

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

ANA LAURA CAMPOS GOMES

**Avaliação técnica e econômica do potencial energético do biogás proveniente da estação
de tratamento de esgoto de São José do Rio Preto.**

SÃO CARLOS – SP

2019

ANA LAURA CAMPOS GOMES

Avaliação técnica e econômica do potencial energético do biogás proveniente da estação de tratamento de esgoto de São José do Rio Preto.

Versão corrigida

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Ambiental a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof^a. Dra. Márcia Helena Rissato Zamariolli Damianovic

São Carlos – SP

2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C633a Campos Gomes, Ana Laura
Avaliação técnica e econômica do potencial energético do biogás proveniente da estação de tratamento de esgoto de São José do Rio Preto. / Ana Laura Campos Gomes; orientadora Márcia Helena Rissato Zamariolli Damianovic. São Carlos, 2019.

Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2019.

1. biogás. 2. estação de tratamento de esgoto. 3.
produção de energia. 4. viabilidade econômica. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Ana Laura Campos Gomes**

Data da Defesa: 22/02/2019

Comissão Julgadora:

Resultado:

Márcia Helena Rissato Zamariolli Damianovic (Orientador(a))

Aprovada

Benedito Aparecido dos Santos Rodrigues

Aprovada

Lucas Tadeu Fuess

Aprovada



Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por sempre me apoiarem e me compreenderem em todos os momentos da minha vida e por terem me fornecido a melhor estrutura para chegar até aqui.

A Deus por me dar saúde e sabedoria para superar as dificuldades.

A todos os professores da USP São Carlos que contribuíram para a minha formação e desenvolvimento pessoal e profissional. Em especial, a minha orientadora Marcia Damianovic, pelo suporte, correções e incentivos dados durante o pouco tempo que lhe coube.

Aos amigos da turma 014 da Engenharia Ambiental pela força e companheirismo dados durante os cinco anos, que com certeza, foram de grande importância para a minha formação pessoal e acadêmica.

À Semana da Engenharia Ambiental por me permitir participar de novas experiências e mostrar novos caminhos para nossa área de atuação.

A Universidade de Michigan pela oportunidade de conhecer novas culturas e fazer novos amigos.

Ao SeMAE e todos os funcionários pelo aprendizado adquirido durante meu estágio e todo auxílio para a realização desse trabalho.

A todas as pessoas que participaram direta ou indiretamente da minha formação, meu muito obrigado.

RESUMO

GOMES, A. L. C. **Avaliação técnica e econômica do potencial energético do biogás proveniente da estação de tratamento de esgoto de São José do Rio Preto.** 2019. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2019.

Atualmente na estação de tratamento de esgoto (ETE) de São José do Rio Preto, todo biogás produzido nos reatores anaeróbios (UASB) é queimado, desperdiçando seu potencial energético. Assim, esse trabalho buscou avaliar os aspectos econômicos e ambientais para a instalação de uma usina de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na ETE Rio Preto, que atualmente, possui uma vazão de 96.492 m³/dia. Para essa avaliação foram coletados dados da própria estação para que a estimativa da produção de biogás a partir dos dados de matéria orgânica pudesse ser calculada. Para a estimativa da geração de energia e viabilidade econômica, a partir da matéria orgânica removida, foram utilizados dados da literatura. Nos estudos de caso foram analisados o biogás dissolvido na massa líquida e a influência da disposição de parte do lodo aeróbio no reator anaeróbio. No primeiro estudo de caso, em que se avaliou o biogás dissolvido, os resultados foram positivos quando se propôs a sua recuperação e no segundo caso, o lodo aeróbio disposto no reator UASB não demonstrou ter nenhuma influência na eficiência da unidade. Os resultados obtidos apresentaram perspectiva de redução de mais de 60% nas contas de energia elétrica da estação, valor presente líquido (VPL) positivo para 10 anos e com a recuperação dos gastos iniciais (*Payback*) de 4 anos e meio. Dessa forma, conclui-se que o uso do biogás para a produção de energia nessa estação pode ser atrativo, tanto economicamente como ambientalmente, impedindo que os gases sejam emitidos para a atmosfera e que outras fontes energéticas sejam poupadas.

Palavras-chave: biogás; estação de tratamento de esgoto; produção de energia; viabilidade econômica.

ABSTRACT

GOMES, A. L. C. **Technical and economic evaluation of the biogas energy potential from the São José do Rio Preto sewage treatment plant.** 2019. Monografia (Trabalho de conclusão de curso) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2019.

Currently at the sewage treatment plant in São José do Rio Preto, all biogas produced in anaerobic reactors (UASB) are burned, wasting your energy potential. Thus, this work sought to evaluate the economic and environmental aspects for the installation of an electric power generation plant from the biogas produced at the Rio Preto treatment plant, which currently has a flow of 96492 m³/day. For this evaluation, data were collected from the station so that the estimate of the biogas production from the organic matter data could be calculated. For the estimation of energy generation and economic viability, from the organic matter removed, data from the literature were used. In the case studies the biogas dissolved in the liquid mass and the influence of the disposition of part of the aerobic sludge in the anaerobic reactor were analyzed. In the first case study, where the dissolved biogas was evaluated, the results were positive when it was proposed to recover and in the second case, the aerobic sludge disposed in the UASB reactor was not shown to have any influence on the efficiency of the unit. The results obtained showed a prospect of a reduction of more than 60% in the electric energy bills of the station, net present value (NPV) positive for 10 years and the recovery of the initial expenses (Payback) of 4 ½ years. In this way, it can be concluded that the use of biogas for the production of energy at this station can be attractive, both economically and environmentally, preventing gases from being emitted to the atmosphere and other energy sources being saved.

Keywords: biogas; sewage treatment plant; production of energy; economic viability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico da proporção de municípios por situação da Política Municipal de Saneamento Básico, por regiões – 2011/2017.....	14
Figura 2: Localização da estação de tratamento de esgoto da cidade de São José do Rio Preto	16
Figura 3: Esquema típico do reator UASB	17
Figura 4: Esquema típico do tanque de aeração com difusores de ar.....	18
Figura 5: Fluxograma dos processos do tratamento de esgoto da cidade de São José do Rio Preto.....	19
Figura 6: Etapas da digestão anaeróbia.	21
Figura 7: Turbinas a gás (ciclo Brayton)	24
Figura 8: Ciclos de um motor de combustão interna de ciclo Otto	25
Figura 9: Coluna de preenchimento.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Composição e concentração do biogás.....	22
Tabela 2: Taxa mensal de energia consumida na ETE Rio Preto.....	29
Tabela 3: Resumo dos dados utilizados nos cálculos.....	36
Tabela 4: Custos com equipamentos.....	39
Tabela 5: Custos operacionais ano a ano.....	41
Tabela 6: Solubilidade em água dos compostos do biogás.....	42
Tabela 7: Cenários possíveis para o gás dissolvido.....	44

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Esgoto sanitário.....	13
2.1.1. Histórico	13
2.1.2. Composição	14
2.1.3. Características da estação de tratamento de esgoto de São José do Rio Preto ...	15
2.2. Biogás	19
2.2.1. Histórico	19
2.2.2. Produção de biogás a partir da digestão anaeróbia.....	20
2.2.3. Composição	22
2.2.4. Produção de energia a partir do biogás.....	23
2.2.5. Incentivos públicos ao uso do biogás como fonte de energia	25
3. METODOLOGIA	27
3.1. Volume de biogás produzido no reator UASB da ETE Rio Preto.....	27
3.2. Geração de energia elétrica a partir do biogás	28
3.3. Avaliação do potencial de redução de custos gerado pela inserção de energia produzida na rede de distribuição.	29
3.4. Avaliação da viabilidade econômica da utilização do biogás produzido na ETE	30
3.4.1. Custos relativos aos equipamentos para a geração de energia elétrica a partir do biogás (Ceq)	30
3.4.2. Custo com operadores (Cop)	32
3.4.3. Depreciação dos equipamentos	33
3.4.4. Manutenção dos equipamentos.....	33
3.4.5. <i>Payback</i>	34
3.4.6. Valor presente líquido (VPL)	34

4. RESULTADOS.....	36
4.1. Volume de biogás produzido no reator UASB da ETE Rio Preto.....	36
4.2. Geração de energia elétrica a partir do biogás.....	37
4.3. Avaliação do potencial de redução de custos gerado pela inserção de energia produzida na rede de distribuição.	38
4.4. Avaliação da viabilidade econômica da utilização do biogás produzido na ETE	38
4.4.1. Custos relativos aos equipamentos para a geração de energia elétrica a partir do biogás (Ceq)	38
4.4.2. Custo com operadores	39
4.4.3. Depreciação dos equipamentos	39
4.4.4. Manutenção dos equipamentos.....	39
4.4.5. <i>Payback</i>	40
4.4.6. Valor presente líquido (VPL)	40
5. ESTUDOS DE CASO.....	42
5.1. Avaliação do impacto da remoção e aproveitamento da parcela de biogás dissolvida na corrente líquida do efluente.....	42
5.2. Influência da disposição do lodo do sistema de Lodos Ativado no reator UASB.....	45
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
REFERÊNCIAS.....	48
APÊNDICE.....	53

1. INTRODUÇÃO

Com o crescimento de centros urbanos, “polos indústrias” e criações de novas tecnologias, o consumo de energia elétrica está aumentando, juntamente com a busca de fontes renováveis de energia. No Brasil, as fontes renováveis são as mais utilizadas, destacando as hidrelétricas, que produzem 75% da energia consumida do país (ANEEL, 2008). Apesar de não gerar nenhum resíduo na sua produção, na sua construção pode gerar diversos impactos ambientais como o represamento de grandes áreas. Assim o Brasil está à procura de diversificar a sua fonte de energia, para além de diminuir os danos ambientais, também aumentar a segurança de abastecimento.

Dessa forma, a produção de biogás está se tornando uma das alternativas para a geração de novas energias renováveis, sendo que em menos de 10 anos aumentou em 6 vezes a sua produção no Brasil. A produção de biogás é representada em 51% pelos aterros sanitários enquanto os outros 49% são representados pelas indústrias de alimentos e bebidas, suinocultura e lodo de esgoto (COELHO, 2017). Sendo, segundo Guimarães et al. (2018), os aterros sanitários responsáveis pela produção de 95% da energia elétrica produzida a partir do biogás no país.

O biogás é produzido através da mediação de microrganismos anaeróbios que decompõem a matéria orgânica e a transformam em biogás, que é formado, principalmente por compostos como o gás metano e gás carbônico. Esses compostos fazem parte dos gases do efeito estufa (GEE) e são extremamente prejudiciais ao meio ambiente, portanto o uso desse biogás se torna interessante, já que hoje as questões ambientais, como aquecimento global são assuntos de diversos encontros de líderes globais ao redor do mundo.

As estações de tratamento de esgoto (ETE), quando utilizam de processos anaeróbios para o tratamento do efluente ou do lodo produzido, possuem um alto potencial na produção de biogás, devido à presença de matéria orgânica nos esgotos. Mesmo com as condições adequadas, a produção de energia a partir do biogás ainda não é muito utilizada nas estações, apesar de ser uma opção atraente por possibilitar a redução com os custos de energia e evitar a emissão dos gases produzidos. Na maioria das estações esse gás é queimado para se reduzir o efeito do gás metano no meio ambiente, que é 21 vezes o causado pelo dióxido de carbono.

A Alemanha é o país que mais investe em energias renováveis. Naquele país, cerca de mil ETEs aproveitam o biogás para a geração de energia, conseguindo cobrir metade dos gastos totais dessas estações. A partir dos exemplos observados, o Brasil passou a integrar o Programa de coordenação técnica da Alemanha em que são realizados projetos que auxiliam a Brasil, principalmente sobre os temas ambientais (ABC, 2007). Um desses projetos foi a implantação da usina de energia elétrica a partir do biogás de uma ETE em Feira de Santana na Bahia, com a sua instalação as contas de energia diminuíram de 26 mil para 5 mil por mês. Esse projeto tem como um dos objetivos avaliar a viabilidade econômica da produção de energia a partir do biogás no mercado brasileiro e também ser usado como plataforma de pesquisas por estudantes universitários e técnicos de outras estações de tratamento de esgoto do país (EMBASA, 2016).

A ETE de São José do Rio Preto, localizada no interior de São Paulo a uma distancia de 442 km da capital, recebe o esgoto de cerca de 450 mil habitantes e possui um sistema de tratamento por processo biológico que se inicia com um reator anaeróbio de manta de lodo seguido de sistema de tratamento aeróbio. Esse último é responsável por uma considerável produção de lodo, que é encaminhado, ao reator anaeróbio conjuntamente com o esgoto afluente. Aliado à elevada produção de biogás produzido na ETE, cerca de 7000 m³/dia, segundo a última mediação em 2015, que atualmente está sendo desperdiçado, sendo queimado nos “flares”, justifica-se o objetivo desse trabalho que é avaliar a viabilidade econômica da implantação de uma usina de biogás na ETE – Rio Preto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Esgoto sanitário

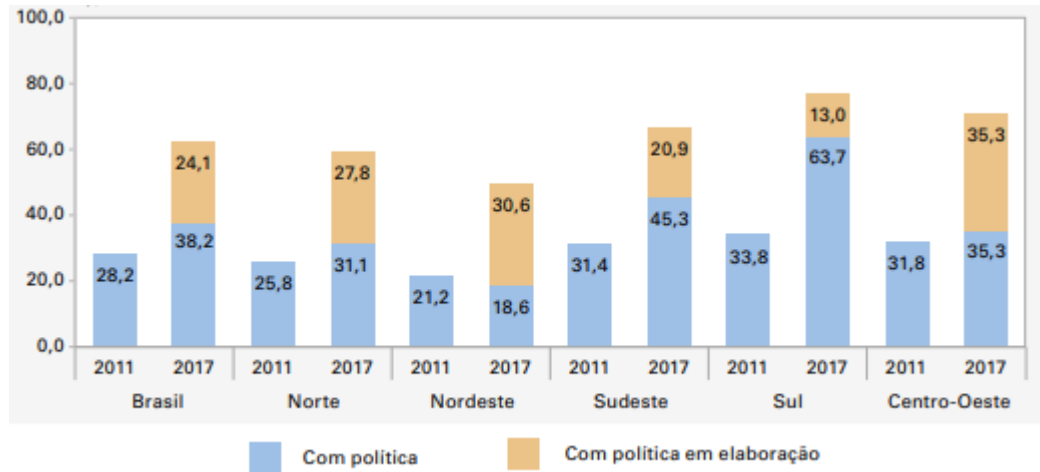
2.1.1. Histórico

Em meados do século XIX as práticas de abastecimento de água e coleta de esgoto por tubulações já estavam sendo realizadas na Europa e nos Estados Unidos, devido às epidemias da época que eram causadas pela falta de higiene (BRAADBAART, 2013). Logo as novas tecnologias chegaram ao Brasil e em 1857 foi determinada por D. Pedro II a construção do primeiro sistema de coleta de esgoto, semelhante ao instalado na Inglaterra, na cidade do Rio de Janeiro (MURTHA; CASTRO; HELLER, 2014). Em 1970, foi criado o Plano Nacional de Saneamento do Brasil (PLANASA) que em 15 anos conseguiu aumentar de 50 a 87% o abastecimento de água para a população brasileira. Apesar do referido plano não apresentar muitos incentivos para a coleta de esgoto, foi um grande progresso para o saneamento do Brasil (MONTEIRO, 1993).

Atualmente, a média nacional de domicílios ligados à rede coletora de esgoto, segundo o SNIS (2016), são de 52%, sendo que em muitos municípios, principalmente do norte, nordeste e sul não ultrapassam 50%. A região sudeste é a mais avançada na questão de coleta de esgoto, sendo 79% da população atendida por esse serviço. Com a destinação adequada desse esgoto não é diferente, menos da metade (44%) de todo o esgoto coletado no país é tratado de forma adequada, sendo que apenas o centro-oeste ultrapassa os 50%.

Apesar de crescimento lento de praticamente 1% ao ano nas questões de esgotamento sanitário é possível ver progressos nos municípios do país. A Política Municipal de Saneamento Básico está crescendo em todas as regiões, na maioria praticamente dobrou os números de municípios que estão elaborando as políticas, como pode ser observado na Figura 1. Porém, além da sua elaboração também é necessário que seja cobrado a sua aplicação e fiscalização (IBGE, 2018).

Figura 1: Gráfico da proporção de municípios por situação da Política Municipal de Saneamento Básico, por regiões – 2011/2017



Fonte: adaptado IBGE (2018)

2.1.2. Composição

Grande parcela da água utilizada por uma população com fins sanitários é transformada em esgoto, sendo composto por 99,9% de água e 0,1% de sólidos. Entre os sólidos presentes no esgoto 25% são de materiais inorgânicos, enquanto 75% são representados por matéria orgânica com a presença de microrganismos que podem ser causadores de doenças quando em contato com os seres humanos (VON SPERLING, 1998).

Além do excesso de matéria orgânica, os nutrientes como nitrogênio e fósforo que estão presentes nos esgotos são altamente prejudiciais, uma vez lançados nos corpos hídricos, proporcionam o aumento de alimento para as algas que se proliferam e impedem a passagem da luz e oxigênio causando a eutrofização, trazendo danos à fauna e flora aquática (RIVERA, 2003). Por isso é de grande importância à retirada desses nutrientes a partir de tratamentos específicos que permitem uma melhor qualidade ao efluente.

Para a quantificação da matéria orgânica adota-se a metodologia da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), sendo nos esgotos domésticos em torno de 300 mg/L. Assim a medição é feita a partir da quantidade de oxigênio consumida para que a matéria orgânica

seja estabilizada por processos bioquímicos aeróbios. Como a estabilização demora a acontecer, convencionou-se a análise padrão da amostra após cinco dias, quando a análise se estende por dias ou semanas, até que o consumo de oxigênio seja desprezível é denominada de DBO última. (VON SPERLING, 1998).

Outro método de se estimar a quantidade de matéria orgânica é a partir da Demanda Química de Oxigênio (DQO). Nesta análise é quantificada a carga orgânica oxidada quimicamente, que nos esgotos domésticos se mantem em torno de 600 mg/L. O método consiste na adição de um composto altamente oxidante e a verificação dos resultados após duas horas de aquecimento (ROCHA; BARBIÉRI; CARDOSO, 1989). Por ser um processo mais acelerado que a DBO é muito utilizado nas rotinas diárias das estações de tratamento, fornecendo valores atualizados todos os dias.

2.1.3. Características da estação de tratamento de esgoto de São José do Rio Preto

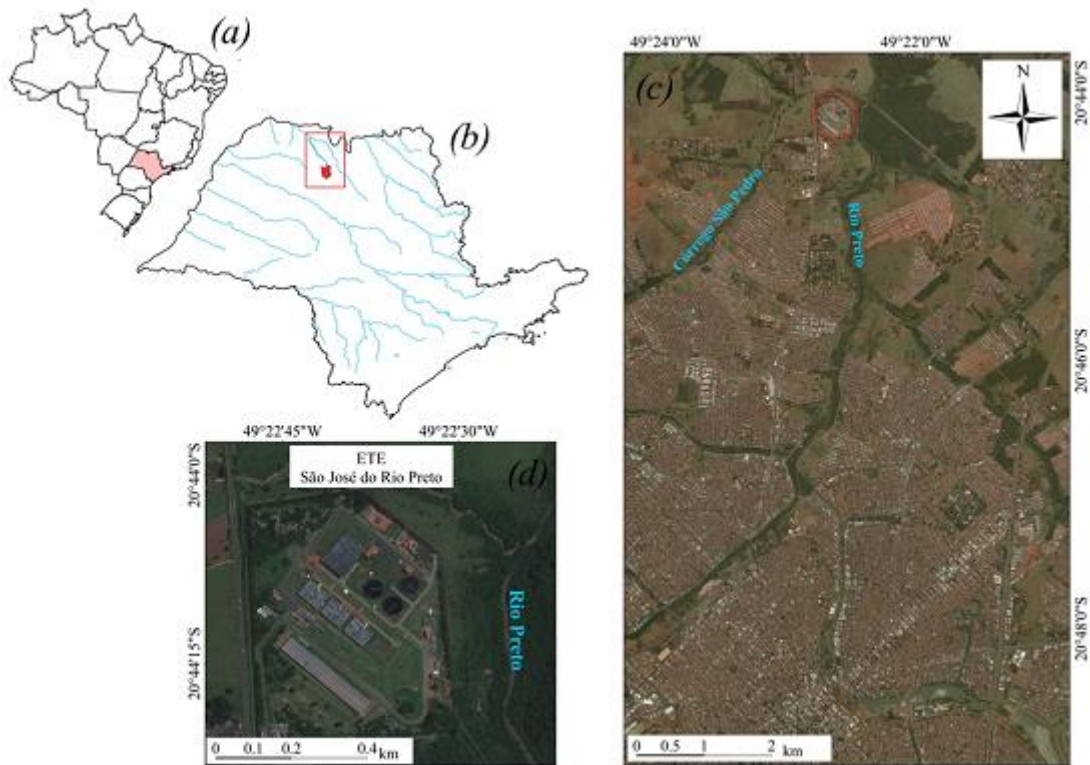
Para esse trabalho foi realizado uma análise para a instalação de uma usina de produção de energia elétrica a partir do biogás gerado na estação de tratamento de esgoto de São José do Rio Preto – São Paulo. São José do Rio Preto está localizado no noroeste paulista e 442 km de distância da capital São Paulo, com uma população estimada em 450 mil habitantes, ocupando o posto de décima primeira cidade mais populosa do estado (IBGE, 2018). A Figura 2 mostra a localização do município e da ETE Rio Preto.

O SeMAE (Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto), empresa responsável pelo saneamento da cidade inaugurou a ETE Rio Preto em Setembro de 2010. A estação está localizada na região norte na rodovia Délcio Custódio da Silva, vicinal que liga Rio Preto a Ipiguá e está situado na confluência do rio Preto com o córrego São Pedro (SeMAE, 2018). Antes de 2010 todo esgoto da cidade era lançado diretamente no rio classificando-o como classe 4 segundo o Decreto Estadual 10755-77 (2015). Além do efluente tratado, o rio Preto também recebe efluentes clandestinos de indústrias e frigoríficos que impedem a sua mudança de classe.

O tratamento de esgoto é responsável por retirar do efluente, partículas poluentes que possam acarretar em algum problema ambiental ou de saúde pública. Para a melhor seleção de tratamento é necessário se fazer uma análise do efluente a ser tratado, do custo financeiro e da

área disponível para a sua construção. Porém, praticamente todas as estações possuem as mesmas etapas de tratamento preliminar, primário, secundário e terciário, alterando, apenas, os processos de cada sistema (CALIJURI et. al, 2013).

Figura 2: Localização da estação de tratamento de esgoto da cidade de São José do Rio Preto



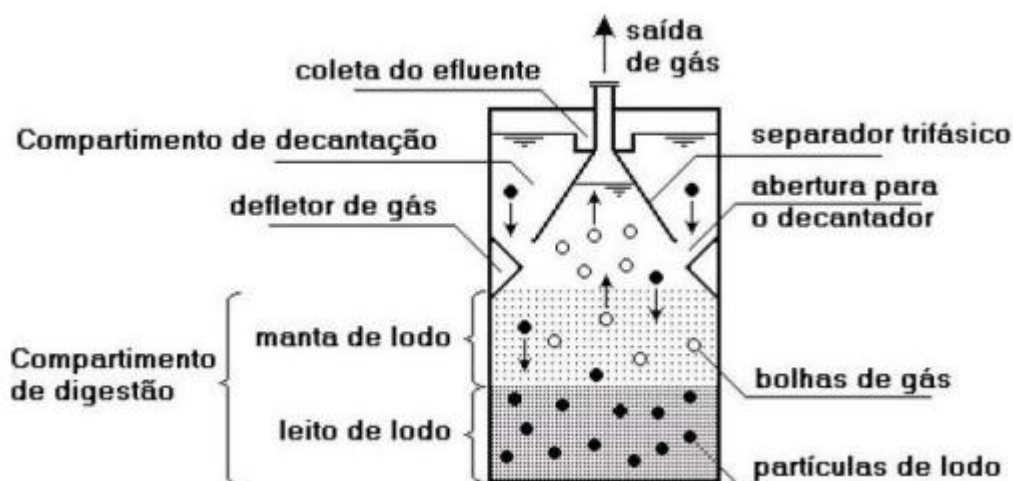
(a) Localização do estado de São Paulo no contexto brasileiro; (b) Localização do município de São José do Rio Preto no estado de São Paulo, com destaque para a localização do Rio Preto; (c) Localização da ETE, destacada pelo círculo vermelho, no município e (d) ETE.

Fonte: autoria própria

O sistema de tratamento da ETE Rio Preto conta com o tratamento preliminar, que é responsável pela retirada dos materiais grosseiros e da areia presente no esgoto. Esses materiais podem causar danos às tubulações e equipamentos da estação como, por exemplo, as bombas de elevação. Assim, o primeiro processo após a chegada do efluente é o gradeamento grosso, seguindo para as bombas de elevação, para o gradeamento fino e a caixa de areia. Todos os materiais retirados do processo são enviados para o aterro da cidade.

O sistema de tratamento primário inicia os processos biológicos do tratamento com o reator de fluxo ascendente e manta de lodo, também conhecido como reator UASB, um dos modelos mais utilizados no Brasil. No seu interior não há nenhum tipo de material suporte, ele é composto por flocos biológicos que possuem grande adesão e formam as camadas da manta de lodo. Com o fluxo ascendente, a entrada do esgoto ocorre pelo fundo, passando pela manta de lodo que suporta altas cargas orgânicas. O tempo de detenção hidráulica é considerado baixo devido à grande quantidade de biomassa ativa e ao elevado tempo de retenção celular. O reator UASB também apresenta o separador trifásico que consegue separar os sólidos que se desprendem da manta de lodo, o efluente tratado e o biogás produzido. O excesso de lodo é retirado do reator pelo fundo e enviado para a centrífuga para ser desidratado e enviado para o aterro da cidade, já o biogás produzido é queimado nos *flares*.

Figura 3: Esquema típico do reator UASB

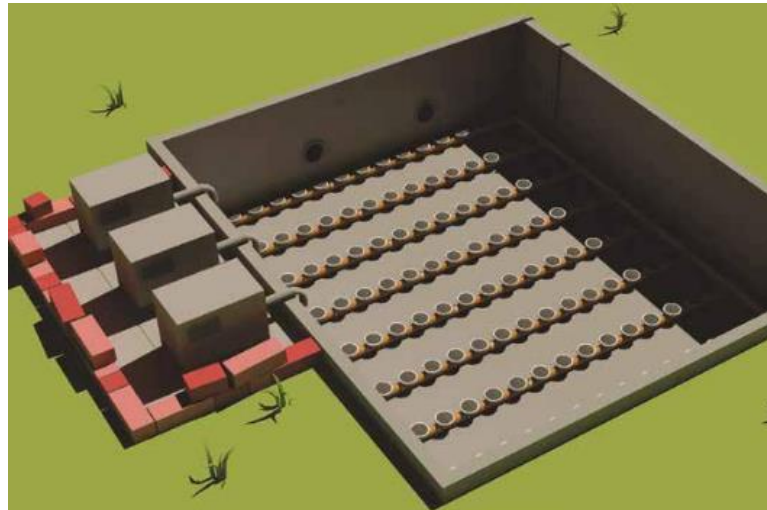


Fonte: Gehring, 2014

No sistema de tratamento secundário, o efluente é encaminhado para o sistema de lodos ativados, um método importante no tratamento de esgoto sanitário, pois em uma pequena área consegue a remoção de cerca de 90% da DBO do efluente. Os processos ocorrem devido à alta concentração de oxigênio dissolvido provocada por compressores de ar difuso no tanque de aeração. Dessa forma, a biomassa se encontra dispersa e em condições favoráveis, se reproduzindo rapidamente e gerando uma considerável quantidade de lodo. Após os tanques, o lodo formado é separado do efluente no decantador secundário. Parte do

lodo aeróbio é então recirculado para o início do tanque de aeração e a outra parte volta para o tratamento primário, que ocorre no reator UASB.

Figura 4: Esquema típico do tanque de aeração com difusores de ar

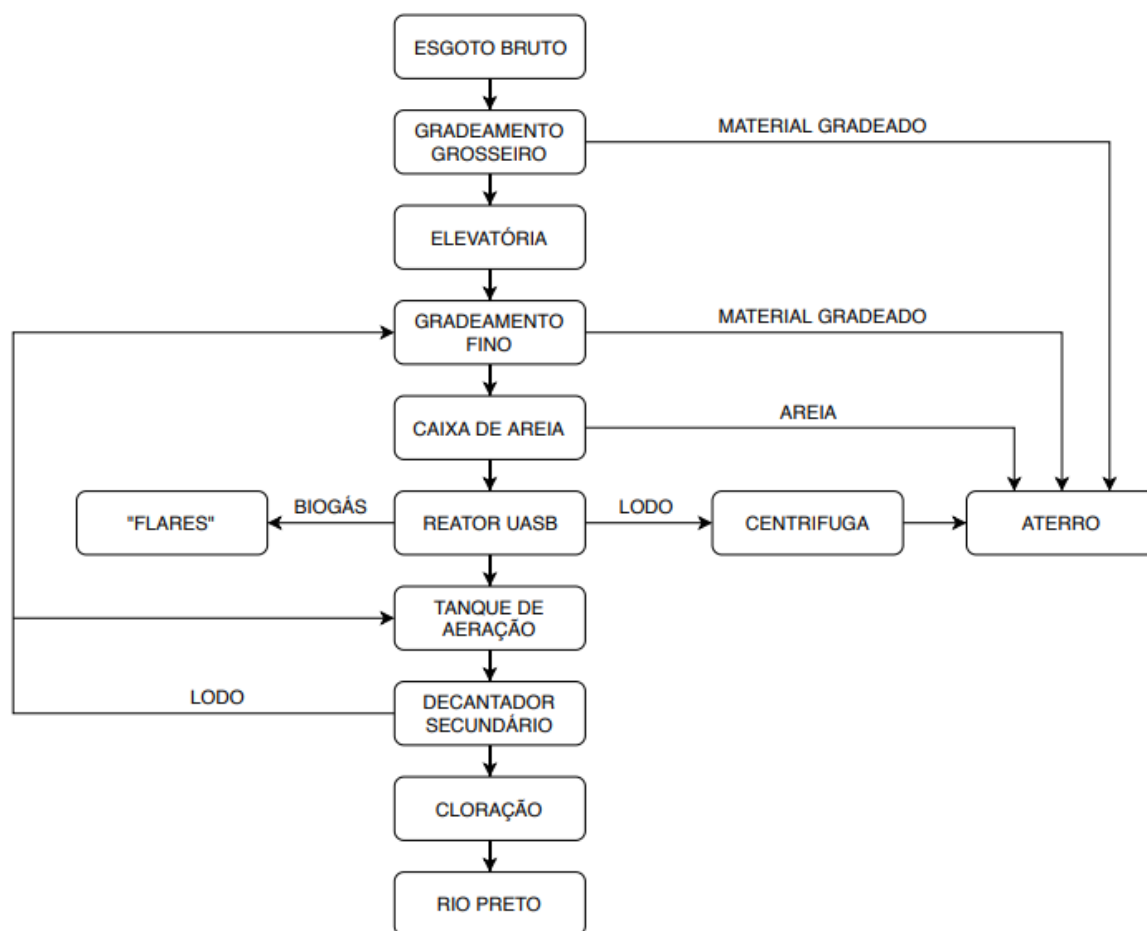


Fonte: B&F DIAS, 2017

Para finalizar o tratamento, o efluente é enviado para um tanque de cloração para que ocorra uma desinfecção e seja lançado no rio dentro dos padrões de qualidade. Todos os processos podem ser observados no fluxograma da Figura 4.

A partir da caracterização dos processos da estação constatou-se o elevado consumo de energia elétrica, considerando o uso das bombas para elevar o esgoto e dos 4 compressores de ar difuso do tanque de aeração, que consomem 350 kWh cada. Estima-se, o aumento do consumo com a ampliação da ETE, uma vez que as unidades existentes já estão próximas ao limite de tratamento, assim a ETE já está sendo ampliada com mais um módulo de cada processo para que ocorra um tratamento com melhor eficiência.

Figura 5: Fluxograma dos processos do tratamento de esgoto da cidade de São José do Rio Preto



Fonte: autoria própria

2.2. Biogás

2.2.1. Histórico

A China e a Índia foram os primeiros países a se interessarem e utilizarem o biogás como fonte de energia. Nesses países, na falta de capital para investir no petróleo nas décadas de 50 e 60, optou-se pelo aproveitamento de restos de alimentos e dejetos orgânicos em geral para a produção de energia, principalmente nas áreas rurais (CAETANO, 1995). Na década de 70, com a alta do preço do petróleo, os países desenvolvidos tiveram que optar por outras

fontes de energia, iniciando o processo de estudos e pesquisas sobre os sistemas anaeróbios na digestão da matéria orgânica (KARLSSON, 2014).

No Brasil, o primeiro biodigestor foi instalado na década de 70 na “Granja do Torto” em Brasília a partir de um modelo chinês. Logo após, em 1980 se iniciou o Programa de Mobilização Energética - PME que buscava reduzir a dependência da produção de energia a partir do petróleo, assim foram criados incentivos para a instalação de biodigestores para a geração de energia elétrica. Em 4 anos foram instalados mais de 3000 biodigestores por todo o Brasil, porém com a falta de tecnologias e manuseio adequado os equipamentos começaram falhar fazendo muitos agricultores deixarem essa prática (PALHARES, 2008).

Nos anos 2000 a produção de energia a partir do biogás voltou a crescer, devido ao tratado internacional, Protocolo de Quioto, que propôs mudanças mais rígidas para a emissão dos gases causadores do efeito estufa. Assim, foi criado o crédito de carbono em que um potencial poluidor pode receber ao reduzir a sua emissão, ou pagar para emitir mais que o necessário (SILVA; MACEDO, 2012). Dessa forma, os biodigestores voltaram a ser utilizados, principalmente nas áreas rurais, crescendo para aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto.

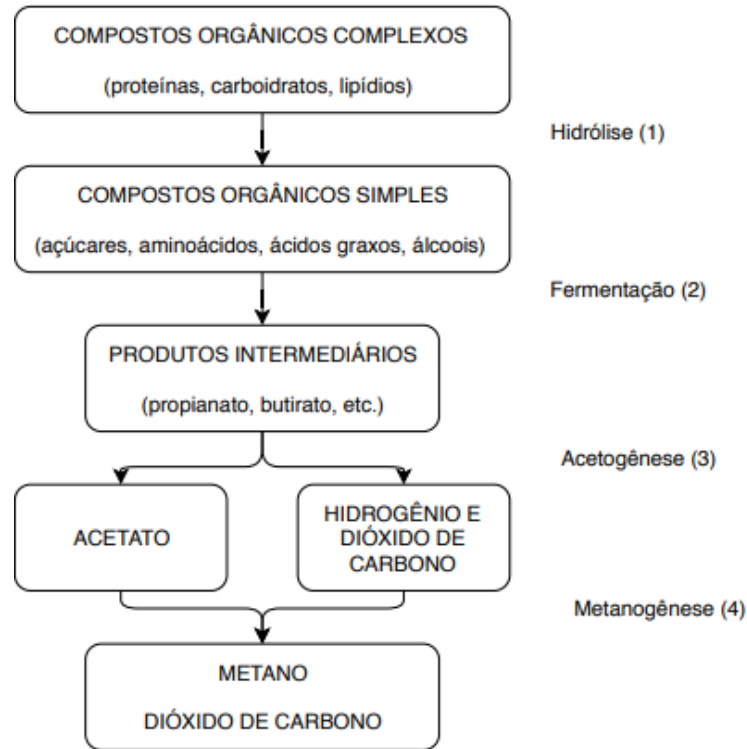
2.2.2. Produção de biogás a partir da digestão anaeróbia

Os processos anaeróbios estão presentes em diversas estações de tratamento de esgoto do Brasil, já que as bactérias anaeróbias possuem baixa atividade em temperaturas abaixo de 20°C, o país apresenta condições climáticas favoráveis a sua instalação. Além disso, os sistemas anaeróbios de tratamento produzem menor quantidade de lodo que os processos aeróbios, não demandam o uso de grandes áreas e nem o uso de energia. Porém, possuem uma eficiência relativamente baixa quando comparado aos processos aeróbios, necessitando de pós-tratamento (CHERNICHARO, 2007).

A digestão anaeróbia é um processo biológico que na ausência de oxigênio e presença de microrganismos especializados quebram a matéria orgânica formando produtos mais simples como metano e gás carbônico. Por serem microrganismos muito sensíveis a mudanças ambientais, é importante manter o ambiente controlado, com alta concentração de alimento, massa de bactérias ativas, temperatura e pH sem grandes variações. Dentro de um

reator anaeróbio cada microrganismo tem uma função diferente, sendo divididas em 4 etapas, a hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese como pode ser observado na Figura 5 (CAMPOS, 1999).

Figura 6: Etapas da digestão anaeróbia.



Fonte: adaptado CETESB, 2019b

Tanto a hidrólise como a acidogênese ocorrem a partir das bactérias fermentativas que podem ser estritamente anaeróbias ou facultativas. A presença das bactérias facultativas é importante para eliminar os resquícios de oxigênio dissolvido que podem estar presentes e são extremamente tóxicas as arqueas metanogênicas. A partir das exo-enzimas excretadas pelas bactérias fermentativas ocorre à hidrólise onde há a conversão do material orgânico particulado em compostos mais simples como ácidos orgânicos voláteis. Na acidogênese as bactérias fermentativas utilizam o produto da hidrólise para a produção de gás carbônico, sulfeto de hidrogênio e ácidos graxos voláteis que serão utilizados pelas acetogênicas (METCALF & EDDY, 2003).

A acetogênese é a etapa responsável por produzir hidrogênio, dióxido de carbono e acetado, principais substratos para a produção de metano. É nessa etapa que aproximadamente

70% da DQO é transformada em ácido acético. As arqueas metanogênicas são divididas em hidrogenotróficas que usam o gás carbônico e hidrogênio como substrato e produzem cerca de 30% do metano e as acetotróficas que produzem de 60 a 70% de metano a partir do ácido acético.

2.2.3. Composição

O biogás ou também conhecido como “gás do pântano” recebeu esse nome devido às características desse ambiente que permitem a proliferação dos microrganismos anaeróbios e a proliferação do mesmo. Esse gás é composto, principalmente, de metano, gás carbônico, hidrogênio, nitrogênio e gás sulfídrico, as porcentagens podem ser observadas na tabela 1.

Tabela 1: Composição e concentração do biogás

Gás	Símbolo	Volume (%)
Metano	CH ₄	50 – 70
Carbônico	CO ₂	25 – 50
Hidrogênio	H	0 – 1
Nitrogênio	N	0 – 7
Sulfídrico e outros	H ₂ S	0 – 6

Fonte: adaptado de CETESB, 2019^a

O metano é o composto em maior concentração, já que é produzido na última etapa da digestão anaeróbia. Também é o gás com maior potencial poluidor dentro desse processo, Segundo o *Global Warming Potencial* – GWP (horizonte de 100 anos) que considera apenas os gases responsáveis pelo efeito estufa, o gás metano tem o potencial 21 vezes maior de poluir que o gás carbônico, isso quer dizer que 1 kg de metano emitido é equivalente à emissão de 21 kg de gás carbônico (FOSTER, 2007). Por ser tão agressivo ao meio ambiente, muitas empresas preferem fazer a queima do gás metano a sua utilização para a produção de energia, já que o custo de investimento é consideravelmente maior.

O gás sulfídrico também é uma substância bastante presente no biogás, principalmente nas estações de tratamento de esgoto, em função da presença de compostos sulfurosos. Pela

digestão anaeróbia, os compostos sulfurosos oxidados são transformados em gás sulfídrico, provocando o mau cheiro e podendo causar irritação aos olhos e nariz, além do seu potencial altamente corrosivo (FRARE; GIMENES; PEREIRA, 2009). Um novo composto que está se mostrando bastante presente no biogás são os siloxanos que são bastante usados nos produtos de higiene e cosméticos. Assim, esses compostos devem ser retirados do biogás anteriormente ao processo de produção de energia, pois reduzem o poder calorífico do metano e podem causar consideráveis danos aos equipamentos do sistema (BRANCO, 2010).

2.2.4. Produção de energia a partir do biogás

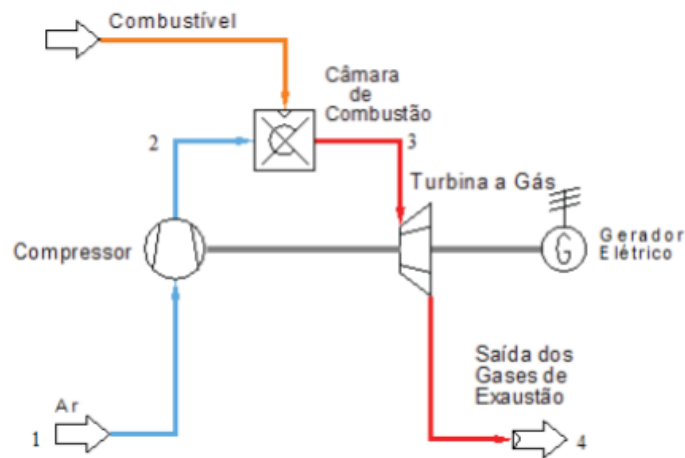
As tecnologias mais utilizadas para a conversão de biogás em energia elétrica são as turbinas a gás e os motores de combustão interna do modelo Ciclo Otto. Essas tecnologias permitem que a energia química presente no biogás seja transformada em energia mecânica pelo processo de combustão controlada (GEHRING, 2014).

- Turbinas a gás

As turbinas a gás são baseadas no ciclo Brayton que são compostos por compressores, combustor e as turbinas. O ar comprimido é levado até o combustor permitindo a entrada de oxigênio e ocorrendo a queima do combustível. Este processo ocorre em alta pressão transferindo a energia química do combustível para o gás e aumentando a sua temperatura. O produto é enviado para a turbina, onde é expandido e transformado em energia mecânica que a partir de um gerador elétrico será transformado em energia elétrica (COSTA, 2006).

Os gases que podem ser utilizados como combustível nesse sistema são propano, gás natural, querosene e o biogás. Parte da energia produzida pela turbina é transferida aos compressores, reduzindo o potencial de produção de energia elétrica. A eficiência desse processo pode ser medida através da temperatura, quanto menor a temperatura do gás da exaustão maior será a sua eficiência. Todos os equipamentos desse sistema são de fácil manutenção e apresentam um rendimento de 25 a 38% e uma potência entre 1000 e 4600 kW (JORDÃO, 2011).

Figura 7: Turbinas a gás (ciclo Brayton)



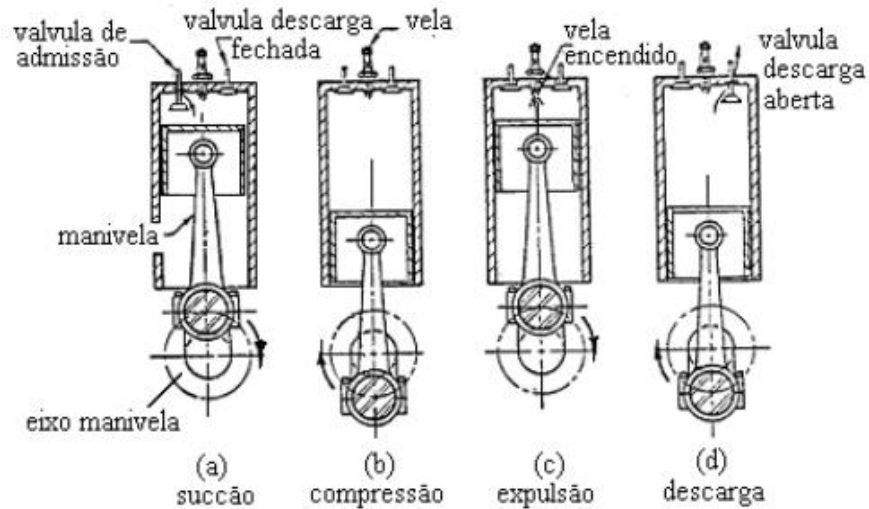
Fonte: França Junior, 2008

- Motor de combustão interna (ciclo Otto)

No ciclo Otto pode ser usado combustível líquido e gasoso, entre os gases estão o butano, propano, gás natural, biogás, nafta química entre outros. Esse motor é recomendado para sistemas que possuam um consumo de energia variado, não necessitem do uso de energia térmica e são muito utilizados para o abastecimento de energia em lugares isolados (FRANÇA JÚNIOR, 2008). Seu rendimento é um dos maiores e pode variar de 30 a 42%, com potência instalada de 100 a 4000 KW (JORDÃO, 2011).

O motor de combustão interna de ciclo Otto ocorre a partir de um sistema de pistão em 4 fases diferentes. A primeira fase é de sucção em que o combustível é sugado para câmara de combustão por meio da descompressão do cilindro, a segunda fase é a de compressão em que o biogás será comprimido e ocorrerá a mistura completa do gás presente que criará uma explosão a partir de uma fagulha na câmara de combustão que será transferida para o pistão, fazendo um movimento periódico de sobe e desce, produzindo e energia mecânica que será transportada a um gerador para a produção de energia elétrica (COSTA, 2006).

Figura 8: Ciclos de um motor de combustão interna de ciclo Otto



Fonte: Gehring, 2014

2.2.5. Incentivos públicos ao uso do biogás como fonte de energia

As políticas públicas que incentivam a utilização de energias renováveis são consideradas recentes, uma delas é a Lei nº 12.490/11 que oferece incentivos a produtores de energia que utilizam o biogás ou biometano como combustível, por serem fontes limpas, sem a emissão de gases poluentes e complementarem o uso das hidrelétricas no Brasil (BRASIL, 2011).

A partir da resolução nº 482/12 foi decretado que os clientes, além de gerar sua própria energia a partir de fontes renováveis, poderiam vender o excedente produzido para as distribuidoras de energia. Em uma das alterações da resolução 482 os geradores de energia a partir do biogás foram beneficiados permitindo a geração compartilhada e possibilitando que diversos clientes se unam para a instalação de uma micro usina e dividam a redução dos custos com as contas de energia (BRASIL, 2012).

Nos aspectos ambientais foi criada a Lei nº 12.114/09 sobre emissões atmosféricas em que foi desenvolvido o Fundo Clima, programa que visa apoiar financeiramente projetos que tenham como objetivo a mitigação das mudanças climáticas. Dos 5 projetos apoiados pelo Fundo Clima, 2 são da produção de energia a partir da biomassa, pelo reaproveitamento de rejeitos (MMA, 2010a). Da mesma forma, foi criado o Plano da Agricultura do Baixo

Carbono que tem como finalidade a adoção de projetos sustentáveis com o destaque para o uso de biodigestores para a digestão dos dejetos animais e produção de energia (MMA, 2010b). Não foi encontrada nenhuma lei, norma ou projeto para o incentivo do uso do biogás em estações de tratamento de esgoto.

3. METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os cálculos descritos por Britto e Andreo (2017) e a forma em que foram determinados os dados coletados na ETE. A partir disso, foram estimadas as vazões de biogás, potencial energético e viabilidade econômica.

3.1. Volume de biogás produzido no reator UASB da ETE Rio Preto

Como o volume de biogás produzido depende da digestão de matéria orgânica convertida no reator o cálculo da estimativa do volume de biogás foi realizado a partir dos dados de DQO de entrada e saída e da produção de sólidos suspensos totais (Y_{obs}) que segundo Van Haandel & Lettinga (1994) varia de 0,1 a 0,2 $kg_{DQO\text{olodo}}/kg_{DQO\text{aplicada}}$.

Tanto o volume de esgoto tratado na ETE, quanto a temperatura do reator e a DQO de entrada e saída do UASB foram obtidas a partir da base de dados da ETE, considerando-se a média dos valores do período de 2011 a 2018. A perda de biogás para a massa líquida não foi considerada, a fim de projetar o potencial máximo de produção de energia. Assim, a estimativa da produção de gás metano foi realizada utilizando as equações 3.1, 3.2 e 3.3.

$$DQO_{util} = [Q \times (S_0 - S)] - (Y_{obs} \times S_0 \times Q) \quad (3.1)$$

$$K_{(T)} = \frac{P \times K}{R \times (273 + T)} \quad (3.2)$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{util}}{K_{(T)}} \quad (3.3)$$

Em que:

DQO_{util} : Carga orgânica convertida em metano (kg_{DQO}/dia);

Q: Vazão do efluente (m^3/dia);

S_0 : DQO afluente ao reator UASB (kg_{DQO}/dia);

S: DQO efluente ao reator UASB (kg_{DQO}/dia);

Y_{obs} : Coeficiente de produção de sólidos suspensos totais ($kg_{DQO\text{olodo}}/kg_{DQO\text{aplicada}}$);

$K_{(T)}$: Fator de correção para a temperatura operacional do reator ($g_{DQO_{CH_4}}/L$);

P: Pressão atmosférica (atm);

K: DQO correspondente a 1 mol de CH₄ (64gDQO/mol);

T: Temperatura operacional do reator (°C);

Q_{CH₄}: Volume de metano produzido (m³/dia).

A partir de um analisador de qualidade de biogás instalado em uma das células do UASB em 2015 foi possível quantificar 77,2% de gás metano (CH₄), 15,1% de gás carbônico (CO₂), 7,7% de gás sulfídrico (H₂S) e uma vazão de 7.128 m³/dia. Assim a partir do volume de gás metano encontrado pelos cálculos com a matéria orgânica será possível estimar a quantidade total de biogás produzido na estação e comparar com a vazão real medida em 2015.

3.2. Geração de energia elétrica a partir do biogás

Para a estimativa da produção de energia elétrica a partir do biogás foi considerado o motor de ciclo Otto, que segundo Jordão (2011) possui um rendimento de 30 a 42% e o gerador que possui um rendimento de 90%. O poder calorífico inferior (PCI) do gás foi obtido a partir do mesmo estudo feito pela ETE em 2015 e determinou-se o valor de 6600 kcal/m³. Assim para o cálculo da geração de energia foi considerado a equação 3.4.

$$G_{EE} = \frac{Q_{CH_4} \times 365}{1000} \times \frac{PCI \times \eta_{motor} \times \eta_{gerador} \times C_s}{C_{kw}} \quad (3.4)$$

Em que:

G_{EE}: Potencial de geração de energia elétrica (MWh/ano);

PCI: Poder calorífico inferior do biogás (kcal/m³);

η_{motor}: Eficiência do motor (%);

η_{gerador}: Eficiência do gerador (%);

C_s: Coeficiente de segurança para correção de possíveis erros de cálculo (94%);

C_{kW} : Conversão de kcal para kWh (860,42 kcal/kWh).

3.3. Avaliação do potencial de redução de custos gerado pela inserção de energia produzida na rede de distribuição.

A partir das contas de energia elétrica, fornecidas pelos responsáveis da ETE, foi possível estimar uma média da taxa (TE) cobrada ao longo dos meses, pela energia consumida (EC) pela estação. Para essa avaliação considerou-se o ano de 2018 até o mês de agosto (início do presente trabalho de graduação) a fim de se obter o valor mais atual, como pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2: Taxa mensal cobrada à ETE Rio Preto pelo consumo de energia

Energia Elétrica Consumida pela ETE				
	2017		2018	
	EC	TE	EC	TE
Mês	(MWh)	(R\$/MWh)	(MWh)	(R\$/MWh)
Jan	854,88	331,38	997,54	412,88
Fev	644,74	338,97	858,09	421,36
Mar	932,65	359,76	897,98	420,44
Abr	722,27	406,70	988,40	433,30
Mai	1002,05	436,99	923,27	478,08
Jun	900,30	438,94	907,38	505,38
Jul	913,62	437,58	954,46	524,92
Ago	919,87	466,87	626,02	797,48
Set	820,87	452,53	-	-
Out	992,70	444,20	-	-
Nov	919,16	464,48	-	-
Dez	867,39	457,08	-	-
Média	874,21	419,62	894,14	499,23
Soma	10490,49		7153,13	

Fonte: autoria própria

Dessa forma, calculou-se a economia gerada a partir da produção de energia elétrica pela equação 3.5.

$$Eco = G_{EE} \times TE \quad (3.5)$$

Em que:

Eco: Economia gerada pela inserção de energia produzida na rede de distribuição (R\$/ano);

TE: Tarifa de energia elétrica (R\$/MWh).

3.4. Avaliação da viabilidade econômica da utilização do biogás produzido na ETE

A viabilidade econômica foi avaliada a partir dos custos com equipamentos e operadores. Os custos com a implantação dos equipamentos, obras necessárias e licenças ambientais não foram abordados neste trabalho devido a grande complexidade e variabilidade de dados disponíveis.

3.4.1. Custos relativos aos equipamentos para a geração de energia elétrica a partir do biogás (Ceq)

Para a estimativa de preços dos equipamentos foi utilizado o orçamento solicitado pela própria ETE em 2015, sendo atualizado pela calculadora do cidadão do Banco Central. Assim, os equipamentos considerados estão detalhados a seguir.

- Filtro de remoção de condensado e particulado

Prevê-se que no início do processo serão instalados três filtros de remoção de condensado e particulado para que a umidade e as partículas grosseiras presentes no biogás sejam retiradas da corrente gasosa a fim de proteger os equipamentos de produção de energia a serem utilizados.

- Gasômetro

Para o controle dos picos de vazão é recomendado o uso de um gasômetro de 3080 m³ que poderá armazenar o biogás produzido por até 5h.

- Filtro de dessulfurização

Para a remoção do gás sulfídrico (H₂S) pretende-se utilizar dois filtros de dessulfurização para se evitar a corrosão dos maquinários já que esse gás possui alto poder corrosivo.

- Filtro para siloxanos

Devido à presença de sílica em muitos produtos cosméticos como os hidratantes corporais, é necessário o uso de dois filtros para a remoção dos particulados da corrente gasosa, para impedir esse material de entrar em contato com o motor e outros equipamentos, visando evitar danos aos mesmos.

- Resfriador

Esse equipamento tem como finalidade, além de resfriar o gás para a entrada no compressor, retirar a umidade ainda presente no biogás. Propõem-se a utilização de duas unidades de resfriadores.

- Compressor

Este dispositivo tem como finalidade aumentar a pressão do biogás e estabiliza-la para ser fornecida aos grupos geradores de forma segura (KRUMMENAUER, 2010). Em função do volume de biogás estimado, calcula-se que será necessário o uso de 3 compressores.

- Analisador de qualidade

A qualidade do biogás produzido, principalmente em relação ao conteúdo de metano precisará ser continuamente analisada. Para tanto, um cromatógrafo gasoso, instalado *on line* deverá ser utilizado.

- Corta chamas

O dispositivo corta chamas deverá ser utilizado como sistema de segurança para proteger os operadores e o sistema, principalmente as áreas de formação e armazenagem do biogás.

- Painel elétrico

Um painel para o controle dos processos envolvidos na geração de biogás da ETE deverá ser instalado para controle e identificação de eventuais problemas.

- Motogerador

O conjunto de motor e gerador é responsável pela transformação da energia química em energia mecânica e elétrica respectivamente. Dessa forma, propõe-se a utilização de dois conjuntos com o motor de combustão interna de ciclo Otto, que possuem vida útil de cerca de 10 anos, sendo assim, o tempo de vida do projeto.

3.4.2. Custo com operadores (Cop)

Para os operadores dos equipamentos será necessária a contratação de 8 funcionários que farão turnos de 12 horas e trabalharão em revezamento de dia, 4 em dia pares e 4 em dia ímpares. Para a usina ser monitorada 24h por dia, o dia será dividido em dois turnos, com operadores da 6h às 18h e das 18h às 6h da manhã. Assim, será considerado o salário de 2500 reais com a adição de 100% referentes a impostos e a inclusão do décimo terceiro salário.

Para o cálculo será utilizada a equação 3.6:

$$Cop = M \times F \times Sa \times I \quad (3.6)$$

Em que:

Cop: Custo com os operadores (R\$/ano)

M: Meses trabalhados

F: Funcionários contratados

Sa: Salário mínimo vigente (R\$)

I: Impostos empregatícios (%)

3.4.3. Depreciação dos equipamentos

A vida útil do grupo gerador de energia elétrica é 10 anos, assim, será considerado esse mesmo tempo para todo o sistema de produção energética da ETE, pela equação 3.7 é possível avaliar a depreciação dos equipamentos.

$$D = \frac{C_{eq}}{V_{\text{útil}}} \quad (3.7)$$

Em que:

D: Depreciação dos equipamentos (R\$)

$V_{\text{útil}}$: Vida útil do projeto (anos)

3.4.4. Manutenção dos equipamentos

Os custos com a manutenção dos equipamentos foram estimados considerando que 4% do valor inicial dos equipamentos sejam o total a ser gasto com manutenções até o fim do plano, ou seja, 10 anos.

$$M = \frac{C_{eq} \times 0,04}{10} \quad (3.8)$$

Em que:

M: Custo de manutenção dos equipamentos (R\$/ano)

3.4.5. *Payback*

Um dos métodos mais utilizados para se fazer uma análise preliminar da viabilidade econômica de projetos é o *Payback*. Esse procedimento consiste no cálculo do tempo de retorno do investimento inicial, ou seja, o tempo necessário para que todo o investimento seja recuperado e o projeto comece a dar retorno ao investidor. Dessa forma, existem duas formas de se calcular o *Payback*, o simples e o descontado. No simples, consideram-se apenas os períodos necessários para recuperar o dinheiro investido, não sendo considerado o fluxo de caixa, como o gasto com manutenção de depreciação dos equipamentos e nem o valor do dinheiro ao longo do tempo como ocorre no descontado (COLPO; MEDEIROS; WEISE, 2016).

Nesse trabalho será considerado o *Payback* simples por ser de fácil interpretação e poder ser utilizado como medida de risco. Dessa forma, quanto menor o tempo de retorno estimado, mais rápido será a recuperação do valor investido e mais atrativo se torna o empreendimento. Pela equação 3.9, é possível obter o tempo de retorno.

$$TRI = \frac{C_0}{R} \quad (3.9)$$

Em que:

TRI: Tempo de recuperação do investimento com os equipamentos (anos)

C_0 : Investimento inicial (equipamentos) (R\$)

R: Receita anual (R\$/ano)

3.4.6. Valor presente líquido (VPL)

Diferentemente do *Payback* o valor presente líquido considera o valor do dinheiro no tempo. Essa análise consiste em descontar os fluxos de caixa ao longo de todo o projeto a uma determinada taxa. Essa taxa é Taxa Mínima de Atratividade (TMA) em que é estimada de acordo com os riscos do projeto e o retorno mínimo esperado de cada projeto (GITMAN,

2010). Quanto maior o risco do investimento maior deve ser a TMA, dessa forma para muitos autores, o VPL e as análises de investimentos que consideram o valor do dinheiro ao longo do tempo são os mais adequados e confiáveis.

No VPL é determinado que um investimento é atrativo economicamente se seu valor for maior que zero e assim deve ser aceito, se o resultado for zero o investimento não trará nem lucros e nem prejuízos ao investidor e se for menor que zero o projeto se torna inviável podendo causar grandes perdas. Assim, o VPL pode ser calculado pela da equação 3.10.

$$VPL = -C_0 + \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(1+r)^n} \quad (3.10)$$

Em que:

C_i : Fluxo de caixa ano a ano

n: Tempo total de projeto

i: Período do projeto em anos

r: Taxa de risco a ser descontada

Uma vez que será considerado um período de 10 anos de projeto, o cálculo do VPL será feito a partir da uma ferramenta do Excel que permite seu cálculo de uma forma mais confiável, rápida e sem erros.

Para a análise do fluxo de caixa ao longo dos anos será descontado dos ganhos da energia produzida os custos com manutenção, operação e depreciação dos equipamentos, que serão os custos fixos em todos os anos. Assim será considerado um aumento de 4% do valor do ano anterior para essas atividades.

Para produção de biogás e o consumo de energia será feita uma estimativa de que no primeiro ano de projeto a produção e consumo irão aumentar em 10% já que a expansão da ETE já estará concluída e nos anos seguintes será considerado o aumento de 1% ao ano para a produção de biogás e 2% para o consumo de energia. A taxa cobrada pela energia elétrica também será aumentada em 4% ao longo dos anos.

4. RESULTADOS

Para um melhor entendimento, tanto os dados coletados na própria ETE quanto os dados teóricos utilizados nos cálculos foram resumidos na Tabela 3.

Tabela 3: Resumo dos dados utilizados nos cálculos

	Descrição	Unidade	Valor
	Y_{obs} (Lettinga, 2006)	$kg_{DQO_{todo}}/kg_{DQO_{aplicada}}$	0,2
	Temperatura*	°C	28
Reator	DQO afluente* (S_0)	mg/L	651
UASB	DQO efluente* (S)	mg/L	269
	Vazão* (Q)	m^3/dia	96492
	$[CH_4]**$	%	77,2
	$[CO_2]**$	%	15,1
Biogás	$[H_2S]**$	%	7,7
	Vazão**	m^3/dia	7128
	PCI**	$kcal/m^3$	6600
	Motor Ciclo Otto		
Rendimento	(η_{motor}) (JORDÃO, 2011)	%	35
	Gerador ($\eta_{gerador}$)	%	90

*Valores médios obtidos na base de dados da ETE Rio Preto entre os anos de 2011 e 2018.

**Valores obtidos a partir de um analisador de qualidade de biogás instalados em uma das células do UASB em 2015.

Fonte: autoria própria

4.1. Volume de biogás produzido no reator UASB da ETE Rio Preto

Para o cálculo do volume de biogás produzidos na ETE Rio Preto foram utilizados os dados médios obtidos desde o ano de 2011 até 08/2018. Dessa forma tem-se uma vazão de $96492 m^3/dia$, DQO afluente (S_0) ao reator UASB de 651 mg/L e efluente (S) de 269 mg/L. A temperatura média do reator é de 28 °C.

$$DQO_{util} = [Q \times (S_0 - S)] - (Y_{obs} \times S_0 \times Q)$$

$$DQO_{util} = [96492 \times (650 - 269)] - (0,2 \times 650 \times 96492) = 24259,73 \text{ kg}/\text{dia}$$

$$K_{(T)} = \frac{P \times K}{R \times (273 + T)} = \frac{1 \times 64}{0,08206 \times (273 + 28)} = 2,59 \text{ kgDQO}/\text{m}^3$$

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{util}}{K_{(T)}} = \frac{24259,73}{2,59} = 9352,19 \text{ m}^3/\text{dia}$$

Como o volume de gás metano produzido na estação representa 77% do biogás liberado, a produção total de biogás estimada é de 11503 m³/dia. Considerando a vazão de biogás de 7.128 m³/dia medida em 2015 pode-se observar que o valor está adequado, já que em três anos a população tende a aumentar, aumentando também a carga orgânica afluenta a ETE e não foi considerada nenhuma perda de biogás, como a perda de biogás para a massa líquida.

Segundo Chernicharo et. al (1999) a produção de metano por habitante é de 19,2 L/hab.dia quando se considera 70% de metano no biogás, fazendo a estimativa da produção de metano por habitante, considerando o último dado do IBGE (2010), é de 20,5 L/hab.dia, assim o valor está próximo ao citado e se mostram corretos e próximos da realidade.

$$Q_{\frac{CH_4}{hab}} = \frac{Q_{CH_4} \times 1000}{n^{\circ} \text{ habitantes}} \quad (4.1)$$

Em que:

$Q_{\frac{CH_4}{hab}}$: Vazão de metano por habitante (L/hab.dia)

$$Q_{\frac{CH_4}{hab}} = \frac{9352,19 \times 1000}{456245} = 20,5 \frac{L}{hab} \cdot \text{dia}$$

4.2.Geração de energia elétrica a partir do biogás.

Com a vazão de metano estimada em 9352 m³/dia, foram realizados os cálculos da produção estimada de energia.

$$G_{EE} = \frac{Q_{CH_4} \times 365}{1000} \times \frac{PCI \times n_{motor} \times n_{gerador} \times C_s}{C_{kw}}$$

$$G_{EE} = \frac{9352,19 \times 365}{1000} \times \frac{6600 \times 0,35 \times 0,9 \times 0,94}{860,42} = 7753,14 \text{ MWh/ano}$$

4.3. Avaliação do potencial de redução de custos gerado pela inserção de energia produzida na rede de distribuição.

$$Eco = G_{EE} \times TE = 7753,14 \times 499,23 = 3.870.602,09 \text{ R\$/ano}$$

Com os dados fornecidos pela ETE obteve-se a perspectiva de uma economia de aproximadamente 4 milhões de reais por ano. Com o consumo de energia do ano 2017 foi possível fazer uma estimativa de gasto anual ($10490,49 \times 499,23 = 5237169,32$ reais) em que se obteve 73,91% de redução nas contas de energia elétrica.

4.4. Avaliação da viabilidade econômica da utilização do biogás produzido na ETE

4.4.1. Custos relativos aos equipamentos para a geração de energia elétrica a partir do biogás (Ceq)

Pela calculadora do cidadão do Banco Central foi possível obter uma inflação de 13,62% entre os anos de 2015 e 2018. Assim todos os valores propostos em 2015 foram atualizados.

Tabela 4: Custos com equipamentos.

Equipamento	Unidade	Custo unitário (R\$)	Custo total (R\$)
Filtro de remoção de condensado	3	34.791,94	104.375,82
Gasômetro	1	2.003.234,92	2.003.234,92
Filtro de dessulfurização	2	178.909,68	357.819,39
Filtro para siloxanos	2	239.738,95	479.477,90
Resfriador	2	299.034,74	598.069,48
Compressor	3	263.332,98	789.998,94
Analizador de qualidade	1	256.122,50	256.122,50
Corta chamas	1	196.006,17	196.006,17
Painel elétrico	1	243.439,31	243.439,31
Motogerador	2	4.893.198,10	9.786.396,20
Soma (Ceq)			14.814.940,60

Fonte: autoria própria

4.4.2. Custo com operadores

Para a estimativa de custo dos operadores da usina foi utilizado o salário mínimo de 954,00 reais e a equação 3.6.

$$C_{op} = 12 \times 8 \times 2500 \times 100\% = 480.000,00 \text{ R\$/ano}$$

4.4.3. Depreciação dos equipamentos

$$D = \frac{C_{eq}}{V_{\text{útil}}} = \frac{14.814.940,60}{10} = 1.481.494,06 \text{ R\$/ano}$$

4.4.4. Manutenção dos equipamentos

$$M = \frac{C_{eq} \times 0,04}{10} = \frac{14.814.940,60 \times 0,04}{10} = 59.259,76 \text{ R\$/ano}$$

Assim, o custo de investimento inicial (C_i) no primeiro ano seria de R\$ 16.835.694,43 com a compra dos equipamentos mais o gasto anual com operadores, depreciação e manutenção dos equipamentos.

$$C_i = C_{eq} + C_{op} + D + M \quad (4.2)$$

$$C_i = 14.814.940,60 + 480.000,00 + 1.481.494,06 + 59.259,76 = 16.835.694,43 \text{ R\$/ano}$$

4.4.5. Payback

$$TRI = \frac{C_0}{R} = \frac{16.835.694,43}{3.870.602,09} = 4,35 \text{ anos}$$

Dessa forma, o tempo de recuperação total do investimento inicial é bastante atrativo, já que em menos da metade (52 meses) do fim de plano (10 anos) o projeto estará pago.

4.4.6. Valor presente líquido (VPL)

Para a Taxa Mínima de Atratividade considerou-se sendo 8% já que o projeto é de baixo risco e é o valor mais utilizado para esse tipo de projeto, também foram calculados os valores anuais por 10 anos dos custos com operação, manutenção e depreciação dos equipamentos (custo anual), do ganho com a produção de energia elétrica (ganho anual) e o fluxo de caixa. Todos os cálculos foram feitos pelo Excel com as taxas definidas anteriormente na metodologia. Assim, foi possível fazer os cálculos que podem ser observados na Tabela 5. A planilha completa do excel pode ser observado no Apêndice.

A partir dos resultados do fluxo de caixa da Tabela 5 foi possível calcular o VPL para esse investimento que foi de R\$ 3.538.548,78. Dessa forma, a partir da análise do fluxo de caixa, observou-se que esse projeto é atrativo, já que a diferença dos recebimentos e pagamentos é positiva e a economia gerada é considerável. Isso significa que o ganho real do investimento depois de 10 anos será de cerca de 3 milhões de reais.

Tabela 5: Custos operacionais ano a ano

Ano	Custo Anual (R\$)	Ganho anual (R\$)	Fluxo de caixa (FC) (R\$)	Economia após FC (%)
1	2.020.753,82	3.870.602,09	1.849.848,27	35,32
2	2.101.583,98	4.427.968,79	2.326.384,81	42,08
3	2.185.647,33	4.651.138,42	2.465.491,08	42,04
4	2.273.073,23	4.885.555,79	2.612.482,57	41,99
5	2.363.996,16	5.131.787,81	2.767.791,65	41,94
6	2.458.556,00	5.390.429,91	2.931.873,91	41,88
7	2.556.898,24	5.662.107,58	3.105.209,33	41,81
8	2.659.174,17	5.947.477,80	3.288.303,63	41,74
9	2.765.541,14	6.247.230,68	3.481.689,54	41,66
10	2.876.162,79	6.562.091,11	3.685.928,32	41,58

Fonte: autoria própria

O projeto de recuperação da energia presente no biogás, subproduto gerado no tratamento de esgoto, além de beneficiar a empresa economicamente também irá beneficiar o meio ambiente impedindo que o metano, composto altamente poluente, principalmente para a camada de ozônio, seja liberado na atmosfera ou que haja necessidade de queimadores de gás, como a prática atual, para a transformação do metano em gás carbônico. A ETE também poderá vender seus créditos de carbono, por não emitir o metano produzido no tratamento, tendo assim outra fonte de lucro.

5. ESTUDOS DE CASO

5.1. Avaliação do impacto da remoção e aproveitamento da parcela de biogás dissolvida na corrente líquida do efluente

O biogás gerado no reator UASB não é totalmente liberado na atmosfera, uma parte dessa produção fica dissolvida na massa líquida do reator, permitindo que esse gás seja descartado juntamente com o efluente final ou em fases anteriores. O gás é dissolvido no líquido quando a sua concentração excede a concentração de saturação do líquido, segundo a Lei de Henry. Os valores podem ser calculados a partir dos dados de pressão, temperatura e dos constituintes específicos do gás analisado (VAN HAANDEL, LETTINGA, 1994). Outro fator importante é o tempo de detenção hidráulico, quanto maior o contato do metano com o líquido maior será sua sorção, assim durante a noite em que a vazão é menor, o tempo de detenção é menor e a concentração de metano dissolvido será maior e o contrário ocorre durante o dia (NELTING, 2016).

No biogás, o metano está presente em maior concentração e apresenta a menor solubilidade em água quando comparado aos outros constituintes do biogás como os gases sulfídrico e carbônico (Tabela 6). Apesar da sua baixa solubilidade, o gás metano dissolvido no efluente dos reatores UASB é um assunto muito discutido entre autores por ser recorrente nos reatores anaeróbios.

Tabela 6: Solubilidade em água dos compostos do biogás

Temperatura (°C)	Volume de gás dissolvido na água (cm ³ /L H ₂ O/atm)		
	CH ₄	CO ₂	H ₂ S
20	33,8	878	2582
25	30,0	760	2282
35	25,4	592	1831

Fonte: CCE, 2000

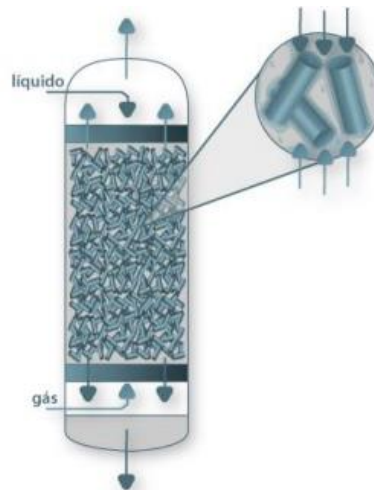
A concentração de biogás na massa líquida pode estar entre 36 e 41%, segundo Souza, Chernicharo e Aquino (2011), essa concentração dissolvida pode chegar até o efluente final nos corpos hídricos ou ir se perdendo ao longo do sistema de tratamento. Por conter

substâncias altamente poluidoras em sua composição como o metano, se torna necessário a busca por alternativas para retornar esse metano para o processo de produção de energia ou para sua queima.

Para a remoção desse biogás da massa líquida, deve ser causada uma turbulência no efluente para que todas as substâncias sejam liberadas. Essa turbulência é provocada por meio de aeração no líquido (GLÓRIA, et. al, 2016), que pode ser por meio de membranas em que em um estudo recente obteve-se uma remoção de 86% (LUO; WANG; ANGELIGAKI 2014) do gás dissolvido ou por meio da dissipação de energia em que o efluente sofre quedas em uma atmosfera confinada e o biogás pode ser recuperado.

Para efluentes com baixa relação ar/líquido o procedimento de remoção e recuperação de metano mais adequado é o de coluna de preenchimento em que consiste na colocação de um material suporte como anéis de plástico que permitirão que o líquido seja disperso de forma aleatória permitindo a transferência de massa (ESPIRITO SANTO, 2017). O estudo mais recente encontrado para concentrações menores de metano dissolvido no líquido é do Huete et al. (2016) que usou a relação ar/líquido de 0,5 a 1,0 e obteve 99% de remoção desse composto do líquido.

Figura 9: Coluna de preenchimento



Fonte: adaptado de FEUP (2017)

Considerando que o valor máximo de perda de biogás para a massa líquida, segundo Souza, Chernicharo e Aquino (2011) (41%) ocorra na ETE de Rio Preto a relação entre o gás metano e líquido (rQ) será de apenas 0,06, assim sugere-se a utilização da tecnologia de coluna de preenchimento com uma eficiência de recuperação de 80% a fim de manter o trabalho realista. Os resultados foram divididos em três cenários: no primeiro não é considerada a perda de gás para o líquido, o segundo em que não é considerada a recuperação do gás dissolvido e o cenário três, em que parte do metano dissolvido é recuperado.

Tabela 7: Cenários possíveis para o gás dissolvido.

	CH₄ produzido (m³/dia)	Energia produzida (MWh/ano)	Economia gerada (%)	Payback (anos)	VPL (R\$)
1º cenário	9352,19	7753,14	73,91	4,35	3.538.548,78
2º cenário	5517,79	4574,35	43,60	7,37	-10.497.644,70
3º cenário	8604,01	7117,39	67,85	4,74	731.310,09

Fonte: autoria própria

Assim, pode-se observar que o primeiro cenário é o mais otimista e o menos realista já que não considera nenhuma perda de biogás para o líquido, porém é importante para avaliar o potencial máximo da estação na produção de energia e incentivar a recuperação do metano.

O segundo cenário, assume que todo o metano dissolvido será perdido, e assim apresenta o estado mais crítico para a produção de energia elétrica. Esse é o cenário mais pessimista, pois considera que a porcentagem máxima de gás metano será perdida, apresentando uma redução de apenas 40% nas contas de energia e possuindo o VPL negativo, sendo de aplicação pouco confiável e atrativa.

O terceiro cenário representa o uso de tecnologias para a recuperação de gás dissolvido. Assim, se mostra o cenário mais coerente para a aplicação por possuir o VPL positivo, conseguir recuperar o máximo possível do biogás presente no líquido e evitar a sua emissão para a atmosfera ou para os corpos hídricos.

5.2. Influência da disposição do lodo do sistema de Lodos Ativado no reator UASB

Na ETE de Rio Preto, atualmente, a eficiência do reator UASB, se encontra em 58%. Apesar de a eficiência prevista ser de 60%, essa eficiência pode ser considerada baixa, quando comparada a de outros estudos que consideram a eficiência de reatores anaeróbios em 70%. Como praticamente metade do lodo aeróbio produzido no tanque de aeração volta para o tratamento preliminar podendo influenciar a eficiência do UASB será feito um estudo de caso de base teórica para a avaliação da influência do aporte do excesso de lodo do sistema de Lodos Ativados no reator UASB, na produção de biogás, comparando ao envio do lodo excedente para um biodigestor para a produção de energia.

Em um trabalho realizado por Silva Filho e van Haandel (2014) foi analisada em escala de laboratório a influência de diferentes concentrações de lodos ativados nos reatores anaeróbios. As análises foram feitas em 4 reatores anaeróbios com 0, 20, 40 e 60% de adição de lodo aeróbio excedente e assim foi calculada a eficiência de cada experimento. Todos os experimentos se mostraram positivos com a adição do lodo, sendo que a eficiência diminuiu de 78 a 75% para as concentrações de 0 a 60% respectivamente. A análise da digestão do lodo excedente do sistema Lodos Ativados em um biodigestor exclusivo também foi observada e obteve-se o resultado de 38% de digestão.

Segundo o estudo realizado por Caseiro, Piveli e Sobrinho (2006) no centro no Conjunto Residencial da Universidade de São Paulo, o experimento foi realizado em 3 fases sendo duas com concentrações diferentes de esgoto e lodos ativados e uma fase somente com esgoto coletado no residencial. O resultado se manteve nas três fases com a remoção de 70% de DQO, acidez e alcalinidade estáveis e sem alteração na digestão do lodo.

Em outro estudo realizado por Pontes e Chernicharo (2009) foram analisados dois sistemas de tratamento com um reator anaeróbio e filtros biológicos percoladores um em escala piloto e outro em escala de bancada que passaram por duas fases, somente com a inserção de esgoto e com a inserção de lodo ativado e esgoto. Nesse estudo, encontraram-se algumas alterações nas características da biomassa, porém o sistema não sofreu nenhum efeito negativo na eficiência de remoção de DQO, DBO e sólidos suspensos totais no efluente.

No presente estudo, o retorno de lodo representa 32% da vazão e carga de entrada do reator UASB, dessa forma, esse procedimento não apresenta nenhum prejuízo aparente à

eficiência do mesmo, já que segundo os estudos anteriores mostraram que o reator anaeróbio pode suportar concentrações bem maiores do lodo aeróbio. A digestão do lodo também é adequada já que é digerida em aproximadamente 40% mesma porcentagem de um biodigestor somente para a digestão do lodo ativado, sendo inviável e desnecessária a sua instalação. Portanto, a baixa eficiência do UASB pode ser ocasionada por outros motivos, como por já estar próximo da vazão média máxima em que foi projetado, ou seja, associado a tempos de detenção hidráulica próximos ao limite mínimo recomendado, o que reflete perda de lodo do sistema como efluente, reduzindo a eficiência do sistema.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados do presente estudo, referentes à estimativa de produção de biogás, a partir dos dados da matéria orgânica presentes no esgoto e no retorno do excesso de lodo ao reator anaeróbio, se mostraram próximos aos valores medidos no ano de 2015, já que a diferença dos valores pode estar relacionada ao aumento da concentração do esgoto.

A partir da análise financeira obteve-se uma redução de mais de 60% nas contas de energia da estação e VPL positivo se mostrando ser um investimento atrativo. Porém, vale lembrar que as análises financeiras dependem de diversos aspectos e fatores que devem ser avaliados com muita precisão e cuidado. Apesar de o VPL ser uma das análises mais confiáveis para avaliar a viabilidade de um projeto, é importante o uso de outros métodos para que o resultado seja confirmado.

Analisando a fração de biogás dissolvido na massa líquido do reator UASB e potencialmente perdida no efluente observou-se que a recuperação de 80% dessa fração por técnicas específicas, sem uma grande alteração na redução dos custos, representa o cenário mais atrativo para a recuperação de energia a partir do biogás produzido na ETE Rio Preto. Por isso é de grande importância se fazer uma análise minuciosa de diversos aspectos antes da aplicação do projeto, como a análise da massa líquida dos reatores UASB, para saber realmente qual a perda de biogás.

O processo de recirculação do lodo aeróbio excedente para o reator UASB não fornece nenhum prejuízo, segundo as bases teóricas e estudos correlatos, à eficiência do reator anaeróbio. Assim, se mostra uma prática adequada, já que elimina os gastos com os biodigestores de lodos e geram menos resíduos. Dessa forma, a baixa eficiência do reator UASB observada na ETE Rio Preto se deve a outros fatores que devem ser avaliados para sua melhor operação e ampliações necessárias.

Além da produção de energia a partir do biogás, a ETE possui outros potenciais para a geração de energia como a queima do lodo produzido após a sua desidratação. Assim, novos estudos se tornam cada vez mais importantes por apresentarem alternativas inovadoras que conciliam o meio ambiente e a questão financeira. Dessa forma, para que o uso desses novos tipos de energia sejam mais recorrentes deve ser feita uma conscientização ambiental e econômica para que os incentivos continuem crescendo no Brasil.

REFERÊNCIAS

ABC - AGÊNCIA BRASILEIRA DE COOPERAÇÃO. **Programa Brasil - Alemanha**. Brasília, 2007. Disponível em: <http://www.abc.gov.br/Projetos/CooperacaoRecebida/BrasilAlemanha>. Acesso em: 23 jan. 2019.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Brasília: TDA Comunicação, 2008.

BRAADBAART, O. HELLER, L.; CASTRO, J.E. **A transferência Norte-Sul do paradigma da água canalizada: O papel do setor público nos serviços de água e esgotos**. Política Pública e gestão de serviços de saneamento. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2013.

BRANCO, M. R. S. C. **Avaliação do impacto da presença de siloxanos em sistemas de aproveitamento de biogás**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Ambiente) - Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Resolução nº 482, de 17 de abril de 2012. Diário Oficial da União, Brasília. 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências

BRASIL. Lei nº 12.490, de 16 de setembro de 2011. Altera as Leis nos 9.478, de 6 de agosto de 1997, e 9.847, de 26 de outubro de 1999, que dispõem sobre a política e a fiscalização das atividades relativas ao abastecimento nacional de combustíveis e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2011.

BRITTO, M. C.; ANDREO, V. P. **Potencial energético do biogás de estação de tratamento de esgoto: análise das perspectivas técnica e econômicas**. 2017. Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2017.

CAETANO, L.; **Proposição de um sistema modificado para quantificação de biogás**. Dissertação (Mestrado) - UNESP, Campus de Jaboticabal, p. 130, 1995.

CALIJURI, M. C. *et al.* **Engenharia Ambiental: Conceito, Tecnologia e Gestão**. Rio de Janeiro - RJ: Elsevier, 2013. Capítulo 18.

CAMPOS, J. R, et al. **Tratamento de Esgotos Sanitário por Processo Anaeróbio e Disposição Controlada no Solo**. Rede Cooperativa de Pesquisas (RECOPE) – Programa de pesquisas em Saneamento Básico (PROSAB). PUC-PR, UFMG, UFPb, UFRGS, UFRN, UNICAMP, USP, Rio de Janeiro – RJ, 1999

CASEIRO, A. H. PIVELI, R. P. SOBRINHO, P. A. **Reator UASB tratando esgoto sanitário e digerindo lodo aeróbio excedente**. XXX Congresso interamericano de ingeniería sanitaria y ambiental, Punta del Este - Uruguay, 2006

CCE - CENTRO PARA CONSERVAÇÃO E ENERGIA. **Guia Técnico de Biogás**. Amadora - Portugal, 2000. 117 p

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Biogás: Definição.** São Paulo, 2019b. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/>. Acesso em: 17 jan. 2019.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Biogás: Fundamentos.** São Paulo, 2019a. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/biogas/fundamentos/>. Acesso em: 18 jan. 2019.

CHERNICHARO, C. A. L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Reatores Anaeróbios.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA. Universidade Federal de Minas Gerais. Vol. 5. 2007.

COELHO, J. M. **Impactos da participação do biogás e do biometano na matriz brasileira.** IV Fórum do Biogás, São Paulo, 2017. Disponível em: http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-244/topico-257/EPE_IV%20FORUM%20BIOGAS_JOSE%20MAURO_2017_1710.pdf. Acesso em: 22 jan. 2019.

COLPO, I.; MEDEIROS, F. S. B.; WEISE, A. D. ANÁLISE DE RETORNO DO INVESTIMENTO: UM ESTUDO APLICADO EM UMA MICROEMPRESA. **RACI, Getúlio Vargas**, v.10, n.21, [S. l.], jul. 2016.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto.** 2006. Dissertação (Pós-Graduação) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

EMBASA. **BIOGÁS GERADO NO TRATAMENTO DO ESGOTO É TRANSFORMADO EM ENERGIA ELÉTRICA EM FEIRA DE SANTANA.** **Revista DAE**, [S. l.], p. -, 21 dez. 2016.

ESPIRITO SANTO, B. C. **Avaliação de câmara de dissorção de metano e sulfeto de hidrogênio dissolvidos em efluentes de reatores UASB tratando esgoto doméstico.** 2017. Dissertação (Mestrado em Saneamento) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2017.

FEUP. Transferência de massa. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Departamento de Engenharia Química. Portal Laboratórios Virtuais de Processos Químicos. FOSTER, P. et al. **Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing.** *Climate Change 2007: the physical science basis.* Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. Chap. 2, p. 129-234.

FRANÇA JUNIOR, A. T. **Análise do Aproveitamento Energético do Biogás Produzido numa Estação de Tratamento de Esgoto.** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira - SP, 2008. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariamecanica/nuplen/analise-do-aproveitamento-energetico-do-biogas-produzido-numa-estacao-de-tratamento-de-esgoto.pdf>. Acesso em: 18 jan. 2019.

FRARE, L. M.; GIMENES, M. L.; PEREIRA, N. C. **Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás.** [S. l.], p. 167-172, 19 mar. 2009.

GEHRING, C. G. **Análise da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na fermentação anaeróbia de vinhaça.** 2010. Dissertação (Graduação) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

GITMAN, L. J. **Princípios de administração financeira.** 12. ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2010.

GLÓRIA, R. M. et. Al. **Stripping and dissipation techniques for the removal of dissolved gases from anaerobic effluents.** Brazilian Journal of Chemical Engineering, v. 33, n. 4, p. 713-721, 2016.

GUIMARÃES, A. Y. et al. Biogás de resíduos agroindustriais: panorama e perspectivas. **Biogás: a próxima fronteira da energia renovável,** Rio de Janeiro, 17 jul. 2018

HUETE, A. et. al, **Eliminación biológica de CH₄ y H₂S disueltos en el efluente de un reactor anaerobio que trata aguas residuales municipales.** IV Conferencia Latinoamericana de Saneamiento (Lima/Perú), 2016.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Perfil dos municípios brasileiros. **Saneamento básico: Aspectos gerais da gestão da política de saneamento básico.** 2017, Rio de Janeiro, 2018.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Cidades: São José do Rio Preto.** [S. l.], 2018. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-jose-do-rio-preto/panorama>. Acesso em: 16 jan. 2019.

JORDÃO, Eduardo P. e PESSÔA, Constantino A. **Tratamento de Esgotos Domésticos.** 4ª Edição. Rio de Janeiro: ABES, 927 – 945 p. 1995.

KARLSSON, T. *et al.* **Manual Básico de Biogás.** Lajeado - RS: UNIVATES, 2014. Disponível em: https://www.univates.br/editora-univates/media/publicacoes/71/pdf_71.pdf. Acesso em: 17 jan. 2019.

KRUMMENAUER, E. J. **Tecnologia para produção de biocombustíveis: compressão de biogás [...].** 2º Congresso internacional de tecnologias para o meio ambiente, Bento Gonçalves, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Jose_Souza18/publication/274735809_Tecnologia_para_producao_de_biocombustiveis_compressao_de_biogas/links/552956210cf29b22c9bf2481/Tecnologia-para-producao-de-biocombustiveis-compressao-de-biogas.pdf. Acesso em: 14 nov. 2018.

LUO, G., WANG, W. and ANGELIDAKI, I., **A new degassing membrane coupled upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor to achieve in-situ biogas upgrading and recovery of dissolved CH₄ from the anaerobic effluent.** Applied Energy, 132, 536- 542 (2014).

METCALF & EDDY, A *et al.* **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.** New York: McGraw-Hill, 2002.

Ministério do Meio Ambiente – MMA. Decreto nº 7.343, de 26 de outubro de 2010. Regulamenta a Lei no 12.114, de 9 de dezembro de 2009, que cria o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima - FNMC, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília. 2010a.

Ministério do Meio Ambiente – MMA. Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010. Regulamenta os arts. 6o, 11 e 12 da Lei no 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília. 2010b.

MONTEIRO, J. R. **PLANASA: Análise de desempenho**. São José da Costa Rica, 1989.

MURTHA, N. A.; CASTRO, J. E.; HELLER, L. **Uma Perspectiva histórica das primeiras políticas públicas de saneamento e de recursos hídricos no Brasil**. São Paulo, 10 dez. 2014.

NELTING, K. Recuperação e captura de biogás em meio líquido: estudo de viabilidade da implementação de procedimentos para a recuperação de metano dissolvido em esgotos municipais no Brasil. **Resumo técnico**. 4º Workshop internacional: aproveitamento energético de biogás de etes, Curitiba, 2016.

PALHARES, J. C. P. **Biodigestão Anaeróbia de Dejetos de Suínos: Aprendendo com o Passado Para Entender o Presente e Garantir o Futuro**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Brasília, 2008.

PONTES, P. P.; CHERNICHARO, C. A. L. **Efeito do retorno de lodo aeróbio sobre as características da biomassa presente em reatores UASB tratando esgoto sanitário**. [S. l.], p. 223-234, 4 abr. 2009.

RIVERA, E. A. **Modelo Sistêmico para Compreender o Processo de Eutrofização em um Reservatório de Água**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2003.

ROCHA, J. C.; BARBIÉRI, R. S.; CARDOSO, A. A. **Refluxo em funil: Um dispositivo para agilização do processo de rotina analítica para determinação da DQO**. Araraquara - SP, p. 200-204, 3 out. 1989.

SÃO PAULO (Estado). Decreto nº 10.755, de 22 de novembro de 1997. Dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água receptores na classificação prevista no Decreto n. 8.468 (1), de 8 de setembro de 1976, e dá providências correlatas.

SEMAE - SERVIÇO AUTÔNOMO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO. **Tratamento de Esgoto - ETE**. [S. l.], 2018. Disponível em: <http://www.semae.riopreto.sp.gov.br/tratamento-de-esgoto.aspx>. Acesso em: 16 jan. 2019.

SILVA FILHO, J. A.; VAN HAANDEL, A. C. Estabilização de lodo de pós-tratamento aeróbio na unidade de pré-tratamento anaeróbio. **Revista DAE**, [S. l.], 2014.

SILVA, L. F.; MACEDO, A. H. **Um estudo exploratório sobre o crédito de carbono como forma de investimento**. REGET/UFSM, [S. l.], p. 1651 - 1669, 9 set. 2012.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnósticos dos serviços de água e esgoto - 2016.** [S. l.], 2018. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2016>. Acesso em: 15 jan. 2019.

SOUZA, C.L., CHERNICHARO, C.A.L., AQUINO, S.F. **Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions.** *Water Science Technology*, v.11, n.64, p. 2259–2264, 2011.

VAN HAANDEL, A. C. & LETTINGA, G. **Tratamento anaeróbio de esgoto. Um manual para regiões de clima quente.** Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil, 1994.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA. Universidade Federal de Minas Gerais. Vol. 2. 1998.

VON SPERLING, M. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias -Lodos ativados.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – DESA. Universidade Federal de Minas Gerais. Vol. 4. 1997.

APÊNDICE

Dados relativos aos anos de vida útil do projeto, conforme descrito na metodologia.

Projeto	Viabilidade econômica										
	Custo	Vazão de	Energia	Tarifa de	Economia	Energia	Custos nas	Economia	Fuxo de	Economia	VPL
	anual*	biogás	elétrica	energia	nas contas	elétrica	contas de	após	caixa (FC)	fluxo de	
Anos	R\$	m ³ /dia	MWh/ano	(TE)*	elétrica	consumida***	elétrica	%	R\$	%	R\$
1	2020753,82	9352,19	7753,14	499,23	3870602,09	10490,49	5237169,32	73,91	1849848,27	35,32	3538548,78
2	2101583,98	10287,40	8528,46	519,20	4427968,79	10647,85	5528355,93	80,10	2326384,81	42,08	
3	2185647,33	10390,28	8613,74	539,97	4651138,42	10860,81	5864479,97	79,31	2465491,08	42,04	
4	2273073,23	10494,18	8699,88	561,57	4885555,79	11078,02	6221040,36	78,53	2612482,57	41,99	
5	2363996,16	10599,12	8786,88	584,03	5131787,81	11299,59	6599279,61	77,76	2767791,65	41,94	
6	2458556,00	10705,11	8874,75	607,39	5390429,91	11525,58	7000515,81	77,00	2931873,91	41,88	
7	2556898,24	10812,17	8963,50	631,69	5662107,58	11756,09	7426147,17	76,25	3105209,33	41,81	
8	2659174,17	10920,29	9053,13	656,95	5947477,80	11991,21	7877656,92	75,50	3288303,63	41,74	
9	2765541,14	11029,49	9143,66	683,23	6247230,68	12231,03	8356618,46	74,76	3481689,54	41,66	
10	2876162,79	11139,79	9235,10	710,56	6562091,11	12475,65	8864700,86	74,02	3685928,32	41,58	

*Aumento de 4% ao ano

**Aumento de 10% no primeiro ano e 1% nos anos seguintes

*** Aumento de 10% no primeiro ano e 2% nos anos seguintes

Fonte: autoria própria