 DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS PROPOSTOS

#### 3.1.1 Cenário 1 – padrão adotado no Brasil

O Cenário 1 – padrão adotado no Brasil foi considerado como o caso padrão adotado em muitas estações de tratamento de esgoto no Brasil, que utilizam das mesmas técnicas de tratamento. Nesse cenário, não foi considerado o aproveitamento do biogás gerado. Esse cenário servirá como base de referência para avaliar possíveis vantagens da utilização de sistemas de aproveitamento do biogás (Figura 5).



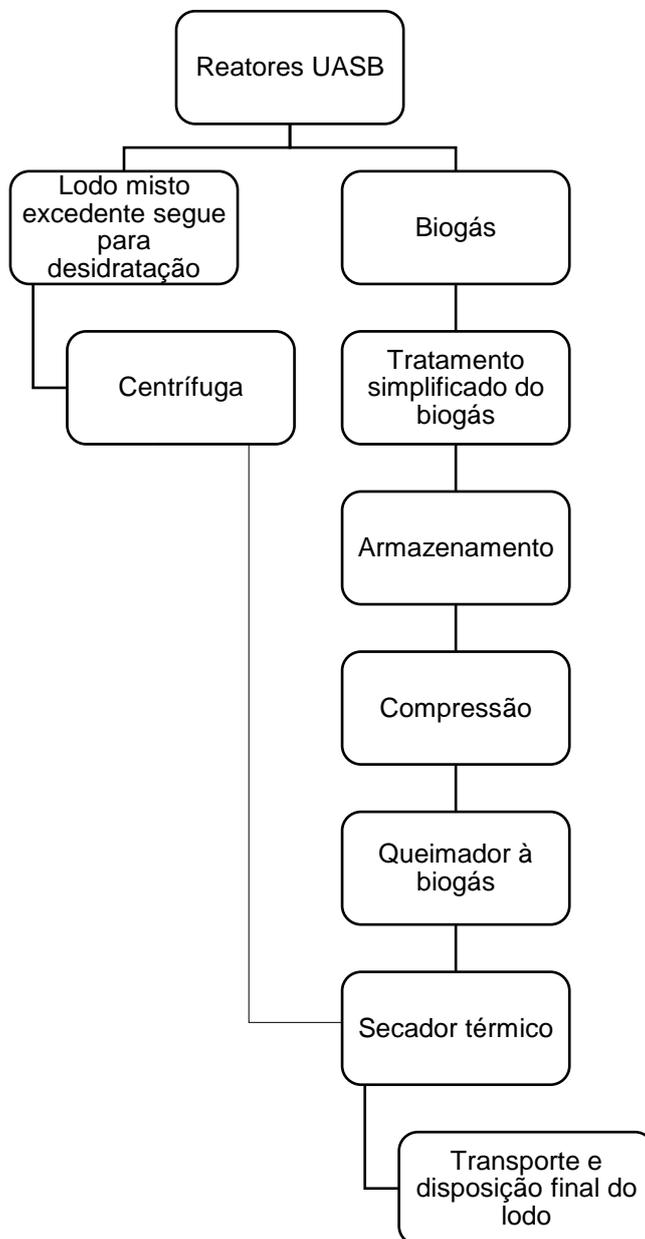
Fonte: desenvolvido pelo autor (2021).

#### 3.1.2 Cenário 2 – secagem térmica

O Cenário 2 – Secagem térmica foi considerado apenas a secagem térmica do lodo gerado. Nele, o biogás seria utilizado totalmente para queima em uma câmara de combustão, sendo todo calor gerado utilizado na secagem térmica do lodo. Segundo Valente (2015), esse cenário deve ser composto por um sistema de coleta e transporte, tratamento simplificado do biogás, sistemas de medição e controle, de armazenamento (gasômetro), compressão e câmara de combustão do biogás (Figura

6). Já em relação ao equipamento de secagem, foi considerado um sistema com previsão de alcançar um teor de sólidos final de pelo menos 80% a 90%.

**Figura 6 – Fluxograma do Cenário 2**



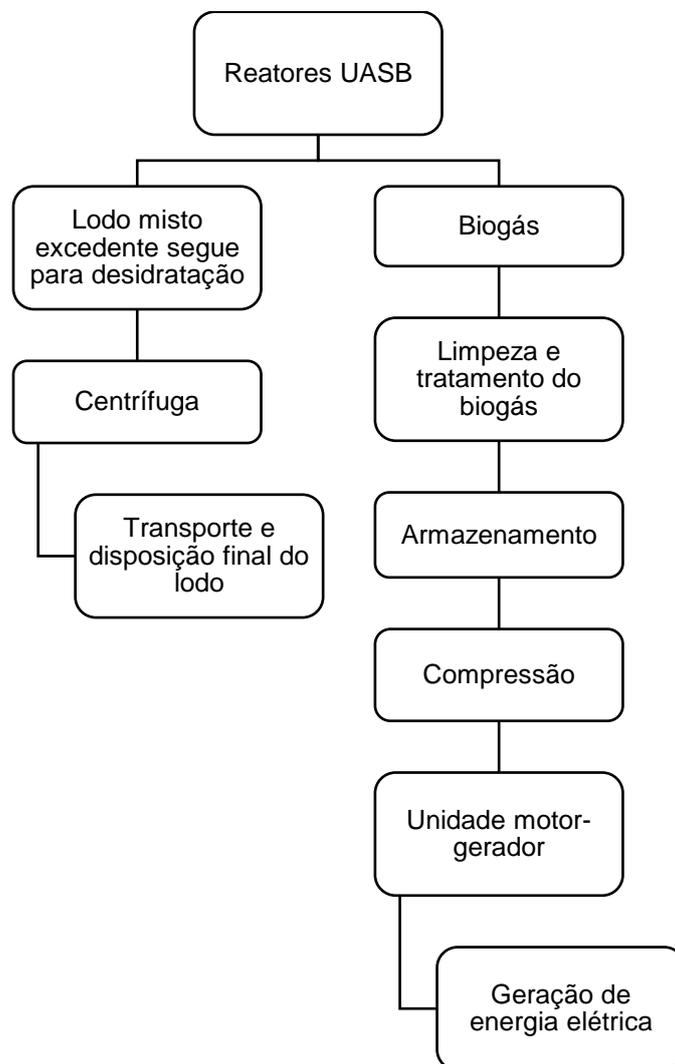
Fonte: adaptado de VALENTE (2015).

### 3.1.3 Cenário 3 – Geração de energia elétrica

No Cenário 3 – Geração de energia elétrica, foi considerado apenas a geração de energia, no qual todo o biogás seria utilizado para geração de energia. Esse cenário não apresenta sistema de aproveitamento dos gases residuais de calor do motor-

gerador. Segundo Rosenfeldt et al. (2015), ele deve ser composto por: sistema de coleta e transporte; sistema de tratamento de biogás para remoção de água e outros sedimentos presentes, armazenamento de biogás (gasômetro) com a biodessulfurização pela injeção de ar em seu interior, assim como um tratamento complementar, combinando um refrigerador com filtro de carvão ativado para remoção residual de umidade e siloxanos (Figura 7). Por fim, compressores alimentam a unidade motor-gerador do tipo Ciclo Otto.

**Figura 7 – Fluxograma do Cenário 3**

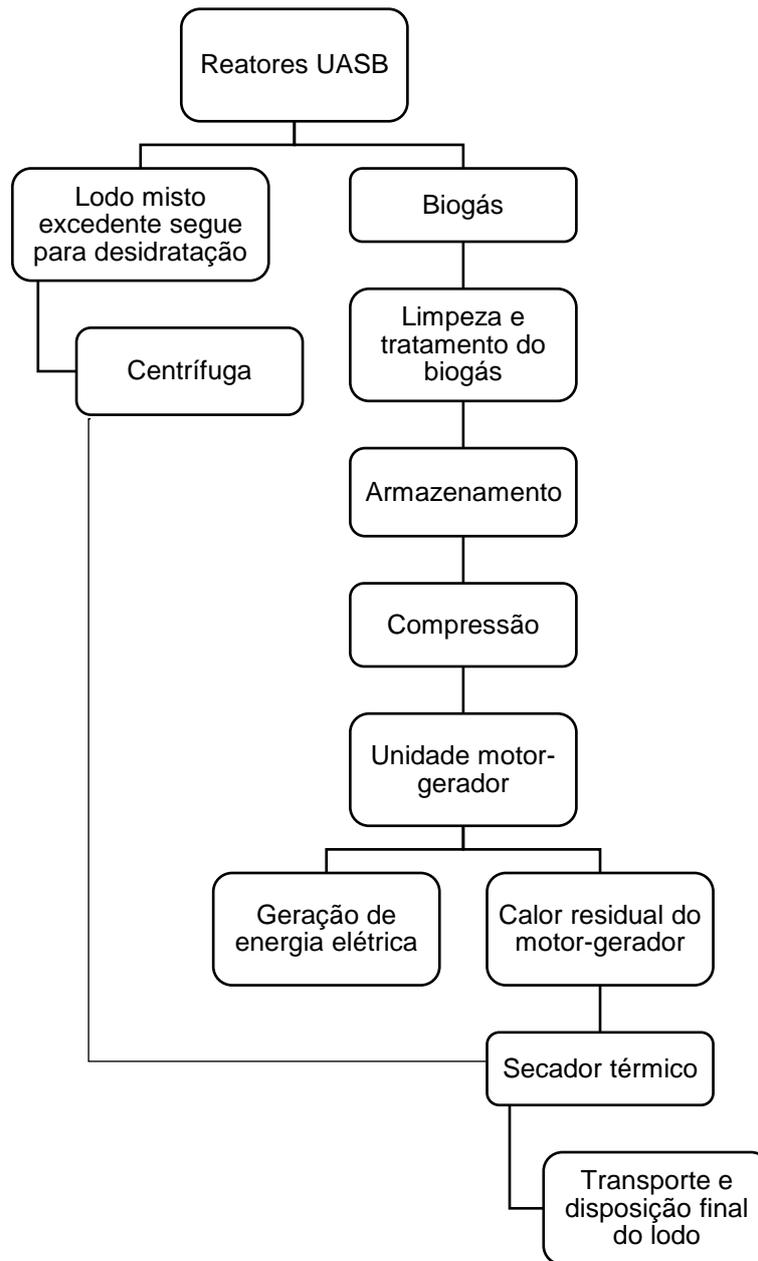


Fonte: adaptado de Rosenfeldt et al (2015).

#### **3.1.4 Cenário 4 – Cogeração**

Por fim, no Cenário 4 – Cogeração, foi considerado que o biogás seria utilizado para geração de energia elétrica. Entretanto, o calor residual proveniente do motor-gerador é captado e aproveitado para um sistema de secagem térmica de lodo (Figura 8). Contudo, nesse caso o calor residual não é suficiente para secagem térmica de toda massa de lodo gerada na ETE. Com isso, considerou-se que apenas uma parcela da massa de lodo seria encaminhada para a secagem térmica, e o restante encaminhado ao aterro sanitário, com seu teor de sólidos previsto após a centrifugação.

**Figura 8 – Fluxograma do Cenário 4**



Fonte: adaptado de Valente (2015).

### 3.2 DIMENSIONAMENTO DA VAZÃO MÉDIA E ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS

Para iniciar o estudo, foi necessário realizar a estimativa dos parâmetros de entrada para os sistemas de tratamento, baseados nos dados conforme descrição no Quadro 2.

**Quadro 2** – Parâmetros de entrada para dimensionamento dos sistemas de tratamento.

Parâmetro	Valor	Observação
População atendida (habitantes)	100.000	(adotado)
Consumo per capta (L/habitantes x dia)	160	(adotado)
Coeficiente de vazão máxima diária - K1	1,2	(1,1 a 1,5) *
Coeficiente de vazão máxima horária - K2	1,5	(1,5 a 3,0) *
Vazão média - Q média (m³/dia)	16.000,0	(habitantes x consumo) /1000
Carga DBO per capta (g DBO/hab x dia)	54,0	(45 a 60 g) **
Carga DQO per capta (g DQO/hab x dia)	110,0	(90 a 120 g) **
(*) NBR 9649/1986, (**) NBR 12209/2011		

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2021).

Tendo a estimativa de vazão média da ETE, pode-se realizar a estimativa de produção de biogás pelos reatores UASB. A avaliação foi feita por meio do pré-dimensionamento dos reatores anaeróbios através da metodologia de cálculo proposta por Chernicharo et al. (2007). Deste modo, realizou-se o balanço de massa dos reatores UASB conforme os dados presentes nos Quadros 3 e 4, permitindo a obtenção dos valores de produção de biogás estimada considerando as possíveis perdas.

**Quadro 3** – Equações para a quantificação do biogás dos reatores UASB e produção de lodo da ETE (continua)

Nº	Equação
1	$S_0 = \frac{\text{População}(\text{hab}) \times \text{Carga per capita} (\text{g} / \text{hab} \times \text{dia}) \times 1000}{86400} \times \frac{1}{Q_{\text{méd}}(\frac{\text{m}^3}{\text{d}})}$
2	$L_0 = S_0 \times Q_{\text{méd}}$
3	$S = S_0 - \frac{E \times S_0}{100}$
4	$L = L_0 - \frac{E \times L_0}{100}$
5	$DQO_{CH_4} = Q_{\text{méd}} \times [(S_{DQO} - S_{DQO}) - Y_{DQO} \times S_{DQO}]$
6	$K(t) = \frac{P \times K}{R \times (273 + t)}$
7	$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)}$
8	$Q_{\text{biogás}} = \frac{Q_{CH_4}}{\% CH_4 \text{ no biogás}}$

**Quadro 3** – Equações para a quantificação do biogás dos reatores UASB e produção de lodo da ETE  
(continuação)

Nº	Equação
9	$Q_{biogás\ disponível} = Q_{biogás} \times (1 - \% \text{ perda de biogás})$
10	$Produção\ de\ lodo\ UASB = L_0 DQO \times Y_{UASB}$
11	$L_0 = L_0 DBO \times (1 - \% \text{ remoção de DBO lodos ativados})$
12	$Px = Y (\text{lodos ativados}) \times L_0 DBO$
13	$Sólidos\ voláteis = Px \times \text{distribuição de lodo excedente} \times (100\% - 35\%)$
14	$Sólidos\ fixos = Px \times (1 - \text{distribuição de lodo excedente})$
15	$Sólidos\ totais = voláteis + fixos$

Fonte: adaptado de CHERNICHARO et al (2007).

**Quadro 4** – Cálculo da produção estimada de biogás e lodo (continua)

Parâmetro	Valor	Observação
<b>UASB</b>		
Coeficiente de produção de sólidos - Y UASB (Kg SST / kg DQO apl)	0,18	(0,12 - 0,18) *
Coeficiente de produção de sólidos, em termos DQO - Y DQO (Kg DQO lodo / kg DQO apl)	0,21	(0,11 – 0,23) *
Tempo de detenção hidráulica para vazão média - TDH (horas)	10,00	(8 - 10) *
Concentração DBO afluente - So DBO (Kg DBO/ m <sup>3</sup> )	0,338	Equação 1
Concentração DQO afluente - So DQO (Kg DQO/ m <sup>3</sup> )	0,688	
Carga afluente média DBO - Lo DBO (Kg DBO/dia)	5.400,00	Equação 2
Carga afluente média DQO - Lo DQO (Kg DQO/dia)	11.000,00	
Eficiência em termos de remoção DQO (%)	65,00	(65 – 75%) *
Eficiência em termos de remoção DBO (%)	65,00	
Concentração DBO efluente - S DQO (Kg DBO/ m <sup>3</sup> )	0,1181	Equação 3
Concentração DQO efluente - S DQO (Kg DQO/ m <sup>3</sup> )	0,2406	
Carga efluente média DBO - L DBO (kg DBO/dia)	1.890,0	Equação 4
Carga efluente média DQO - L DQO (kg DQO/dia)	3.850,0	
Parcela de DQO convertida em gás metano - DQO CH <sub>4</sub> (kg DQO / dia)	4.840,00	Equação 5
Fator de correção da temperatura operacional do reator – K(t) (kg DQO / m <sup>3</sup> )	2,69	Equação 6

**Quadro 4 – Cálculo da produção estimada de biogás e lodo (continuação)**

Parâmetro	Valor	Observação
<b>UASB</b>		
Produção volumétrica de metano estimada - Q CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /dia)	1.796,66	Equação 7
Porcentagem de metano no Biogás (%)	75,0	(70 – 80%) *
Produção volumétrica de biogás estimada - Q bio (m <sup>3</sup> /dia)	2.395,55	Equação 8
Perdas biogás (%)	30,0	(adotado)
Vazão de Biogás disponível - Q bio disp (m <sup>3</sup> /dia)	1.676,89	Equação 9
Produção de lodo no UASB - P UASB (KgSSt / dia)	1.980,0	Equação 10
<b>LODOS ATIVADOS</b>		
Carga afluyente média DBO - Lo DBO (Kg DBO/dia)	1.890,00	-
Eficiência em termos de remoção DBO (%)	85,0	(85 - 95%) **
Coefficiente de produção de lodo - Y lodos ativados (KgSSt /kgDBO5 removida)	0,65	**
Carga efluente média DBO - L DBO (Kg DBO/dia)	283,5	Equação 11
Produção de lodo excedente - P <sub>x</sub> (KgSSt/d)	1.228,50	Equação 12
Distribuição de lodo excedente em termos de sólidos voláteis e fixos (SSV/SS)	0,75	**
Sólidos voláteis - P <sub>xv</sub>	598,89	Equação 13
Sólidos fixos - P <sub>xf</sub>	307,13	Equação 14
Sólidos totais - P <sub>xt</sub>	906,02	Equação 15
Produção de lodo total: UASB + Lodos Ativados (KgSSt / dia)	<b>2.886,02</b>	-
(*) CHERNICHARO et al (2007), (**) VON SPERLING (2012).		

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2021).

### 3.3 ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO VOLUMÉTRICA DE LODO

A partir das informações dos Quadros 3 e 4, foi estimada a produção diária de lodo nos reatores UASB. Além disso, foi possível estimar as cargas do efluente que seriam encaminhadas para a etapa seguinte de tratamento pelos reatores de lodos ativados. Também foi possível estimar a produção de lodo excedente aeróbio gerado pelos reatores de lodos ativados que são encaminhados para o reator UASB para

estabilização, onde é adotada uma redução de 35% dos sólidos voláteis desta fração aeróbia.

A estimativa da produção de lodo ( $P$  lodo total) foi realizada por meio da soma do lodo produzido nas unidades de tratamento biológico (reatores UASB + lodos ativados) formando um lodo misto composto por essas duas parcelas. Já para a estimativa da produção de lodo após a desidratação, considerou-se que o teor de sólidos totais na massa de lodo processada na centrífuga (%TS cent) é igual a 25%, e uma massa específica do lodo desaguado ( $\gamma$  cent) igual a  $1.050 \text{ kg.m}^{-3}$ .

### 3.4 DEMANDA ENERGÉTICA DO PROCESSO DE SECAGEM TÉRMICA DO LODO

Para a realização dos cálculos da determinação da demanda energética do secador térmico, foram realizados os cálculos da produção volumétrica de lodo no secador térmico ( $V$  lodo sec) para a obtenção de um lodo com um teor de sólidos total (%TS sec) de 90%, considerando a massa específica do lodo seco ( $\gamma$  sec) igual a  $1.100 \text{ kg.m}^{-3}$ . Com esses valores, foi possível calcular a massa de água evaporada ( $M$  água evap) no sistema. Por fim, com os valores da quantidade de água evaporada, foi possível determinar a demanda energética da secagem térmica do lodo a partir do consumo específico de energia térmica e elétrica do secador.

### 3.5 AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS

Os parâmetros e os cálculos utilizados para realizar a avaliação do potencial energético estão presentes nos Quadros 5 e 6, e terão seus resultados discutidos no próximo tópico.

**Quadro 5 – Parâmetros para avaliação do potencial energético do biogás**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>	<b>Observação</b>
Vazão de Biogás disponível	m <sup>3</sup> /dia	1676,89	-
Poder calorífico inferior biogás (75% metano)	KWh/m <sup>3</sup>	7,47	(VALENTE, 2015)
Eficiência elétrica do motor gerador	%	37,0	(ROSENFELDT, 2015)
Rendimento térmico - combustão biogás	%	80,0	(LOBATO, 2011)
Rendimento térmico - cogeração	%	39,0	(VALENTE, 2015)
Regime de geração de energia	horas	24,0	(adotado)
Fator disponibilidade produção anual de energia elétrica	%	90,0	(adotado)
Demanda de energia térmica do secador	KWh/Kg água	0,9	(HUBER, 2015)
Demanda de energia elétrica do secador	KWh/Kg água	0,09	(HUBER, 2015)
Teor de Sólidos secos (após centrífuga)	%	25,0	-
Teor de umidade lodo (após centrífuga)	%	75,0	-
Teor de Sólidos secos (após secagem)	%	90,0	-
Teor de umidade lodo (após secagem)	%	10,0	-
Densidade do lodo (TS: 25%)	Kg/m <sup>3</sup>	1050,0	(ANDREOLI, 2014)
Densidade do lodo (TS: 90%)	Kg/m <sup>3</sup>	1100,0	
Custo transporte e disposição de Lodo	R\$/t	250,0	(adotado)
Custo médio de energia e impostos	R\$/KWh	0,46045	(CELESC, 2020)

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2021).

**Quadro 6** – Equações utilizadas para avaliação do potencial energético do biogás (continua)

Nº	Equação	Observações
1	$E_{\text{bio}}(\text{disp}) = Q_{\text{bio}}(\text{disp}) \times \text{PCI}_{\text{biogás}}$	$E_{\text{bio}}(\text{disp})$ - Energia disponível no biogás (kWh/dia), $Q_{\text{bio}}(\text{disp})$ - Vazão de biogás disponível (m³/d), PCI biogás - Poder Calorífico inferior biogás - (75% metano) (KWh/dia).
2	$E_{\text{elétrica}}(\text{disp}) = E_{\text{bio}}(\text{disp}) \times \mu_{\text{eletr}}$	$E_{\text{elétrica}}(\text{disp})$ - Energia elétrica disponível pelo motor gerador (KWh/d), $E_{\text{bio}}(\text{disp})$ - Energia biogás disponível (kWh/dia), $\mu_{\text{eletr}}$ - Eficiência elétrica do motor gerador (%).
3	$P(\text{eletr}) = E_{\text{elétrica}}(\text{disp}) \div H$	$P(\text{eletr})$ - Potência elétrica do motor gerador, $E_{\text{elétrica}}(\text{disp})$ - Energia elétrica disponível pelo motor gerador (KWh/d), $H$ - Regime de geração de energia (horas).
4	$E_{\text{elétrica}}(\text{anual disp}) = E_{\text{elétrica}}(\text{disp}) \times 365 \text{ dias} \times \text{FD}$	$E_{\text{elétrica}}(\text{anual disp})$ - Energia elétrica anual disponível pelo motor gerador (KWh/d), $\text{FD}$ - Fator de disponibilidade de produção de energia (%).
5	$V_{\text{lodo}}(\text{cent}) = (P_{\text{uasb}} + P_{\text{lodos ativos}}) \div (\% \text{ TS}_{\text{cent}} \times \gamma_{\text{lodo cent}})$	$V_{\text{lodo}}(\text{cent})$ - Volume de lodo produzido após centrífuga (m³/dia), $\% \text{ TS}_{\text{centrífuga}}$ - Teor de sólidos após a centrífuga, $\gamma_{\text{lodo}}(\text{cent})$ - Massa específica do lodo após centrífuga.
6	$V_{\text{lodo}}(\text{sec}) = (P_{\text{uasb}} + P_{\text{lodos ativos}}) \div (\% \text{ TS}_{\text{sec}} \times \gamma_{\text{lodo sec}})$	$V_{\text{lodo}}(\text{sec})$ - Volume de lodo após a secagem (m³/dia), $\% \text{ TS}_{\text{sec}}$ - Teor de sólidos após a secagem, $\gamma_{\text{lodo}}(\text{sec})$ - Massa específica do lodo após secagem.
7	$V_{\text{água}}(\text{evap}) = V_{\text{lodo}}(\text{cent}) - V_{\text{lodo}}(\text{sec})$	$V_{\text{água}}(\text{evap})$ - Volume de água evaporada do lodo no secador térmico (kg/dia), $V_{\text{lodo}}(\text{cent})$ - Volume de lodo produzido na centrífuga (m³/dia), $V_{\text{lodo}}(\text{sec})$ - Volume de lodo após a secagem (m³/dia).
8	$E_{\text{térmica}}(\text{disp}) = E_{\text{bio}}(\text{disp}) \times \mu_{\text{term}}$	$E_{\text{térmica}}(\text{disp})$ - Energia térmica disponível para secagem, $\mu_{\text{term}}$ - rendimento térmico para secagem ( $\mu_{\text{cob}}$ ou $\mu_{\text{cog}}$ ).
9	$E_{\text{térmica}}(\text{req}) = E_{\text{term}} \times M_{\text{água}}(\text{evap})$	$E_{\text{térmica}}(\text{req})$ - Energia térmica requerida pelo secador térmico (Kwh/dia), $E_{\text{term}}$ - Consumo de térmica (Kwh/ Kg água removida), $M_{\text{água}}$ - Massa de água evaporada (Kg).
10	$E_{\text{elétrica}}(\text{req}) = E_{\text{elet}} \times M_{\text{água}}(\text{evap})$	$E_{\text{elétrica}}(\text{req})$ - Energia elétrica requerida pelo secador térmico (Kwh/dia), $E_{\text{elet}}$ - Consumo de energia elétrica (Kwh/ Kg água removida), $M_{\text{água}}$ - Massa de água evaporada (Kg).
11	$M_{\text{lodo}}(\text{evitada}) = [M(\text{cent}) - M(\text{sec})] \times 365$	$M_{\text{lodo}}(\text{evitada})$ - Massa de lodo evitada para o aterro sanitário (t/ano), $M(\text{cent})$ - Massa de lodo produzida após a centrífuga (t/dia), $M(\text{sec})$ - Massa de lodo após a secagem (t/dia).
12	$\text{Custo}(\text{evitado}) \text{ energia eletr} = E_{\text{elétrica}}(\text{anual disp}) \times \text{Custo}(\text{eletr})$	$\text{Custo}(\text{evitado}) \text{ energia elétrica}$ - Custo evitado pela geração de energia elétrica (R\$/ano), $E_{\text{elétrica}}(\text{disp})$ - Energia elétrica disponível pelo motor gerador (KWh/d), $\text{Custo}(\text{eletr})$ - Custo de energia elétrica para estações de tratamento.

**Quadro 6** – Equações utilizadas para avaliação do potencial energético do biogás (continuação)

N°	Equação	Observações
13	Custo (evitado) disposição de lodo = M lodo evitada x Custo (transp e disp lodo)	Custo (evitado) energia elétrica - Custo evitado com o transporte e disposição final de lodo (R\$/ano), M lodo (evitada) - Massa de lodo evitada para o aterro sanitário (t/ano), Custo (transp e disp lodo) - Custo com transporte e disposição final de lodo (R\$/t).

Fonte: adaptado de Valente (2015) e Andreoli et al (2014).

### 3.6 CUSTOS EVITADOS PELO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS

A análise dos custos evitados da ETE foi pautada no aproveitamento energético do biogás para secagem térmica com conseqüente redução do volume de lodo gerado na estação reduzindo, assim, a massa de lodo enviada ao aterro sanitário para disposição final e no aproveitamento da energia elétrica gerada que foi poupada por conta da produção do motor-gerador.

## 4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O Cenário 1 – padrão adotado no Brasil foi utilizado como base de referência para comparar com os demais cenários, com isso foi apenas avaliado a quantidade de massa de lodo gerada após a centrifugação, que serviu como comparativo para os demais casos que consideraram o aproveitamento energético do biogás.

Caso fosse implantando o Cenário 2 – Secagem térmica, seria obtido um aumento do consumo de energia elétrica na estação de tratamento, já que todo biogás seria utilizado para secagem térmica do lodo e não haveria sistema de geração de energia elétrica. Desse modo, o resultado da parcela custo evitado-geração energia elétrica teve seu resultado negativo (considerando o custo com energia elétrica para o sistema de secagem térmica nesse cenário é de R\$ 126.109,80 por ano). Por outro lado, ocorreria uma significativa redução na quantidade de lodo destinada aos aterros sanitários, com uma redução de 72,22% de massa de lodo enviada ao local, o que representaria uma economia anual estimada de R\$ 760.786,88.

Em relação ao Cenário 3 – Geração de energia elétrica, ter-se-ia todo o potencial do biogás utilizado para o sistema de produção de energia elétrica. Deste modo, o resultado com custo evitado-geração de energia elétrica teve o valor de R\$ 701.043,07 ao ano, valor esse economizado, considerando que os demais

processos de tratamento de esgoto utilizam de energia elétrica. Em contrapartida, não ocorreria redução da massa do lodo e, assim, o custo evitado com a disposição final de lodo teve seu resultado zerado.

Por fim, o Cenário 4 – Cogeração é o caso em que se teria a junção de geração de energia elétrica e aproveitamento do calor residual do motor-gerador para secagem térmica do lodo. Nesse cenário, o calor residual não seria suficiente para realizar a secagem de toda massa de lodo. Por isso, nesse cenário considerou-se que apenas parte da massa de lodo foi enviada para secagem térmica, para obter o teor de sólidos final estimado de 90%, e assim, a redução da massa de lodo enviada ao aterro foi de 47,02%, que representa uma economia anual estimada de R\$ 495.312,38. Já o custo evitado-geração de energia elétrica teve o seu valor estimado de R\$ 701.043,07 ao ano, e se descontado o valor estimado com o consumo de energia elétrica do sistema de secagem térmica, teria como valor final estimado de R\$ 618.938,94 ao ano. Por fim, o custo evitado com a disposição final de lodo foi de R\$ 495.312,38 ao ano.

Considerando os três cenários que utilizam o potencial energético do biogás, seria possível obter reduções com os custos com transporte e disposição final de lodo nos Cenários 2 e 4, com maior valor economizado nesse quesito no Cenário 2, já que nesse caso toda massa de lodo é enviada para secagem térmica. Já no Cenário 3, não seriam obtidos ganhos com a redução da massa de lodo gerada, mas seria alcançado uma redução maior de custos com energia elétrica na ETE para os demais processos de tratamento da estação. O comparativo entre os cenários proposto no trabalho pode ser visualizado no Quadro 7.

**Quadro 7 – Resultados da estimativa do potencial energético do biogás**

Parâmetros	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4
<b>Biogás e energia elétrica</b>				
Volume de biogás disponível (m³/dia)	1676,89	1676,89	1676,89	1676,89
Energia no biogás disponível (KWh/dia)	12.526,34	12.526,34	12.526,34	12.526,34
Potência elétrica instalada (KW)	-	-	193,1	193,11
Eficiência elétrica (%)	-	-	37,0%	37,0%
Energia elétrica disponível (KWh/dia)	-	-	4.634,75	4.634,75
<b>Sistema secagem térmica do lodo</b>				
Energia elétrica requerida - secador térmico (KWh/dia)	-	750,37	-	488,53
Eficiência térmica (%)	-	80,0%	-	39,0%
Energia térmica disponível - secagem térmica (KWh/dia)	-	10.021,07	-	4.885,27
Energia térmica requerida - secagem térmica (KWh/dia)	-	7.503,7	-	4.885,27
<b>Características do lodo gerado</b>				
Teor de sólidos no lodo (%) - após centrifuga	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
Volume de lodo produzido - após centrifuga (m³/dia)	10,99	10,99	10,99	10,99
Massa de lodo produzida - após centrifuga (t/dia)	11,54	11,54	11,54	11,54
Massa de lodo produzida - após centrifuga (t/ano)	4213,59	4213,59	4213,59	4213,59
Teor de sólidos (%) - após a secagem	-	90,0%	-	90,0%
Volume de lodo (m³/dia) - após a secagem	-	2,92	-	5,69
Massa de lodo - enviada ao aterro (t/dia)	11,54	3,21	11,54	6,12
Massa de lodo - enviada ao aterro (t/ano)	4213,59	1170,44	4213,59	2232,34
Massa de lodo - evitada ao aterro sanitário (t/ano)	0,00	3.043,15	0,00	1.981,25
Redução de massa enviada ao aterro sanitário (%)	0,00%	72,22%	0,00%	47,02%
<b>Economia prevista dos cenários propostos</b>				
Custo (evitado) - geração de energia elétrica (R\$/ano)	R\$ 0,00	-R\$ 126.109,80	R\$ 701.043,07	R\$ 618.938,94
Custo (evitado) - disposição final de lodo (R\$/ano)	R\$ 0,00	R\$ 760.786,88	R\$ 0,00	R\$ 495.312,38
<b>Economia (total) prevista dos cenários propostos</b>	<b>R\$ 0,00</b>	<b>R\$ 634.677,08</b>	<b>R\$ 701.043,07</b>	<b>R\$ 1.114.251,32</b>

Fonte: Desenvolvido pelo autor (2021).

Após a análise dos dados dispostos no Quadro 7, é possível observar que o Cenário 2 mostrou-se mais eficiente para a redução total da massa de lodo, o que do ponto de vista ambiental é mais benéfico, já que uma menor quantidade de lodo é destinada aos aterros sanitários, reduzindo os custos operacionais da ETE. Entretanto, isto não foi suficiente para garantir a maior economia total prevista entre os cenários. O Cenário 3, apresentou a segunda maior economia total prevista entre os cenários, contudo nesse cenário não se obteve os benefícios ambientais com a redução da massa de lodo enviada para os aterros sanitários.

Já o Cenário 4, pode-se observar a maior economia total entre os cenários propostos, o que indica que a associação do processo geração de energia e secagem térmica se mostrou mais efetivo do ponto de vista de redução dos custos evitados. Tal redução dos custos na ETE tende a estimular a utilização de tais processos de aproveitamento.

O presente trabalho se resumiu a calcular possíveis custos evitáveis de cada um dos cenários discutidos acima, não analisando a viabilidade econômica dos cenários propostos, entretanto segundo o estudo de VALENTE (2015), que realizou a análise de alternativas de aproveitamento energético do biogás em diferentes escalas de estações de tratamento, sugere que a viabilidade econômica dos sistemas de aproveitamento energético poderia ser obtida a partir de uma escala mínima de 100.000 habitantes. Por outro lado, o estudo de Rosenfeldt et al., (2015), que realizaram um estudo de viabilidade para projetos visando a produção de energia elétrica a partir do biogás, indicam que a escala mínima pode ser alcançada a partir de 200 KW de potência instalada dos motores-geradores.

De qualquer forma, com as análises realizadas nesta pesquisa, pode-se sugerir que é possível reduzir os custos operacionais da ETE utilizando-se do potencial energético do biogás gerado, o que torna essa alternativa bastante atrativa quando disponível. Por fim, destaca-se, que o processo de aproveitamento do biogás sempre será uma opção mais vantajosa do ponto de vista ambiental, como já sugerido por VALENTE (2015) e por RIETOW (2019).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em relação às estimativas de aproveitamento energético, os três cenários apresentaram uma economia ao que tange os custos operacionais da estação de tratamento, com destaque para o Cenário 4 (Cogeração), que apresentou uma maior economia total entre os cenários avaliados. Nesse sentido, o aproveitamento energético do biogás gerado em estações de tratamento surge como uma alternativa para diminuição dos custos com gerenciamento de lodo e com energia elétrica da estação.

Cabe ressaltar que o presente estudo se limitou a analisar de forma preliminar a produção de lodo dos sistemas de tratamento de esgoto, a quantidade de energia que pode ser obtida pelo aproveitamento do biogás e a relação destes com os possíveis custos. O impacto financeiro da atividade vai além desses pontos, relacionado também a aquisição de equipamentos para o aproveitamento energético do biogás e à manutenção dos sistemas envolvidos.

Sendo assim, é possível sugerir que a utilização do biogás produzido no tratamento do esgoto é uma alternativa para a geração de energia e para secagem térmica do lodo, podendo contribuir de forma relevante para a redução dos custos operacionais do tratamento do esgoto doméstico. Entretanto, estudos sobre a disposição final do lodo que não em aterros sanitários e sobre os custos intrínsecos de cada uma das tecnologias envolvidas e a relação que estas têm com o custo total são necessários de forma a corroborar com as informações levantadas nesse trabalho. Estes pontos poderão fornecer maiores subsídios para uma análise mais completa da viabilidade ambiental e econômica da utilização do biogás como substrato energético.

## 6 REFERÊNCIAS

- ANDREOLI, C.V. et al. **Alternativas de Uso de Resíduos de Saneamento**. Projeto PROSAB (ABES), Rio de Janeiro, 2006.
- ANDREOLI, C.V. et al. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final. 2. ed.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais; Curitiba: SANEPAR, 2014. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.6).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 12209 - Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro 2011. 53 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) **NBR 9649 - Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro 1986. 7 p.
- BRASIL, MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO REGIONAL - **Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento - Diagnóstico dos serviços de Água e Esgoto** – 2019. Brasília, Dezembro 2020 a.
- BRASIL. **Lei n ° 14.026 de 15 de Julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico**. Diário Oficial da União. Brasília, Julho. 2020 b.
- BUX, M. et al. **Class-A by solar drying recente experiences in Europe. Proceedings of the WEFTEC (Water Environment Federation) Congress**, Atlanta, 2001.
- CELESC. Resolução nº 2.756, de 18 de agosto de 2020. **Homologação Tarifas de energia elétrica – Tarifa Grupo b, subgrupo B3 – Água, esgoto e Saneamento**. Disponível em: <https://www.celesc.com.br/tarifas-de-energia#tarifas-vigentes>. Acesso em: 15 junho. 2021.
- CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores Anaeróbios. 2. ed.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.5).
- COSTA, D.F. **Geração de energia a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- DAVID, A.C. **Secagem Térmica de Lodo de Esgoto, Determinação da umidade de equilíbrio**. 2002. 163 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2002. 1312 p.
- FRANÇA JUNIOR, A.T. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto**. 2008. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

HUBER. **Secador Térmico de Esteira – HUBER BT, 2015.** <https://www.huber-technology.com.br/br/produtos/tratamento-de-lodo/secagem/secador-de-temperatura-media-huber-bt.html>

HUBER. **Secagem Solar e Regenerativa - HUBER SRT, 2021.** <https://www.huber-technology.com.br/br/produtos/tratamento-de-lodo/secagem/secagem-solar-e-regenerativa-huber-srt.html>

JORDÃO, E.P; PESSÔA, C.A. **Tratamento de Esgotos Domésticos. 8. ed.** Rio de Janeiro: ABES, 2017.

LIMA, M.R.P. **Uso de estufa agrícola para secagem e higienização de lodo de esgoto.** 2010. 286 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Hidráulica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LOBATO, L.C.S. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico.** 2011. 184 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011.

MUJUMDAR, A.S.; YUE, P.L.; CHEN, G. **Dewatering and drying of wastewater treatment sludge. Handbook of Industrial Drying.** 3ª ed., CRC Press. 1312 p., 2006.

NOYOLA, A. et al. **Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery. Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology, v.5,** 2006.

PARK, K.J. **Conceitos de Processo e Equipamentos de secagem.** Campinas: 2007. 127 p

POSSETTI, G.R.C et al. **Investigação experimental de um sistema piloto de secagem térmica de lodo movido a biogás.** Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28ª edição, Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

RIETOW, J.C. **Avaliação do Processo de Cogeração de Energia em uma ETE com Produção de Biogás.** 2019. 26 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Tecnologias da Cadeia Produtiva do Biogás, Campus Medianeira, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2019.

ROSENFELDT, S. et al. **Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético por meio de motor-gerador em uma estação de tratamento.** 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2015.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2011. **Opportunities for Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities: Market Analysis and Lessons from the Field.** Washington, DC: EPA, 2011 57 p.

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. 198 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, Universidade Federal Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de Esgotos. 4ª ed.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2014. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.1).

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados. 3. ed.** Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.4).