

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS
GERADO NO TRATAMENTO DE ESGOTOS
SANITÁRIOS: ESTUDO DE CASO DA ETE BRASÍLIA
SUL COM ENFOQUE NA DIGESTÃO ANAERÓBIA
DOS LODOS GERADOS

MURILO VENANCIO FONSECA

ORIENTADOR: GABRIEL CAMPOS VIEIRA

COORIENTADORA: ARIUSKA KARLA BARBOSA
AMORIM

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL II EM
ENGENHARIA AMBIENTAL

BRASÍLIA, JULHO DE 2019

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO
NO TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS: ESTUDO
DE CASO DA ETE BRASÍLIA SUL COM ENFOQUE NA
DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS LODOS GERADOS**

MURILO VENANCIO FONSECA

MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA AMBIENTAL.

APROVADA POR:

Gabriel Campos Vieira, MSc (UnB)
(ORIENTADOR)

Yovanka Pérez Ginoris, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

Lenora Nunes Ludolf Gomes, DSc (UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 04 DE JULHO DE 2019.

FICHA CATALOGRÁFICA

FONSECA, MURILO VENANCIO
APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO NO TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS: ESTUDO DE CASO DA ETE BRASÍLIA SUL COM ENFOQUE NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE LODOS GERADOS.

xi, 79 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Ambiental, 2019)
Monografia de Projeto Final – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. LODO	2. BIOGÁS
3. ENERGIA	4. METANO
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FONSECA, M.V. (2019). *APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO NO TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS: ESTUDO DE CASO DA ETE BRASÍLIA SUL COM ENFOQUE NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE LODOS GERADOS*. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 79 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: MURILO VENANCIO FONSECA
TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO NO TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS: ESTUDO DE CASO DA ETE BRASÍLIA SUL COM ENFOQUE NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DOS LODOS GERADOS
GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Ambiental / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

NOME: Murilo Venancio Fonseca
EMAIL: murilofons2@gmail.com

AGRADECIMENTOS

Ao longo de toda essa jornada que é a vida como um todo, eventualmente esquecemos de demonstrar a importância das pessoas que nos cercam e nos apoiam. A vezes até mesmo pensamos que o fato delas já saberem o quanto somos gratos é suficiente, mas agradecer e valorizar quem merece nunca é demais.

Agradeço em primeiro lugar a mulher mais maravilhosa desse mundo, aquela que é o meu pilar e uma amiga para todas as horas, aquela que palavras nunca serão suficientes para descrever o quanto sou grato, minha mãe: Valda;

Ao meu irmão Rodrigo, outro sensacional pilar da minha vida. Parceiro para qualquer momento, bom ou ruim, que esteve sempre ao meu lado quando eu precisava e principalmente quando eu achava que não precisava. Parceiro de conversas aleatórias e intermináveis, mas nunca entediante;

Aos meus outros irmãos Daniel, Gustavo e Bob que infelizmente (ou felizmente) não vieram da mesma mãe, mas que sempre estiveram presentes, mesmo quando distantes;

Aos outros amigos Stefanie, Guilherme, Rafael e Ana Flávia que sempre estiveram escutando minhas opiniões, dramas, críticas assim como dando as suas, não só no trabalho como na vida;

Aos meus orientadores Ariuska e Gabriel, por me auxiliarem no aprofundamento de um tema que me alegra imensamente trabalhar com;

E aos meus colegas de trabalho Leandro e Rossana, que em tão pouco tempo me permitiram uma grande evolução profissional e pessoal.

Por fim, agradeço novamente a todos, pois ao escrever esses agradecimentos lágrimas escorreram e isso apenas reforça o quanto sou feliz por tê-los.

RESUMO

O crescimento urbano acarreta no aumento da produção de esgoto, conseqüentemente do lodo oriundo de seu tratamento e dessa forma aumenta também a necessidade de tratamento e correto gerenciamento desse. A utilização de tratamento anaeróbico com foco na redução de volume do lodo e na cogeração de energia térmica e elétrica através da queima do metano gerado é um processo em crescente implementação, mas ainda pouco utilizado. Nesse contexto, o objetivo geral desse trabalho foi a análise do potencial energético da ETE Brasília Sul com base na produção de metano gerado na digestão anaeróbia dos lodos. O direcionamento do trabalho foi pautado nos objetivos específicos de i) Analisar o potencial de produção de biogás e Metano na ETE Brasília Sul; ii) Analisar a viabilidade da instalação de um sistema de aproveitamento energético e purificação do biogás iii) Estimar o balanço energético da ETE com sistema de aproveitamento do biogás; iv) Estimar o prazo de retorno do investimento com base nas economias produzidas, custos de implantação e manutenção, oriundos do sistema de aproveitamento energético. Os resultados mostraram que potencial de produção de biogás é considerável, avaliado em uma vazão média de 3.864 m³/dia no período de janeiro de 2019 a abril de 2019. A produção energética bruta média nesse período foi avaliada em 1046,5 kWh e o seu aproveitamento na cogeração foi proposto através de um motor de combustão interna e na secagem térmica do lodo, considerando ainda a purificação do biogás para adequação aos requisitos do motor. Assim o sistema de aproveitamento energético apresentou uma produção elétrica média de 361 kWh e térmica de 429 kWh, representando uma economia anual com energia elétrica na faixa de 16,69% do consumo da ETE Brasília Sul. Por fim, ao avaliar os ganhos econômicos gerados pelo sistema com os seus respectivos custos de operação, manutenção e implementação, o Prazo de Retorno do Investimento foi avaliado entre 7,0 e 9,6 anos, o Valor Presente Líquido do investimento se mostrou favorável para um prazo superior a 9,33 anos com a faixa de ganhos máxima e 14,92 anos com a faixa mínima. Foi apresentada também a possibilidade de lucro no valor entre R\$9.302,60 a R\$32.468,18 no prazo de 17,5 nos moldes utilizados pela SABESP na construção da ETE São Lourenço.

Palavras-chave: metano, energia, purificação, viabilidade, técnica, econômica.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
2.1. OBJETIVO GERAL	3
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	3
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1. TRATAMENTO DE ESGOTOS E SEUS SUBPRODUTOS	4
3.1.1. Etapas do tratamento	4
3.1.2. Geração de lodo em diferentes sistemas de tratamento de esgotos	5
3.2. MANEJO E TRATAMENTO DO LODO GERADO EM ETE	7
3.3. DIGESTÃO ANAERÓBIA	8
3.3.1. Hidrólise	10
3.3.2. Acidogênese.....	10
3.3.3. Acetogênese.....	11
3.3.4. Metanogênese	11
3.3.5. Sulfetogênese.....	12
3.3.6. Características e produção de metano	13
3.4. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO METANO.....	16
3.4.1. Mecanismos de aproveitamento energético.....	17
3.4.2. Aproveitamento da energia térmica pela secagem do lodo	22
3.4.3. Purificação do biogás após sua geração	24
3.4.4. Experiências nacionais	31
3.4.5. Projeções financeiras	33
3.5. ETE BRASÍLIA SUL	34
3.5.1. Descrição da ETE	34
3.5.2. Características do lodo gerado.....	37
3.5.3. Produção e gerenciamento do lodo.....	37
3.5.4. Energia elétrica	38
4. METODOLOGIA	40
4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	40
4.2. QUANTIFICAÇÃO DO METANO E SEU POTENCIAL ENERGÉTICO	41
4.3. CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA.....	42
4.3.1. Seleção da tecnologia de aproveitamento energético	42

4.3.2.	Conversão do biogás em energia elétrica	43
4.3.3.	Conversão do biogás em energia térmica	43
4.4.	IMPACTOS DA PURIFICAÇÃO E SUAS DIMENSÕES	44
4.5.	ESTIMATIVA ECONÔMICA	45
4.5.1.	Economias produzidas	46
4.5.2.	Custos de implantação	47
4.5.3.	Custos de manutenção	47
4.5.4.	Valor Presente Líquido	48
5.	RESULTADOS	49
5.1.	DADOS SECUNDÁRIOS	49
5.1.1.	Geração de lodo da ETE Brasília Sul	49
5.1.2.	Consumo de energia elétrica na ETE Brasília Sul	50
5.2.	AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS	50
5.3.	TECNOLOGIA DE APROVEITAMENTO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS	53
5.4.	APROVEITAMENTO TÉRMICO	56
5.5.	ANÁLISE FINANCEIRA	57
5.5.1.	Economias produzidas	57
5.5.2.	Custo de implantação	59
5.5.3.	Custo de manutenção	59
5.5.4.	Balanço financeiro	60
6.	CONCLUSÃO	64
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.3.1 Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.	9
Figura 3.3.2 Rotas de conversão de matéria orgânica de esgoto: a) sistema anaeróbio e b) sistema aeróbio.	14
Figura 3.4.1 Combustão direta sem recuperação de energia: (a) queimador aberto; (b) queimador fechado.	18
Figura 3.4.2 Exemplos de caldeiras que podem ser adaptadas para utilizar biogás como combustível: (a) caldeira de tubos de fogo; (b) Caldeira de tubos de água.	19
Figura 3.4.3 Grupo motor-gerador de combustão interna.	20
Figura 3.4.4 Turbina a gás.	20
Figura 3.4.5 Interior da microturbina Capstone.	21
Figura 3.4.6 Esquema da transferência de calor de (a) secadores diretos e (b)secadores indiretos.	23
Figura 3.4.7 Poder calorífico inferior em função do percentual de metano.	26
Figura 3.4.8 Compartimento de condensação do purificador.	29
Figura 3.4.9 Peneiras moleculares e filtro de cavaco de ferro.	29
Figura 3.5.1 Visualização superior da ETE Sul.	34
Figura 3.5.2 Área da ETE Brasília Sul.	36
Figura 3.5.3 Fluxograma da ETE Brasília Sul.	37
Figura 4.1.1 Sequência de etapas metodológicas.	40
Figura 5.2.1 Potência e Vazão de CH ₄ gerada.	52
Figura 5.3.1 Análise das tecnologias utilizadas com base na potência.	53
Figura 5.3.2 Custos médios de implantação e manutenção por tecnologia.	54
Figura 5.3.3 Potências geradas por tecnologia.	54
Figura 5.5.1 Custos médio de manutenção diária por mês.	60
Figura 5.5.2 Balanço financeiro mensal.	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1.1 Níveis de tratamento de esgoto.....	5
Tabela 3.1.2 Produção teórica e características do lodo para diferentes sistemas de tratamento de esgoto doméstico	6
Tabela 3.2.1 Etapas do gerenciamento do lodo e principais processos utilizados	7
Tabela 3.2.2 Comparação entre lodo bruto e lodo digerido	8
Tabela 3.3.1 TRS mínimos e desejáveis para o bom funcionamento dos digestores anaeróbios de mistura completa.....	13
Tabela 3.3.2 Composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, aterros sanitários na fase metanogênica e digestores de lodo	15
Tabela 3.3.3 Características do gás natural e do biogás	15
Tabela 3.3.4 Poder calorífico inferior do biogás e de outros combustíveis e equivalência com o metano	16
Tabela 3.4.1 Classificação de algumas alternativas para gerenciamento do biogás.....	17
Tabela 3.4.2 Comparação entre as principais alternativas de cogeração de eletricidade e calor	22
Tabela 3.4.3 Características dos secadores diretos e indiretos	24
Tabela 3.4.4 Necessidade de remoção de compostos gasosos de acordo com a utilização do biogás.....	25
Tabela 3.4.5 Composição típica do biogás produzido e purificado.....	26
Tabela 3.4.6 Características dos diferentes processos para a eliminação de CO ₂	27
Tabela 3.4.7 Níveis de tratamento requerido para diferentes tipos de uso do biogás	28
Tabela 3.4.8 Custos para o tratamento de biogás na Europa.....	28
Tabela 3.4.9 Técnicas de remoção de impurezas do biogás	30
Tabela 3.4.10 Comparação energética dos cenários sem e com purificação.....	31
Tabela 3.5.1 Características dos digestores e do lodo em 2019	38
Tabela 3.5.2 Despesas com os serviços em 2015	38
Tabela 5.1.1 Concentração de SV no lodo	49
Tabela 5.1.2 Vazão volumétrica diária de lodo em 2019	50
Tabela 5.1.3 Consumo de energia elétrica na ETE Brasília Sul em 2019.....	50
Tabela 5.2.1 Determinação de parâmetros associados à geração da potência.....	51
Tabela 5.2.2 Comparação das potências geradas entre as ETEs nacionais e o potencial da ETE Brasília Sul	52

Tabela 5.3.1 Características das tecnologias associadas à potência gerada na ETE Brasília Sul em fevereiro de 2019	53
Tabela 5.3.2 Potências geradas.....	55
Tabela 5.3.3 Demanda elétrica na purificação do biogás	55
Tabela 5.4.1 Produção diária de lodo e sua composição volumétrica.....	56
Tabela 5.4.2 Parâmetros da redução de volume do lodo	56
Tabela 5.4.3 Teor de sólidos, umidade e redução de volume do lodo após secagem térmica ..	57
Tabela 5.4.4 Economias com a redução de volume do lodo	57
Tabela 5.5.1 Saldo da potência elétrica produzida	58
Tabela 5.5.2 Elementos das economias produzidas por dia	58
Tabela 5.5.3 Economia de eletricidade em 2019.....	58
Tabela 5.5.4 Custo de implantação dos sistemas de aproveitamento e purificação	59
Tabela 5.5.5 Custo de manutenção diário em função do mês	59
Tabela 5.5.6 Custo mensal total	60
Tabela 5.5.7 Balanço financeiro mensal.....	61
Tabela 5.5.8 Avaliação do Prazo de Retorno do Investimento	62
Tabela 5.5.9 Valores do investimento com a utilização de financiamento	62

LISTA DE EQUAÇÕES

3.1 Oxidação do propionato.....	11
3.2 Oxidação do propionato.....	11
3.3 Oxidação do butirato	11
3.4 Oxidação acetoclástica	12
3.5 Oxidação hidrogenotrófica	12
4.1 Carga orgânica aplicada.....	41
4.2 Sólidos voláteis destruídos	41
4.3 Vazão de biogás gerada	41
4.4 Vazão de metano gerado.....	42
4.5 Potência disponível do metano	42
4.6 Potência elétrica instalada	43
4.7 Potência de energia térmica instalada.....	43
4.8 Volume de água a ser evaporada	44
4.9 Redução do volume do lodo	44
4.10 Custo de energia elétrica na purificação.....	45
4.11 Impacto da purificação no sistema elétrico	45
4.12 Receita operacional elétrica.....	46
4.13 Receita operacional térmica.....	46
4.14 Custo total de implantação	47
4.15 Custo total de manutenção.....	47
4.16 Prazo de Retorno do Investimento.....	48
4.17 Valor Presente Líquido	48

LISTA DE ABREVIACÕES, SIGLAS E SÍMBOLOS

ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AT	Alcalinidade Total
BRS	Bactérias redutoras de Sulfeto
Caesb	Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal
CH ₄	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DF	Distrito Federal
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
H ₂ S	Ácido Sulfídrico ou Sulfeto de Hidrogênio
O ₂	Oxigênio
OCDE	Organização Europeia da Cooperação e Desenvolvimento
PCI	Poder Calorífico Inferior
pH	Potencial Hidrogeniônico
ppm	Partes Por Milhão
PRI	Prazo de Retorno do Investimento
PRODES	Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas
RAFA	Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo
ST	Sólidos Totais
SS	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
TRS	Tempo de Retenção dos Sólidos
UASB	Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente com Manto de Lodo (<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>)
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (<i>United States Environmental Protection Agency</i>)
UGL	Unidade de Gerenciamento de Lodo
UV	Ultravioleta

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento populacional e da densidade urbana do Distrito Federal, cada vez mais exigem-se recursos e serviços do setor de esgotamento sanitário para atender com qualidade às necessidades da população. Segundo o IBGE (2018) a densidade urbana do DF de 2010 para 2018 foi de 444,66 hab/km² para 514,65 hab/km², em que ao analisar apenas a situação da ETE Brasília Sul, inaugurada em 1962 para atender uma população de 150 mil habitantes, já passou por diversas reformas e hoje possui capacidade para atender uma população de 460 mil habitantes.

Essa constante expansão dos sistemas de tratamento de efluentes e suas demandas é acompanhada pela também crescente geração de resíduos. O lodo, principal resíduo desse processo, possui diversas destinações que, segundo UE (2010), as principais formas de destinação do lodo na União Europeia em 2010 eram no setor agrícola (40%), incineração (20%), aterro sanitário (15%), compostagem (13%) e outros usos (10%). Estima-se, segundo Cassini (2003), que em 2003 eram produzidas no Brasil cerca de 270 mil toneladas de lodo por ano (expresso em matéria seca) nas ETEs, das quais apenas cerca de 5% são reutilizadas de forma adequada. Além disso, existe uma vasta necessidade de expansão dos sistemas de tratamento, uma vez que estes não atendem toda a população pois segundo Camargo (2002), pesquisas realizadas pela OCDE mostram que o serviço de saneamento no Brasil não é universalizado em decorrência da baixa renda da população e da má gestão dos poucos recursos disponibilizados para o setor, provocando assim uma carência do setor que precisa ser diminuída.

Para estabilizar o lodo e reduzir seu nível de patogenicidade usam-se os métodos biológicos através de ação de microrganismos, métodos químicos através da oxidação química da matéria orgânica e pelo método térmico que utiliza o calor para eliminar os microrganismos e estabilizar a matéria orgânica. Dentre estes métodos, os biológicos, com a digestão anaeróbia do lodo, segundo Cassini (2003), se fazem a opção mais vantajosa sobre os demais métodos ao apresentar qualidades como: menor custo de operação; menor custo de implantação; processo gerador de biogás, podendo ser utilizado como fonte de energia e maior facilidade operacional. Esse cenário aponta para a tendência de aproveitamento do lodo visando à produção de energia em benefício das ETEs, muito embora os estudos nessa área ainda não sejam bem difundidos (De Sena *et al.*, 2007).

Todavia, tal como expresso, existe a possibilidade de transformar a problemática disposição do lodo em uma solução através da sua digestão anaeróbia. Segundo Cassini (2003), o uso do biogás apresenta grande importância estratégica dentro do enfoque dos impactos ambientais na medida em que viabiliza seu aproveitamento como fonte de energia e colabora na diversificação da matriz energética ao dar uma destinação para esse resíduo. A matriz energética renovável do Brasil em 2017 esteve entre as mais elevadas e diversificadas do mundo, composta por 42,9% da sua produção, mas apenas 0,065% oriunda do biogás (EPE, 2018). O biogás, desde que removidos os maiores contaminantes (principalmente o gás H₂S), pode ser utilizado para a produção de energia elétrica e energia térmica ao aquecer, secar ou resfriar (Probiogás, 2015).

Na ETE Brasília Sul, a produção de lodo é a maior de Brasília, representando aproximadamente 49,26% da sua produção e equivalente a 60.900 m³/ano (Caesb, 2015). A destinação desse volume de lodo é de 31,2% para a recuperação de áreas degradadas, 19,1% é submetido ao processo de secagem para redução de volume e os 49,7% restantes encontram-se armazenados na Unidade Gerenciadora de Lodo para também passarem pelo processo de secagem natural, mas ainda assim, sem uma destinação adequada.

O aproveitamento energético representa uma solução para essa problemática e ainda um potencial de economia no processo de tratamento pois de acordo com WEF (2002), as parcelas dos custos de energia nas ETEs, pelas referências internacionais, podem se situar entre 25% e 50% dos custos operacionais. Contudo, para a realidade brasileira, segundo Jordão (2014) esse percentual é menor, pois os sistemas utilizados não são tão automatizados quanto os europeus e, por isso, gasta-se mais com funcionários, reduzindo o custo com energia elétrica para cerca de 20% do total, ao passo que com pessoal próprio este é de 48%. Contudo, o aproveitamento energético do biogás ainda é muito incipiente no Brasil, sendo que a grande maioria das estações de tratamento de esgoto doméstico e efluentes industriais apenas coleta e queima o biogás gerado, sem aproveitamento do seu potencial energético (Chernicharo, 2016) tal como até então é feito na ETE Sul, foco do presente trabalho.

O Brasil ainda carece de estudos e projetos com foco na recuperação e aproveitamento energético do metano oriundo das ETEs como por exemplo o Distrito Federal, que possui 15 ETEs e nenhuma delas faz este tipo de aproveitamento. Dessa forma, este projeto visa estudar o potencial energético do biogás gerado na digestão anaeróbia dos lodos produzidos na ETE Brasília Sul.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Analisar o potencial energético da ETE Brasília Sul e as possíveis tecnologias para o seu aproveitamento com base na produção de metano gerado na digestão anaeróbia dos lodos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o potencial de produção de biogás e metano na ETE Brasília Sul;
- Analisar as tecnologias mais apropriadas para o aproveitamento energético e purificação do biogás;
- Estimar o balanço energético da ETE com a utilização do sistema de aproveitamento do biogás;
- Estimar o prazo de retorno do investimento no sistema de aproveitamento de biogás.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. TRATAMENTO DE ESGOTOS E SEUS SUBPRODUTOS

O tratamento do esgoto realizado nas ETEs, segundo Van Handel (1994), tem como um de seus objetivos a diminuição do potencial poluidor do esgoto antes que ele retorne ao meio através da separação de materiais sólidos da fase líquida. Usualmente, em centros urbanos, o tratamento do esgoto previamente ao seu lançamento em um corpo receptor, deve ser completo a fim de evitar problemas com a queima da grande quantidade de metano formado pela decomposição do esgoto por microrganismos e com a disposição do grande volume de lodo produzido (França, 2008).

O tratamento dos subprodutos sólidos gerados nas diversas unidades de tratamento é uma etapa essencial do sistema de tratamento dos esgotos. Ainda que o lodo possa, na maior parte das etapas do seu manuseio, ser constituído de mais de 95% de água, apenas por convenção é designado por fase sólida, visando distingui-lo do fluxo do líquido sendo tratado (fase líquida). Devido ao maior volume e massa gerados, com relação a todos os subprodutos sólidos, o presente texto aborda em maior profundidade a problemática do lodo.

3.1.1. Etapas do tratamento

O tratamento de efluentes é dividido em etapas sequenciais em função de suas características, mais especificamente em função do tamanho das partículas a serem removidas. No processo de tratamento, as principais etapas são o tratamento preliminar, primário, secundário, terciário e avançado que são definidos por Metcalf & Eddy (2003) na Tabela 3.1.1.

Tabela 3.1.1 Níveis de tratamento de esgoto

Nível de tratamento	Descrição
Preliminar	Remoção de constituintes de águas residuais, tais como panos, bastões, flutuadores, cascalho e graxa, que podem causar problemas de manutenção e operação com as operações de tratamento, processos e sistemas auxiliares
Primário	Remoção de uma parte dos sólidos suspensos e matéria orgânica do efluente
Secundário	Remoção de matéria orgânica biodegradável (em solução ou suspensão) e sólidos suspensos. A desinfecção também é tipicamente incluída na definição de tratamento secundário convencional
Secundário com remoção de nutrientes	Remoção de orgânicos biodegradáveis, sólidos suspensos e nutrientes (nitrogênio, fósforo ou ambos).
Terciário	Remoção de sólidos residuais em suspensão (após tratamento secundário), geralmente por meio de filtragem granular ou microscópios. A desinfecção também é tipicamente uma parte do tratamento terciário. A remoção de nutrientes é frequentemente incluída nesta definição.
Avançado	Remoção de materiais dissolvidos e suspensos após tratamento biológico normal quando necessário para várias aplicações de reutilização de água.

Fonte: Adaptado Metcalf & Eddy (2003).

A necessidade de aplicação de determinado tipo de tratamento em detrimento de outros varia com base nas características do efluente coletado e das especificações do ponto de lançamento, referente também ao efluente e ao corpo receptor. Segundo Jordão e Pessôa (2009), o grau e a eficiência do tratamento necessários serão sempre função do corpo receptor e das características do uso da água a jusante do ponto de lançamento; da capacidade de autodepuração e diluição do corpo d'água; da legislação ambiental; e das consequências dos lançamentos dos esgotos.

3.1.2. Geração de lodo em diferentes sistemas de tratamento de esgotos

De acordo com Lobato (2011), o gerenciamento do lodo é uma atividade de grande complexidade e alto custo, que se mal executada pode comprometer parcialmente os benefícios ambientais e sanitários de todo o sistema de esgotamento sanitário. O volume de lodo gerado em uma estação de tratamento de esgoto representa, aproximadamente, 1% a 2% do volume de esgoto tratado, porém o custo do tratamento e disposição final desse subproduto pode atingir 20% a 60% do custo operacional da estação (Andreoli *et al.*, 2014).

Andreoli *et al.* (2014) ainda afirmam que a produção de lodo é função do sistema de tratamento utilizado para a fase líquida em que há produção de lodo primário, composto pelos sólidos

sedimentáveis do esgoto bruto e lodo biológico ou secundário, composto pela biomassa que cresceu às custas do alimento fornecido pelo esgoto afluyente assim como o eventual lodo gerado no tratamento final. Além disso, de acordo com Campos (2000) a produção per capita diária de lodo é da ordem de 20 a 35 g_{SS}/hab.d (base seca) em processos aeróbios e de 3 a 15 g_{SS}/hab.d (base seca) nos processos anaeróbios. Assim, como evidenciado na Tabela 3.1.2, a produção de lodo em processos anaeróbios se mostra consideravelmente inferior à produção nos processos aeróbios.

Tabela 3.1.2 Produção teórica e características do lodo para diferentes sistemas de tratamento de esgoto doméstico

Origem do lodo	Produção de lodo (g _{SS} /hab.d)	Teor de sólidos (%ST)	Estabilidade	Aspecto	Desaguamento
Decantador primário	35 a 45	2 a 6	Necessita estabilização	Marrom, aparência floculenta, odor pouco ofensivo, tende a tornar-se séptico e gerar odores rapidamente	Bom
Aeração prolongada	38 a 45	0,8 a 1,2	Estabilizado		Regular
UASB	7 a 18	3 a 6	Estabilizado	Negro, aparência floculenta,	Bom
Filtro anaeróbio (após UASB)	3 a 9	0,5 a 4	Estabilizado	odor não ofensivo	Bom
Lagoas anaeróbias	13 a 45	15 a 20	Estabilizado		Bom
Lagoas facultativas	20 a 25	10 a 20	Estabilizado		Bom
Lagoas de maturação	3 a 20	10 a 20	Estabilizado		Bom
Filtro biológico de alta taxa - Lodo Secundário	20 a 30	1 a 3	Necessita estabilização	-	Bom
Lodo ativado convencional	40 a 60	0,2 a 0,4	-	-	-

Fonte: Campos (2000)

De acordo com Jordão (2015) o tratamento do lodo implica elevados custos de construção de adensadores, digestores e sistemas de secagem, como também elevados custos de operação, além do transporte e bota-fora do produto final de seu tratamento, o lodo seco, por isso o planejamento e investimento em estudos na área são fundamentais para diminuir o impacto desta problemática não só no custo do sistema, como também na utilização de recursos para o seu tratamento e disposição.

3.2. MANEJO E TRATAMENTO DO LODO GERADO EM ETE

O gerenciamento do lodo depende do sistema de tratamento utilizado, conseqüentemente das suas próprias características e também da disposição final pretendida. Previamente à etapa de estabilização, procura-se aumentar o teor de sólidos no lodo para maior eficiência do processo. Tal como apresentado por Andreoli *et al.* (2014), o adensamento é um processo físico de concentração de sólidos no lodo visando reduzir sua umidade e, em decorrência, seu volume, facilitando as etapas subsequentes do seu tratamento. Além disso, Jordão e Pessôa (2017) afirmam que o processo de adensamento também é fundamental na redução dos custos de implantação e operação das unidades de digestão e secagem de lodos.

Seguido do processo de adensamento, a estabilização visa atenuar o inconveniente de maus odores no tratamento e manuseio do lodo em que a redução dos odores é alcançada através da remoção da matéria orgânica biodegradável componente do lodo (Andreoli *et al.*, 2014). Jordão e Pessôa (2017) ainda afirmam que os principais objetivos desta etapa são a conversão parcial da matéria putrescível em líquidos, sólidos dissolvidos, subprodutos gasosos e alguma inativação de microrganismos patogênicos, bem como a redução do percentual dos sólidos secos do lodo. Na Tabela 3.2.1 podem ser visualizadas várias alternativas que podem ser utilizadas em cada etapa do gerenciamento de lodos em função da sua tipologia e destinação proposta.

Tabela 3.2.1 Etapas do gerenciamento do lodo e principais processos utilizados

Adensamento	Estabilização	Condicionamento	Desidratação	Higienização	Disposição final
Adensamento por gravidade	Digestão anaeróbia	Condicionamento químico	Leitos de secagem	Adição de cal	Recuperação de áreas degradadas
Flotação	Digestão aeróbia	Condicionamento térmico	Lagoas de lodo	Outros (radiação gama, solarização, etc)	Landfarming (disposição no solo) Uso não agrícola (fabricação de lajotas, combustíveis, etc)
Centrifuga	Tratamento térmico		Filtro prensa	Compostagem	
Filtro prensa de esteiras	Estabilização química		Filtro prensa de esteiras	Oxidação úmida	Reciclagem agrícola
			Centrífuga	Tratamento térmico	Oxidação úmida
			Filtro a vácuo Secagem térmica		Aterro sanitário

Fonte: Andreoli, Von Sperling e Fernandes (2014)

Segundo Andreoli *et al.* (2014), o lodo bruto é rico em organismos patogênicos, facilmente putrescível e rapidamente desenvolve odores ofensivos de modo que a estabilização da fração biodegradável da sua matéria orgânica visa reduzir esses fatores assim como representado na Tabela 3.2.2.

Tabela 3.2.2 Comparação entre lodo bruto e lodo digerido

Lodo bruto	Lodo digerido anaerobiamente
Matéria orgânica instável	Matéria orgânica estabilizada
Elevada fração biodegradável na matéria orgânica	Baixa proporção de fração biodegradável
Alto potencial para geração de odores	Baixo potencial para geração de odores
Elevada concentração de patógenos	Concentração de patógenos inferior ao do lodo bruto

Fonte: Andreoli *et al.* (2014)

A estabilização do lodo pode ocorrer de forma biológica, dividida em aeróbia e anaeróbia, através de microrganismos, de maneira química ao oxidar a matéria orgânica, ou através do calor sobre a fração volátil em recipientes hermeticamente fechados (Andreoli *et al.*, 2014). Ainda afirmado por Andreoli *et al.* (2014), a digestão anaeróbica mesofílica é o principal processo de estabilização de lodos utilizado no Brasil. As vantagens da digestão anaeróbia como ferramenta de estabilização de lodo podem ser observadas também na Tabela 3.2.2.

3.3. DIGESTÃO ANAERÓBIA

A digestão anaeróbia é um processo bioquímico complexo onde diversos grupos de organismos anaeróbios e facultativos assimilam e destroem simultaneamente a matéria orgânica, em ausência de oxigênio dissolvido (Jordão e Pessôa, 2017). Essa digestão representa um sistema ecológico delicadamente balanceado, envolvendo os processos metabólicos complexos que ocorrem em etapas sequenciais, mostrados na Figura 3.3.1, e que dependem da atividade de, no mínimo, três grupos fisiológicos de microrganismos: bactérias fermentativas (ou acidogênicas), bactérias sintróficas (ou acetogênicas) e microrganismos metanogênicos (Chernicharo, 2016).

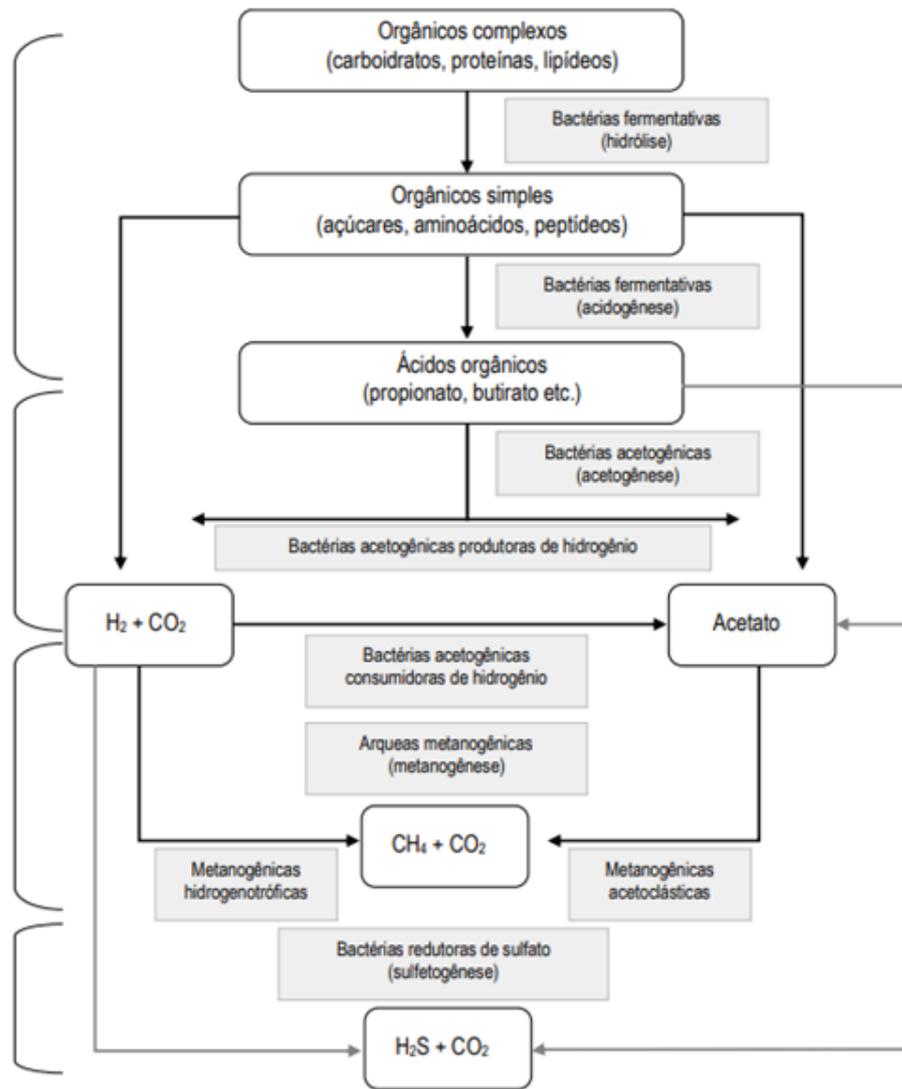


Figura 3.3.1 Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia.
Fonte: Chernicharo (2007)

Essa comunidade microbiana é dependente entre si de modo que um organismo utiliza o produto gerado pelo outro para obtenção de energia e conseqüentemente libera um subproduto que será utilizado pelos demais. De acordo com Chernicharo (2016), as bactérias acidogênicas convertem, por hidrólise e fermentação, os compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídios em compostos mais simples como ácidos orgânicos, hidrogênio e dióxido de carbono. Em posse destes subprodutos, como propionato e butirato, os microrganismos acetogênicos os convertem em compostos orgânicos intermediários como acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Ao fim do ciclo, o acetato e o hidrogênio produzidos anteriormente são utilizados pelos microrganismos metanogênicos, convertendo estes em metano e dióxido de carbono.

3.3.1. Hidrólise

Segundo Chernicharo (2016), o processo de digestão anaeróbia se dá através de uma cadeia de processos metabólicos envolvendo diversos grupos de microrganismos com características bem específicas e usualmente delicadas. Entre estes grupos os que mais se destacam são as bactérias acidogênicas, as bactérias acetogênicas e as arqueas metanogênicas.

Segundo Verma (2002), no primeiro estágio da hidrólise, ou liquefação, as bactérias fermentativas convertem a matéria orgânica insolúvel e complexa, como a celulose, em moléculas solúveis como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos. Essa matéria é hidrolisada a moléculas simples de modo que, por exemplo, a celulose é convertida em açúcares ou álcoois e proteínas em peptídeos ou aminoácidos através de enzimas como a amilase, celulase, protease e lipase.

Inicialmente, através de exoenzimas excretadas pelas bactérias acidogênicas, ocorre a hidrólise de materiais particulados complexos como proteínas, carboidratos e/ou lipídios em materiais de tamanho reduzido como aminoácidos, ácidos graxos e/ou açúcares que consequente apresentam maior facilidade de absorção pelas bactérias fermentativas ao poderem atravessar as paredes celulares destas. Nesse processo de hidrólise a degradação de lipídios em ácidos graxos é realizada pelos gêneros *Clostridium*, *Micrococcus* e *Staphylococcus*, a de gradação de proteínas à aminoácidos é realizada pelos gêneros *Bacteroides*, *Butyvirbio*, *Clostridium*, *Fusubacterium*, *Selenomonas*, *Streptococcus*, *Proteus*, *Peptococcus* e *Bacillus* enquanto a degradação de polissacarídeos em açúcares é realizada pelo *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Acetivibrio* e *Eubacterium* (Chernicharo, 2016).

3.3.2. Acidogênese

Após o processo de hidrólise ocorre a acidogênese dos produtos gerados que são metabolizados pelas bactérias fermentativas que produzem outros compostos ainda mais simples como ácidos orgânicos (principalmente acético), álcoois, cetonas, dióxido de carbono, hidrogênio e novas bactérias oriundas do ciclo de vida das mesmas. Entre os gêneros atuantes mais comuns nesse processo estão: *Clostridium*, *Bacteroides*, *Ruminococcus*, *Butyribacterium*, *Propionibacterium*, *Eubacterium*, *Lactobacillus*, *Streptococcus*, *Pseudomonas*, *Desulfobacter*, *Micrococcus*, *Bacillus* e *Escherichia* (Chernicharo, 2016).

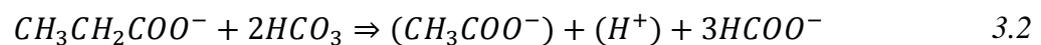
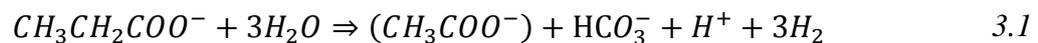
Além disso, entre os produtos metabolizados pelas bactérias acidogênicas, apenas o hidrogênio e o acetato podem ser utilizados diretamente pelas arqueas metanogênicas. Entretanto, pelo

menos 50% da matéria orgânica carbonácea biodegradável é convertida em propionato e butirato, que são decompostos em acetato e hidrogênio pela ação das bactérias acetogênicas (Chernicharo, 1997). Além disso, cerca de 70% da DQO presente se converte em ácido acético (Van Haandel e Lettinga, 1994).

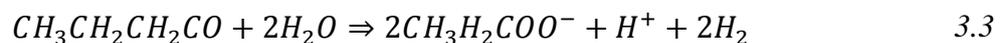
3.3.3. Acetogênese

A acetogênese é o processo realizado por bactérias acetogênicas que oxidam compostos intermediários como propionato e butirato em acetatos, hidrogênio e dióxido de carbono que são os substratos apropriados para as arqueas metanogênicas que dão continuidade no processo. Contudo, durante a formação de acetato ocorre demasiada produção de hidrogênio molecular (H₂) que atua na acidificação do meio ao reduzir o pH. Além disso, a formação de acetato, que se dá através da oxidação do propionato e do butirato, sofre influência inibitória quando há baixas concentrações de hidrogênio dissolvido e do próprio acetato.

Propionato



Butirato



Desse modo, as reações acetogênicas necessitam de que hajam baixas concentrações dos seus produtos, hidrogênio e acetato, que é propiciada pelos microrganismos metanogênicos que utilizam estas como substrato.

3.3.4. Metanogênese

Concomitantemente à acetogênese, ocorre a metanogênese. Por ação das arqueas metanogênicas cujas espécies são divididas em dois principais grupos: as acetoclásticas que geram metano e gás carbônico através do acetato e as hidrogenotróficas que produzem metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono. Segundo Van Haandel e Lettinga (1994) a metanogênese, geralmente, é a etapa que limita a velocidade da digestão como um todo, entretanto, para temperaturas inferiores a 20°C, a hidrólise pode se tornar limitante. No processo de digestão anaeróbia de lodo proveniente de tratamento primário, de acordo com Miron *et al.* (2000), a hidrólise pode ser considerada a etapa limitante para uma temperatura de 25°C.

Outro fator referente a limitação do sistema é a capacidade de degradação realizada pelas bactérias acetogênicas e pelas arqueas metanogênicas que em quantidades suficientes consomem os ácidos intermediários na medida em que estes são produzidos. Contudo, em caso de condições desfavoráveis ou desequilíbrio dessas populações, segundo Chernicharo (2016), estas não serão capazes de consumir os ácidos na velocidade em que eles são produzidos pelas bactérias acidogênicas e assim a alcalinidade do sistema seria consumida rapidamente e o pH iria cair, caracterizando um reator azedo.

Os organismos metanogênicos ainda são divididos em dois grupos, segundo Verma (2002), em função do substrato por eles consumidos: as metanogênicas acetoclásticas que utilizam o acetato e as hidrogenotróficas que são consumidoras de hidrogênio e dióxido de carbono. No processo de oxidação pelas acetoclásticas (Equação 3.4) é gerado metano e dióxido de carbono enquanto se consome o acetato ao passo que no processo das hidrogenotróficas (Equação 3.5) se produz metano e água.



3.3.5. Sulfetogênese

Outro processo que pode ser presente nesta cadeia de transformações é a sulfetogênese em que o sulfato e outros compostos a base de enxofre são utilizados como aceptores de elétrons durante a oxidação dos compostos orgânicos. Neste processo, sulfato, sulfito e outros compostos são reduzidos a sulfeto, através da ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas denominadas bactérias redutoras de sulfato (Chernicharo, 2007).

Contudo, no âmbito da produção de metano as bactérias sulforredutoras representam uma complicação no processo pois estas, ao utilizarem substratos como o acetato e o hidrogênio, tal como as arqueas metanogênicas, passam a simbolizar uma concorrência para estas. A determinação da existência ou grau dessa competição, depende basicamente da concentração de sulfato no meio. Uma vez que o sulfato está ausente do meio, o processo de digestão anaeróbia ocorre tal como mostrado na Figura 3.3.1, porém quando há presença de sulfato no meio, os compostos intermediários que seriam utilizados como substrato pelas bactérias fermentativas, acetogênicas e com as arqueas metanogênicas passam a ser utilizados pelas bactérias sulforredutoras de modo a alterar as rotas metabólicas do reator.

De acordo com Chernicharo (2016) ao analisar a eficiência e complexidade das bactérias sulforredutoras com a associação realizada entre as demais, é notável a maior eficiência na remoção de DQO da fase líquida através da sulfetogênese. Porém, a DQO removida pela sulfetogênese resulta na produção do gás sulfídrico que possui potencial de corrosão prejudicial a canalização, toxicidade e odores desagradáveis liberados ao meio, além de não gerar metano, perdendo-se o potencial energético do biogás.

3.3.6. Características e produção de metano

Segundo Chernicharo (2007) a digestão anaeróbia de lodos de esgotos é bem mais atrativa para os países de clima tropical e subtropical em função das suas temperaturas que coincidem e/ou se aproximam da faixa mesofílica, entre 20°C e 45°C, que é onde os microrganismos digestores atuam de forma mais significativa e, dessa forma, não é necessário o custo adicional de operação com aquecimento do reator. Além disso, segundo Nuvolari (2011) o controle da temperatura é tão importante, pois influencia a velocidade dos processos anaeróbios em que para temperaturas baixas estes são mais lentos e começam a ter um rendimento inferior, mas a partir de temperaturas na faixa de 25 a 35°C, o que é bastante comum em grande parte do território brasileiro, produz resultados consideráveis.

Segundo Bischofsberger *et al.* (2005), as bactérias fermentativas chegam à sua taxa máxima de crescimento de 100%, nas condições termofílicas com temperatura entre 50°C e 55°C e nas condições mesofílica chegam a sua taxa ótima de crescimento de 65% com temperaturas entre 30°C e 40 °C. Chernicharo (1997), aborda a influência da temperatura na atividade das arqueias metanogênicas que chegam à sua taxa de crescimento de 100% na temperatura de 60°C, enquanto em condições mesofílicas aproximam-se da taxa de crescimento de 50% nas temperaturas de 32°C a 36°C de modo ainda que temperaturas inferiores a 28°C ou superiores a 40°C, considerando a faixa mesofílica, geram uma eficiência de 30% pelos reatores. McCarty (1968) traz ainda a relação entre a temperatura de operação e o tempo de residência dos sólidos (Tabela 3.3.1), indicando o tempo desejável que o lodo deve permanecer no digestor anaeróbio.

Tabela 3.3.1 TRS mínimos e desejáveis para o bom funcionamento dos digestores anaeróbios de mistura completa.

Temperatura de operação (°C)	TRS Mínimo (dias)	TRS desejável (dias)
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

Fonte: adaptado de McCarty (1964)

Ao comparar o tratamento de efluentes pelos sistemas anaeróbio e aeróbio, com auxílio da Figura 3.3.2 que apresenta as rotas de conversão da matéria orgânica de esgoto, é possível verificar a produção dos subprodutos de cada processo de modo que, segundo Noyola *et al.* (2006), o biogás de reatores que tratam esgoto doméstico apresenta uma composição de metano (70 a 80%), nitrogênio (10 a 25%) devido a parcela de N₂ dissolvida no esgoto doméstico e dióxido de carbono (5 a 10%).

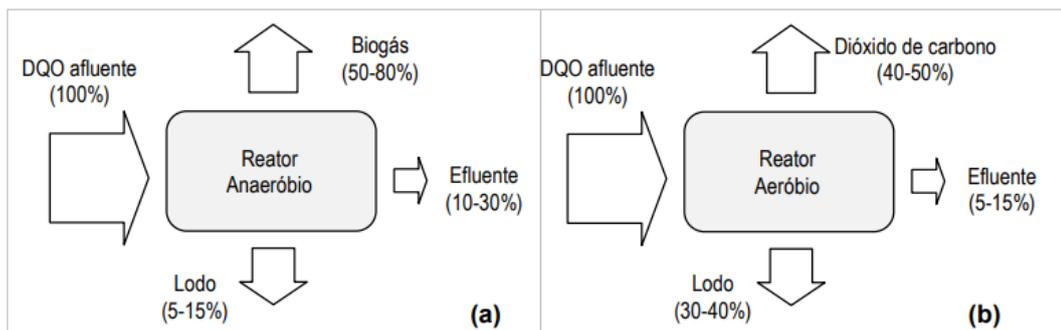


Figura 3.3.2 Rotas de conversão de matéria orgânica de esgoto: a) sistema anaeróbico e b) sistema aeróbico.

Fonte: Chernicharo (2007)

De modo semelhante, com relação a digestão do lodo, o gás produzido apresenta composição aproximada de metano entre 60% a 75%; gás carbônico entre 25% a 35%; óxido de carbono entre 2% a 4%; oxigênio, nitrogênio, hidrocarbonetos e gás sulfídrico em quantidades menores (Metcalf & Eddy, 2003; Vesilind, 2003). Além disso, o gás gerado na digestão anaeróbica é obtido na produção aproximada de 15 a 20 L/hab.dia, para lodo primário e de 25 a 30 L/hab.dia para lodo misto (primário com secundário). Referido a outra base, o gás produzido no digestor oriundo da digestão do lodo misto, segundo Metcalf & Eddy (2003), é da ordem de 0,75 a 1,12 m³/kg de SV digerido, variando de acordo com as características com que se processa a digestão, principalmente a temperatura e apresenta eficiência de remoção de SV na digestão entre 40% e 55% (Silva, 1982; Von Sperling; Gonçalves, 2001).

Além disso o rendimento ideal do biogás ocorre quando existe uma alta carga biológica no reator, em que é recomendável uma relação de SV/ST maior que 70%. Metcalf & Eddy (2003) apresenta como usual a relação SV/ST de 70% para lodo não tratado e de 50% para lodo digerido. A composição desse gás gerado varia também com a composição do efluente e do lodo, assim como com as condições da sua digestão tal como pode ser visto na Tabela 3.3.2.

Tabela 3.3.2 Composição típica de biogás gerado em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, aterros sanitários na fase metanogênica e digestores de lodo

Parâmetro	Unidade	Composição volumétrica típica		
		Biogás de reatores anaeróbios	Biogás de aterro sanitário	Digestores de lodo
Metano – CH ₄	%	60 a 85	45 a 50	60 a 70
Gás carbônico – CO ₂	%	5 a 15	30 a 45	20 a 40
Monóxido de carbono – CO	%	0 a 0,3	0 a 0,2	-
Nitrogênio – N ₂	%	10 a 25*	0 a 15	< 2
Hidrogênio – H ₂	%	0 a 3	Traços a > 1	-
Sulfeto de hidrogênio – H ₂ S	ppmv	1000 a 2000	10 a 200	até 1000
Oxigênio – O ₂	%	traços	0,8	-

Fonte: Lobato (2011)

O metano, principal constituinte do biogás, é um gás inodoro, incolor e mais leve que o ar (densidade igual a 0,55 em relação ao ar). Quando na forma gasosa, é inflamável apenas na faixa de concentração entre 5 e 12% no ar (Constant *et al.*, 1989). As características referentes ao gás natural e o biogás, cujas frações de metano são diferentes, são mostradas na Tabela 3.3.3.

Tabela 3.3.3 Características do gás natural e do biogás

Parâmetro	Unidade	Gás natural	Biogás (60% CH ₄)
Poder calorífico inferior (PCI)*	MJ.m ⁻³	31,8	21,5
	kcal.m ⁻³	7600	5.134
Densidade	kg.m ⁻³	0,82	1,21
Índice de Wobbe (baixo) ⁹	MJ.m ⁻³	39,9	19,5
Velocidade máxima de chama	m.s ⁻¹	0,39	0,25
Requisito teórico de ar	m ³ ar. m ⁻³ gás	9,53	5,71
Concentração máxima de CO ₂ após combustão	% (v)	11,9	17,8

Fonte: Adaptado Wellinger e Lindberg (2000, *apud* Lobato, 2011)

Lobato (2011) ainda afirma que o potencial energético do biogás é relacionado com a quantidade de metano em sua composição, fator este determinante para o seu poder calorífico. O poder calorífico do metano é de 35,9MJ.Nm⁻³ e o do biogás com 60% de metano é de 21,5MJ.Nm⁻³, correspondendo a 67,6% do poder calorífico do gás natural tal como exposto na Tabela 3.3.4.

Tabela 3.3.4 Poder calorífico inferior do biogás e de outros combustíveis e equivalência com o metano

Combustível	MJ.kg ⁻¹	MJ.Nm ⁻³	kWh.Nm ⁻³	Equivalência ao metano
Gases				
Metano	50	35,9	10	1
Biometano	48,25	34,64	9,65	0,965
Gás Natural	45,1	31,8	8,8	0,9
Biogás típico (60%CH ₄)	30	21,5	6	0,6
Butano	45,7	118,5	32,9	3,3
Propano	46,4	90,9	25,2	2,5
Líquidos				
Metanol	19,9	15.900	4.415,40	442,9
Etanol	26,9	21.400	5.942,80	596,1
Gasolina	45	33.300	9.247,40	927,6
Diesel	42,1	34.500	9.580,70	961

Fonte: Adaptado de CONSTANT *et al.* (1989) *apud* NOYOLA *et al.* (2006)

Além disso, a digestão anaeróbia, como um todo, é um processo delicado e que necessita de condições específicas e bem delimitadas para ocorrer com eficiência adequada, com baixo índice de limitações no seu processo. Fatores como a acumulação de ácidos orgânicos, como o acetato, em função de limitações cinética e de não observância das condições ótimas ou acumulação de propionato e butirato, em função das limitações termodinâmicas do processo, são uma das principais causas de instabilidade do sistema (Aquino e Chernicharo, 2005). Desse modo, um efluente já rico em ácidos orgânicos representaria uma condição de instabilidade do efluente e, portanto, não seria causa do sistema de tratamento em si. Com base nisso, segundo Chernicharo (2016), evidencia-se a necessidade de entendimento dos processos metabólicos da digestão para facilitar a identificação de causas de possíveis distúrbios e desequilíbrios em reatores anaeróbios.

3.4. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO METANO

Segundo Metcalf & Eddy (2003), diante do aumento dos custos e da demanda de energia para o tratamento de efluentes visando ao atendimento a padrões de qualidade do efluente final cada vez mais exigentes, destaca-se a importância da preocupação vigente com a concepção e operacionalidade, com o intuito de maximizar a eficiência energética e reduzir os gastos no tratamento. Além disso, Metcalf & Eddy (2003) também afirmam que a digestão anaeróbia do lodo de esgoto doméstico pode, em muitos casos, produzir biogás suficiente para atender à demanda de energia necessária para a operação da planta, a depender do tipo de tratamento.

Segundo Cassini (2003), o aproveitamento do biogás se dá de diferentes formas: através da queima direta por meio de aquecedores, esquentadores, fogões ou caldeiras e através da conversão de biogás em eletricidade. Além disso são possíveis outros usos, segundo Lobato (2011), como a cogeração de eletricidade e calor ou o uso como combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural ou o aproveitamento como combustível veicular. Além disso, o biogás purificado pode ser utilizado como um substituto para o gás natural e, portanto, reduzir a quantidade de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, uma vez que o carbono produzido pela combustão do biogás é considerado biogênico e, portanto, não contribui para o aquecimento global (MORIN *et al.*, 2010).

De acordo com Costa (2006), alguns fatores podem interferir PCI do biogás, como: a temperatura ambiente se estiver fora da faixa ideal de 32 a 37°C; a qualidade do esgoto sanitário abrangendo a biodegradabilidade dos compostos orgânicos, a presença de nitrogênio, enxofre, fósforo e o pH entre 6,0 e 8,0; a quantidade de vapor de água e CO₂ de modo que quanto maior a parcela de vapor de água e CO₂, menor o poder calorífico. Segundo Zilotti (2012), o PCI do metano pode passar de 465 para 11.661 kcal.kg⁻¹ quando a concentração de CO₂ é reduzida de 90% para 10% no biogás.

3.4.1. Mecanismos de aproveitamento energético

Lobato (2011) apresenta diferentes maneiras para utilizar esse potencial energético como o uso direto como combustível em caldeiras, fornos e estufas em substituição a outros tipos de combustíveis; a geração de eletricidade para uso local ou venda para a rede da concessionária de energia; a cogeração de eletricidade e calor; o combustível alternativo visando à injeção na linha de gás natural ou o aproveitamento como combustível veicular. Além disso, o biogás gerado ainda apresenta potencial para auxiliar na higienização e secagem do lodo. São mostradas na Tabela 3.4.1 algumas formas de aproveitamento e possíveis métodos utilizados por elas.

Tabela 3.4.1 Classificação de algumas alternativas para gerenciamento do biogás

Processo	Combustão direta, sem recuperação energética	combustão direta, com geração de calor	Geração combinada ou simples de eletricidade e calor
	Queimadores abertos	Caldeiras	Motores de combustão interna
Tecnologias	Queimadores fechados	Secadores térmicos	Turbinas Microturbinas

Fonte: Adaptado de Lobato (2011)

A combustão direta sem recuperação de energia é realizada através de simples dispositivos que queimam os gases por medida de segurança, uma vez que estes são inflamáveis e sua

acumulação gera risco de explosões além de reduzir o nível dos odores. Quanto aos tipos de queimadores, que podem ser visualizados na Figura 3.4.1, os abertos têm apenas sua chama protegida do vento e em função do baixo controle dos gases a queima normalmente é incompleta e libera produtos indesejados. Por outro lado, o queimador fechado trabalha sobre condições controladas, garantindo a conversão quase completa do biogás (Lobato, 2011).

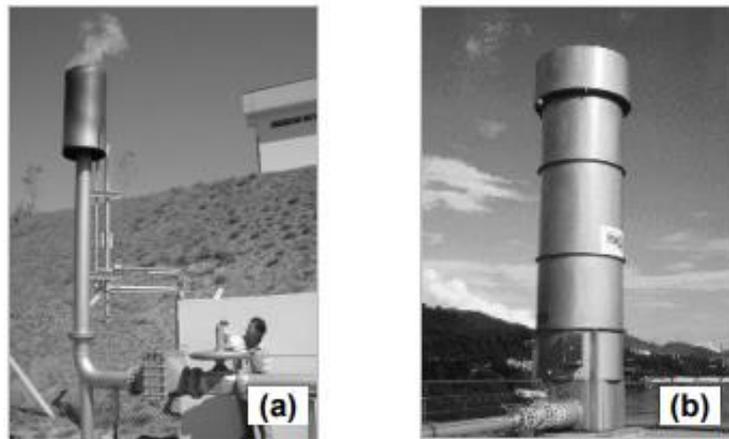


Figura 3.4.1 Combustão direta sem recuperação de energia: (a) queimador aberto; (b) queimador fechado.

Fonte: Lobato (2011)

A combustão direta com recuperação energética, segundo Lobato (2011), é o método mais simples e mais eficiente de recuperar energia do biogás, uma vez que mais de 80% do poder calorífico do metano pode ser recuperado como energia útil. Um dos seus mecanismos de gerenciamento são as caldeiras, mostradas na Figura 3.4.2, em que o gás é queimado, transferindo energia térmica para um fluido que é vaporizado e então utilizado, normalmente para realizar trabalhos mecânicos ao girar as pás do rotor de um gerador elétrico e assim realizar a conversão energética. A outra forma de utilização da combustão direta seria por meio dos secadores térmicos que, segundo Lobato (2011), através do calor possibilitam uma substancial redução no volume do lodo assim como a inativação dos patógenos, além da própria utilização do lodo seco como combustível.

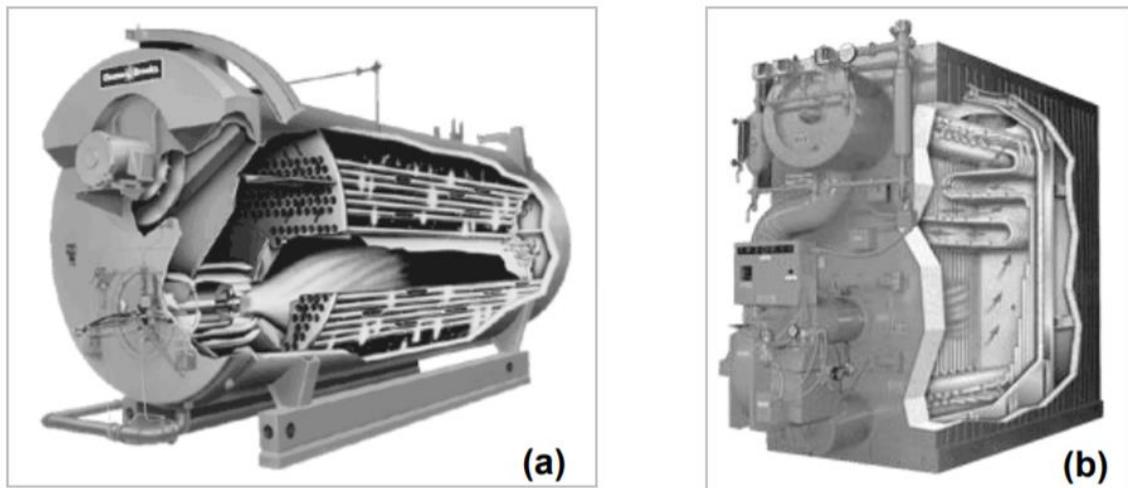


Figura 3.4.2 Exemplos de caldeiras que podem ser adaptadas para utilizar biogás como combustível: (a) caldeira de tubos de fogo; (b) Caldeira de tubos de água.

Fonte: Lobato (2011)

A geração combinada de eletricidade e calor ou cogeração consiste no aproveitamento local do calor residual originado nos processos termodinâmicos de geração de energia elétrica, que de outra forma seria desperdiçado. O aproveitamento pode se dar sob a forma de vapor, água quente e/ou fria, para uma aplicação secundária (Lobato, 2011). Contudo, o aproveitamento energético nunca atinge 100% em função das perdas de calor para o meio ambiente, fato esse que pode ser reduzido ao considerar a utilização térmica do mesmo em conjunto com a utilização elétrica. Entre as principais tecnologias de aproveitamento energético da cogeração existem os motores de combustão interna, mostrados na Figura 3.4.3, cuja faixa energética viável está entre 800kW e 5MW, que de modo semelhante as caldeiras, utilizam a expansão de fluidos aquecidos para gerar movimento e conseqüentemente movimentar pistões que realizam a conversão energética, contudo, liberam calor através dos gases exauridos, dos fluidos de esfriamento do motor e dos lubrificantes além do ar de sobrealimentação.



Figura 3.4.3 Grupo motor-gerador de combustão interna.
Fonte: CHP Brasil

Outra tecnologia muito utilizada são as turbinas a gás (Figura 3.4.4) cuja faixa energética viável está entre 500kW e 250MW, com maior viabilidade em projetos de recuperação acima de 3000kW. Essas turbinas atuam de forma semelhante ao motor de combustão interna, mas apresentam maior resistência a corrosão, porte compacto, valor agregado consideravelmente mais alto além de exigirem um gás de qualidade superior à tecnologia anterior (USEPA,2003). Além disso, essa tecnologia exige pressões mais elevadas, fazendo necessário a utilização de compressores que conseqüentemente elevam seu custo de implantação e manutenção (Lobato, 2011).

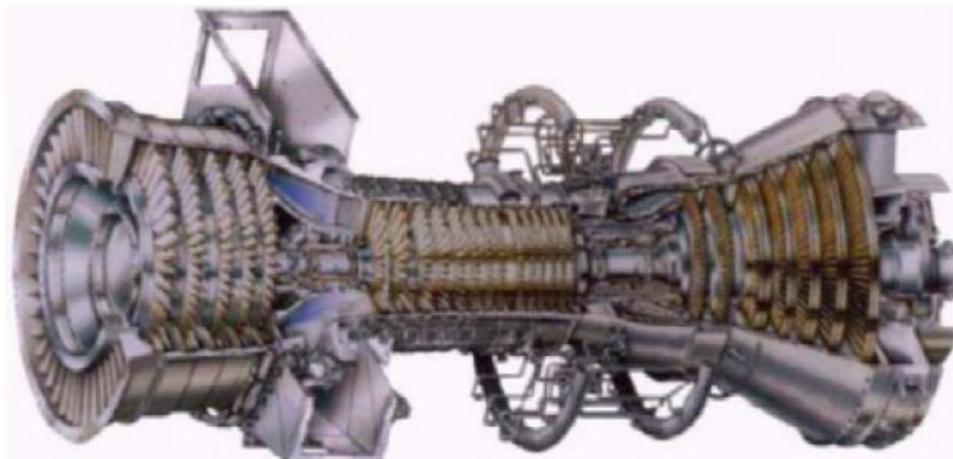


Figura 3.4.4 Turbina a gás
Fonte: Sampaio (2012)

Por fim, outra tecnologia utilizada, mas com porte bem inferior, são as microturbinas, vistas na Figura 3.4.5, com faixa energética viável entre 30kW e 1000kW e com elevadas velocidades de rotação (Pecora, 2006). O pequeno porte desses sistemas agrega flexibilidade operacional ao permitir a geração de energia em pequenas localidades ou demandas além de apresentar uma considerável redução nas emissões com relação às demais tecnologias. Contudo, em função da pequena escala de produção, o seu custo ainda é elevado (Lobato, 2011).

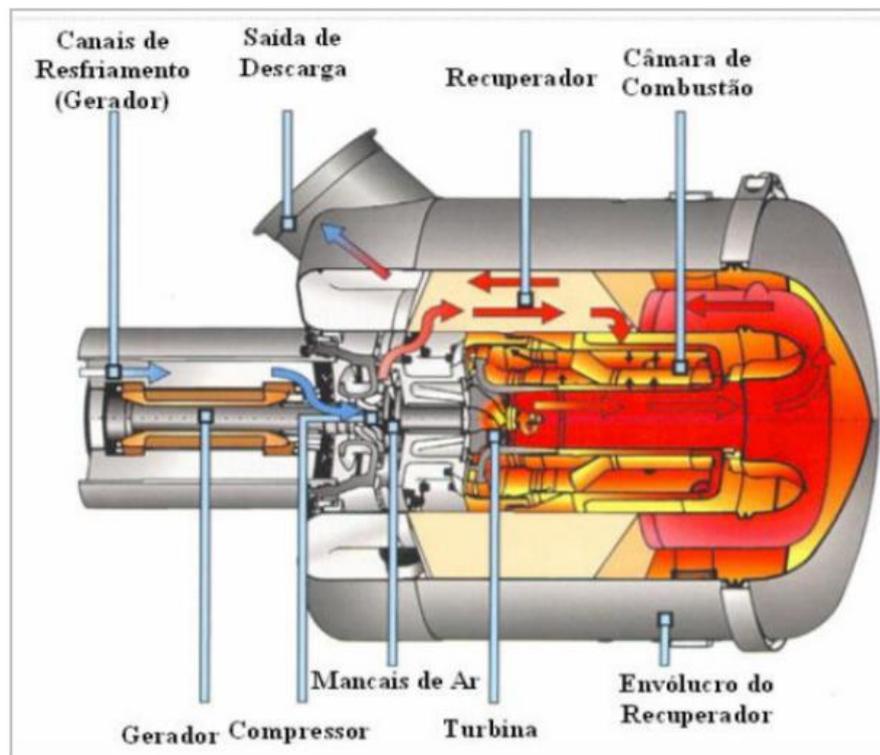


Figura 3.4.5 Interior da microturbina Capstone.

Fonte: Costa (2006)

Ao observar a Tabela 3.4.2, verifica-se que todas as tecnologias apresentam eficiências na geração de eletricidade na faixa de 20% a 30% ao passo que com a recuperação e utilização do calor liberado as eficiências globais atingem a ordem de 60 a 75% de aproveitamento energético.

Tabela 3.4.2 Comparação entre as principais alternativas de cogeração de eletricidade e calor

Parâmetros	Principais Tecnologias		
	Motor de combustão interna	Turbinas	Microturbinas
Faixa de potência disponível no mercado (kW)	5 a 5.000	500 a 250.000	30 a 1.000
Faixa usual de aplicação (kW)	800 a 3000	> 3000	< 1000
Custo de implantação (US\$/kW)	900 a 1.000	1.000 a 1.800	4.000 a 5.000
Custos de O&M* (US\$/kWh)	0,009 a 0,010	0,006 a 0,010	0,15 a 0,20
Taxa de geração de eletricidade e calor (kWh consumido por kWh gerado)	2,8 a 3,0	3,7 a 4,6	4,1 a 4,7
Eficiência elétrica (%)	33 a 36	22 a 27	22 a 33
Consumo de combustível (kWh/h por kW instalado)	2,8 a 3,0	3,7 a 4,6	3,3 a 7,5
Pressão de alimentação do gás (atm)	< 0,2 a 3,0	6,5 a 11,0	3,7 a 5,8
Produção de gás de exaustão (kg/h)	6 a 7	15 a 20	23 a 37
Temperatura do gás de exaustão (°C)	360 a 470	510	280 a 310
Recuperação total de calor (kWh por kW instalado)	1,10 a 1,28	1,56 a 2,08	3,2 a 3,6
Eficiência total de geração de eletricidade e calor (%)	75 a 76	68 a 69	60 a 73
Eficiência complementar de calor (%)	40 a 42	42 a 46	38 a 40
Emissões de NOx** (ppm)	250 a 3.000	35 a 50	< 9

(*) Excluindo custos de combustível.

(**) Ao comparar as emissões de NOx é preciso levar em consideração o produto das concentrações dessas emissões pela vazão dos gases de exaustão.

Fonte: Adaptado de USEPA (2002; 2003a; 2003b); CENBIO (2005); CHAMBERS e POTTER (2000) apud Lobato, 2011.

Segundo Lobato (2011) e a Tabela 3.4.2, as alternativas de cogeração de eletricidade e calor apresentadas têm a sua utilização recomendada com base na potência instalada. As microturbinas são usualmente destinadas a faixas de potências baixas (30 a 1.000 kW), os motores de combustão a faixas intermediárias (800 a 3.000 kW) e as turbinas para faixas elevadas (acima de 3.000 kW). Contudo, ao verificar a relação de custo-eficiência de conversão elétrica (33 a 36%) observa-se o motor de combustão como a tecnologia mais adequada e essa condição se repete também quando observado a eficiência total da cogeração (75 a 76%).

3.4.2. Aproveitamento da energia térmica pela secagem do lodo

Entre os processos de aproveitamento da energia térmica encontra-se o procedimento de secagem térmica que consiste na remoção de substâncias voláteis (umidade) de um material sólido ou líquido, devido à existência de diferentes gradientes de umidade e de temperatura entre o meio do qual a umidade é removida e o meio para o qual é transferida (MUJUMDAR, 2006).

A secagem térmica do lodo promove a redução da umidade através da evaporação da água e a destruição dos organismos patogênicos, sendo removida apenas a água e mantidos praticamente inalterados os sólidos totais. A reservação da matéria orgânica, associada à eliminação dos organismos patogênicos, constitui-se em um aspecto de fundamental importância quando o lodo (biossólido) vai ser utilizado na agricultura (Lobato, 2011). Lobato (2011) ainda afirma que o teor de sólidos possível de ser alcançado pela secagem térmica é de até 90%, dependendo da tecnologia.

Segundo Andreoli *et al.* (2001), entre os principais benefícios gerados pela secagem térmica do lodo estão a redução do seu volume e conseqüentemente a redução dos custos de transporte e disposição final; a estabilização do lodo que facilita os processos de estocagem, manuseio e transporte; a higienização do lodo ao reduzir consideravelmente a presença de patógenos e a preservação das propriedades agrícolas do lodo.

Segundo Perry & Green (1997) a secagem térmica apresenta como condições a ocorrência simultânea dos processos de transferência de calor do sistema para o sistema para evaporação da umidade e a transferência de massa dos sólidos para o ambiente.

Existem, no mercado, vários equipamentos disponíveis para secagem térmica de lodo de ETE, entre eles os secadores diretos e indiretos Figura 3.4.6. Segundo David (2002) nos diretos o ar quente entra em contato direto com o lodo e a transferência de calor se dá por convecção ao passo que nos indiretos, a transferência de calor ocorre por meio do contato do lodo com superfícies aquecidas por: ar quente, vapor ou óleo térmico; e a troca de calor é realizada por condução.



Figura 3.4.6 Esquema da transferência de calor de (a) secadores diretos e (b)secadores indiretos
Fonte: Lobato (2011)

Esses processos responsáveis por essa transferência de calor, realizados pelos secadores térmicos diretos e indiretos e suas principais características são mostradas na Tabela 3.4.3.

Tabela 3.4.3 Características dos secadores diretos e indiretos

Secadores diretos	Secadores indiretos
Contato direto dos gases quentes com os sólidos, para aquecê-los e remover a água neles presente.	O calor é transferido ao material úmido mediante a condução numa parede metálica.
As temperaturas de secagem podem atingir 750 °C.	As temperaturas das superfícies podem ultrapassar 540 °C, no caso dos secadores aquecidos pelos produtos de combustão.
Nas temperaturas do gás abaixo do ponto de ebulição, o teor de vapor no gás influencia a velocidade de secagem e o teor final de umidade no sólido. Com as temperaturas do gás acima do ponto de ebulição, o teor de vapor do gás tem um pequeno efeito retardador sobre a velocidade de secagem e o teor final de umidade.	São convenientes para secar sob pressão reduzida e em atmosferas inertes, com o objetivo de permitir a recuperação de solventes e impedir a ocorrência de misturas explosivas ou a oxidação de materiais que se decompõem com facilidade.
Quanto mais baixo for o teor final de umidade, maior será o consumo de combustível por m ³ evaporado.	A recuperação de poeira e de material pulverulento pode ser efetuada muito mais satisfatoriamente.
A eficiência aumenta com o aumento da temperatura do gás afluyente.	O fato de não ocorrer o contato direto do meio de secagem e o lodo, constitui uma vantagem quanto à geração de gases e odores.
Devido à necessidade de grandes volumes de gás para fornecer todo o calor, o equipamento de coleta de poeira pode ser muito grande e caro quando se operam sólidos em pequenas partículas.	

Fonte: Perry & Green (1997)

Segundo Park *et al.* (2007), é indicada a operação em batelada para uma taxa de geração de material a ser seco entre 20 a 50 kg/h. Na faixa de 50 a 1.000 kg/h podem ser adotados conjuntamente os modos de operação em batelada e contínua, já quando a taxa for superior a 1.000 kg/h, deve-se optar por secadores contínuos.

Desse modo, para a secagem de lodo, o principal parâmetro a ser considerado, em termos energéticos, é a energia necessária para evaporação da água no lodo. Andreoli (2007), apresenta esse valor como 2.744kJ, ou 0,76 kWh para evaporação de 1kg de água presente no lodo.

3.4.3. Purificação do biogás após sua geração

A utilização do biogás como fonte energética elétrica, segundo Deublein e Steinhauser (2008), apenas se torna viável quando a matéria-prima é livre de qualquer material corrosivo pois, segundo Zanette (2009), existem três motivos principais para o tratamento do biogás: atender as especificações necessárias para cada aplicação (geradores, caldeiras, veículos), aumentar o poder calorífico do gás e padronizar o gás produzido. Isso é necessário para aumentar a

eficiência do gás e seu sistema de aproveitamento com a melhora do seu poder calorífico. Além disso, segundo Elfattah *et al.* (2016), devido ao potencial de corrosão que boa parte do biogás oriundo de aterros sanitários ou de ETEs possuem por causa das concentrações de ácido sulfídrico entre 1.000 a 2.000 ppm em sua composição, aumenta a probabilidade de ocorrência de corrosão em tubulações, caldeiras e turbinas, de modo a reduzir a vida útil dos equipamentos que compõem a planta.

Os métodos de remoção das impurezas presentes no biogás são classificados em duas categorias: remoção física, que engloba um processo de absorção controlada pelas condições de pressão e temperatura, às quais o sistema é submetido; e remoção química, que representa o processo de absorção dependente de reações de neutralização ácido-base (Loureiro e Kartel, 2006). Segundo Elfattah *et al.* (2016), o processo de purificação do biogás pode favorecer a redução combinada de compostos indesejados como é o caso da remoção conjunta de parte do dióxido de carbono e do ácido sulfídrico durante a etapa de absorção física realizada através do uso de uma solução composta por dietanolamina (DEA) e água. Na Tabela 3.4.4 podem ser vistas algumas diferentes utilizações e suas necessidade de purificação em função da utilização do biogás.

Tabela 3.4.4 Necessidade de remoção de compostos gasosos de acordo com a utilização do biogás

Aplicação	H ₂ S	CO ₂	H ₂ O
Caldeiras	<1000 ppm	Não	Não
Fogões	Sim	Não	Não
Co-geração	<1000 ppm	Não	Condensação do vapor
Combustível veicular	Sim	Recomendável	Sim
Rede de gás natural	Sim	Sim	Sim

Fonte: Zanette (2009); IEA (2005)

A eficiência do processo de purificação, segundo Pecora (2006), se comprova pelo decréscimo significativo das concentrações do sulfeto de hidrogênio, gás carbônico e água, como pode ser visto na Tabela 3.4.5, onde são mostradas as composições típicas do biogás gerado e após a sua purificação. A purificação é fundamental pois segundo Lima (2005) e de acordo com a Figura 3.4.7, o poder calorífico do biogás está diretamente relacionado com a concentração de metano na sua composição.

Com relação às principais impurezas presentes no biogás e as suas influências no seu PCI e no sistema como um todo, tem-se como uma das principais a umidade que, segundo Coelho *et al.* (2004) é capaz de comprometer o bom funcionamento de partes internas de microturbinas, além

de diluir o metano dentro da composição do biogás, reduzindo seu PCI. O sulfeto de hidrogênio em determinadas concentrações através da corrosão também pode comprometer o bom funcionamento de peças das turbinas. Além desses elementos, outros gases como hidrogênio e nitrogênio também atuam na diluição do metano, contudo o gás que usualmente tem a maior parcela na diluição do metano é o dióxido de carbono, ao compor entre 20% a 40% do volume do biogás, assim como mostra a Tabela 3.4.5.

Tabela 3.4.5 Composição típica do biogás produzido e purificado.

Compostos Químicos	% de volume do biogás gerado	% de volume do biogás purificado
Metano (CH ₄)	50 a 80	80,8
Dióxido de Carbono (CO ₂)	20 a 40	4,07
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	1 a 2	0,06
Água (H ₂ O)	1 a 2	0,98
Hidrogênio (H ₂)	1 a 2	0,00
Nitrogênio (N ₂)	0,5 a 2,5	13,2
Oxigênio (O ₂)	0,1 a 1	0,89
Total	100	100

Fonte: Adaptado PECORA (2006)

Zanette (2009) também considera importante a remoção de CO₂ se esse precisar ser tratado para atingir os padrões de gás natural ou para uso em veículos, uma vez que ele dilui o conteúdo energético do biogás, mas não possui impacto ambiental significativo.

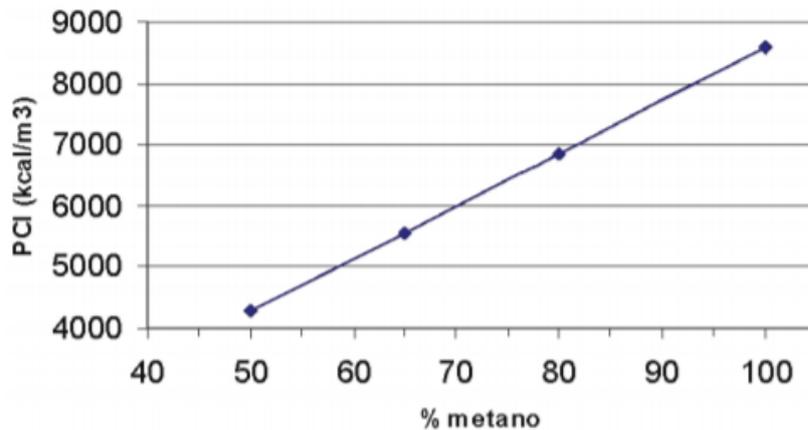


Figura 3.4.7 Poder calorífico inferior em função do percentual de metano.

Fonte: Lima (2005)

Entre as tecnologias atualmente disponíveis no mercado para remoção de gás carbônico, utilizando métodos físicos e químicos são mostradas na Tabela 3.4.6 em que algumas ainda são capazes de realizar outros tipos de purificação.

Tabela 3.4.6 Características dos diferentes processos para a eliminação de CO₂

PARÂMETROS DE PROCESSO	PSA	DWW	ABSORÇÃO QUÍMICA	ABSORÇÃO FÍSICA	MEMBRANAS
Capacidade típica de plantas [Nm ³ /h biometano]	300 - 800	200 – 1.200	400 – 2.000	300 – 1.500	50 - 500
Demanda energia elétrica [kWh/Nm ³ biometano]	0,46	0,46	0,27	0,49 - 0,67	0,25 - 0,43
Demanda energia térmica [kWh/Nm ³]	-	-	0,65	0,3	-
Temperatura [°C]	-	-	110 - 160	55 - 80	-
Pressão [bar]	4 - 7	5 - 10	0,1 - 4	4 - 7	5 - 10
Perda de metano [%]	1 - 5	0,5 - 2	0,1	1 - 4	2 - 8
Tratamento de gás de escape	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
Dessulfurização	Sim	Dependendo do processo	Sim	Sim	Sim
Demanda água	Não	Sim	Sim	Não	Não
Demanda química	Não	Não	Sim	Sim	Não

Fonte: Technisch Universitat Wien (2012)

Todavia, a necessidade de purificação do biogás é dependente do tipo de uso pretendido uma vez que a purificação buscará a equivalência energética e de qualidade de um determinado combustível que será substituído por ele. Desse modo, apresenta-se na Tabela 3.4.7 os níveis de tratamento requerido para diferentes tipos de uso do biogás.

Tabela 3.4.7 Níveis de tratamento requerido para diferentes tipos de uso do biogás

Tipo de uso do biogás	Nível de tratamento			Outros requisitos
	Remoção de água	Remoção de H ₂ S	Remoção de CO ₂	
Combustão direta (queimadores abertos e fechados)	Tratamento parcial	Nenhum a tratamento parcial (H ₂ S < ppmv para queimadores fechados**)	Nenhum tratamento	Controle de espuma Compressão* Temperatura ≥ 900°C, Tempo de residência ≥ 0,3s** Hidrocarbonetos ≤ 150mg/m ³ **
Uso direto para geração de calor (Ex: combustível para caldeiras e aquecedores)	Tratamento parcial	Nenhum a tratamento completo	Nenhum tratamento	-
Cogeração com motores de combustão interna	Tratamento parcial a completo	Tratamento parcial a completo ***	Nenhum a tratamento completo	-
Cogeração com turbinas e microturbinas	-	Turbina (h ₂ s < 10.000 ppmvc)*** Microturbina (H ₂ S < 50ppmv)***	-	Pressão do combustível nas microturbinas: 345-552 kPa
Injeção de gás natural na rede	Tratamento completo (umidade < 70-80%)	Tratamento completo (H ₂ S < 5mg/m ³)	Tratamento completo (CH ₄ ≥ 95%)	Compressão: 60-70 bar ****
Motores a gás (Ex: combustível veicular)	Tratamento completo (umidade < 70-80%)	Tratamento completo (H ₂ S < 1.000-2.000 mg/m ³)	Tratamento completo	Compressão: 200 bar Teor energético: 13-21 MJ/m ³

* Pode ser necessário se a pressão do biogás for muito baixa

** Requisitos da Norma Holandesa de Emissões (NER 3.5/90.1). Nos queimadores abertos não há como determinar temperatura e tempo de residência.

*** Variável de acordo com a demanda dos fabricantes das tecnologias de conversão energética.

**** Variável dependendo da rede de gás natural

Fonte: adaptado de Nyns e Thomas (1998) e Ad-Nett (2000) apud Noyola et al. (2006); Chambers E Potter (2000); Capstone Turbine Co. (2006); Lobato (2011)

Além das características dos processos de purificação apresentados na Tabela 3.4.6 e os níveis de tratamento requerido para diferentes tipos de uso do biogás mostrados na Tabela 3.4.7, são apresentados também os respectivos custos de implantação e operação na Tabela 3.4.8.

Tabela 3.4.8 Custos para o tratamento de biogás na Europa

CUSTOS	PSA	DWW	ABSORÇÃO	ABSORÇÃO	MEMBRANAS
			QUÍMICA	FÍSICA	
Investimento [€/Nm³/h biometano]					
100 Nm ³ /h biometano	10.400	10.100	9.500	9.500	7300 - 7600
250 Nm ³ /h biometano	5.400	5.500	5.000	5.000	4700 - 4900
500 Nm ³ /h biometano	3.700	3.500	3.500	3.500	3500 - 3700
Operação [€/Nm³ biometano]					
100 Nm ³ /h biometano	0,128	0,14	0,144	0,138	0,108 – 0,158
250 Nm ³ /h biometano	0,101	0,103	0,120	0,102	0,077 – 0,116
500 Nm ³ /h biometano	0,092	0,091	0,112	0,090	0,065 – 0,101

*Biometano segundo a ANP nº08/2015 deve apresentar concentração mínima de metano no biogás de 96,5%

Fonte: Adaptado Technisch Universitat Wien (2012)

Além disso, de acordo com Coelho *et al.* (2004), o rendimento energético e a vida útil do sistema podem ser aumentados através da purificação do biogás, ao utilizar filtros coalescentes e secadores por refrigeração para remoção da umidade. Para remoção do H_2S gasoso, utiliza-se um filtro de carvão ativado, operando pelo princípio de adsorção e para a remoção do H_2S solubilizado na água utilizam-se secadores por refrigeração e filtros coalescentes.

Outro método utilizado por Pecora (2006) na purificação dos gases que pode ser visualizado respectivamente nas Figura 3.4.8 e Figura 3.4.9 é a divisão do sistema em duas etapas em que na primeira ocorre a condensação da umidade presente no biogás através da condução do gás por um trocador de calor, que é carregado com um fluido de arrefecimento. Na segunda etapa este passa por duas peneiras moleculares em linha cuja primeira é responsável pela retirada de umidade e a segunda de ácido sulfídrico para então passar por outro filtro contendo cavaco de ferro, visando a retirada do ácido sulfídrico restante.



Figura 3.4.8 Compartimento de condensação do purificador.
Pecora (2006)



Figura 3.4.9 Peneiras moleculares e filtro de cavaco de ferro.
Pecora (2006)

Contudo, Zanette (2009) afirma que um dos métodos mais fáceis e baratos é a utilização de água pressurizada como absorvente em que o biogás bruto é comprimido e alimentado pelo fundo de uma coluna de leito empacotado, enquanto a água pressurizada é espreitada a partir do topo pois assim o processo de absorção é contra-corrente e auxilia na dissolução do CO₂ e do H₂S na água, que são coletados no fundo da torre, restando apenas a secagem por refrigeração para condensar a umidade em excesso do gás e assim retirá-la do biogás. As demais técnicas de purificação do biogás podem ser vistas na Tabela 3.4.9.

Tabela 3.4.9 Técnicas de remoção de impurezas do biogás

Impureza	Descrição geral	Detalhes
Água	Adsorção	Gel de sílica Peneira molecular Alumina
	Absorção	Desidratação por etileno glicol (temperatura -6,7° C) Selexol
	Condensação por Refrigeração	Resfriamento a 2°C
Hidrocarbonetos	Adsorção	Carvão ativado
	Absorção	Óleo leve Etileno glicol Selexol (temperatura entre -6,7°C e -33,9°C)
	Combinação	Refrigeração com Etileno glicol e adsorção em carvão ativado
CO ₂ e H ₂ S	Absorção	Solventes orgânicos Selexol Flúor Soluções de sais alcalinos Alcanolaminas Mono, di - tri - etanol amina
	Adsorção	Peneiras moleculares Carvão ativado
	Separação por membranas	Membrana de fibra oca

Fonte: Adaptado Coelho *et al.* (2004) e Alves (2000)

Contudo, apesar da purificação do biogás normalmente ser um processo necessário, o mesmo possui um significativo custo que pode inviabilizar o aproveitamento energético. Segundo Metcalf e Eddy (2003), na maioria dos casos a energia elétrica produzida através do biogás oriundo da digestão anaeróbia de esgoto doméstico é suficiente para suprir a demanda da planta em operação. No entanto, de acordo com a análise feita por Gomes *et al.* (2017) na ETE Itabira (MG) de um cenário sem purificação, considerando a secagem do lodo e a demanda da ETE, a energia elétrica excedente seria 84% do total produzido enquanto que utilizando a purificação esse valor cairia para 15% do total produzido, assim como pode ser visto na Tabela 3.4.10.

Tabela 3.4.10 Comparação energética dos cenários sem e com purificação

	Sem Purificação		Com Purificação	
	Valores	Percentual energético (%)	Valores	Percentual energético (%)
Energia útil total (MJ.dia ⁻¹)	78.168	-	14.602	-
Energia para secagem do lodo (MJ.dia ⁻¹)	6.744	9	6.744	46
Energia demandada pela ETE (MJ.dia ⁻¹)	5.709	7	5.709	39
Energia elétrica excedente (MJ.dia ⁻¹)	65.715	84	2.149	15

Fonte: Gomes *et al.* (2017)

Além disso, cabe ainda ressaltar o custo adicional de implantação do sistema de purificação para a análise de viabilidade econômica no caso analisado por Gomes *et al.* (2017), em que o investimento foi de 17,6 milhões de dólares no sistema com purificação e 13,95 milhões de dólares para o sistema sem purificação com base na demanda de 70.000 habitantes e uma vazão máxima de 0,17 m³.s⁻¹.

Os sistemas de purificação do biogás, apesar de serem tópicos cada vez mais presentes no cenário mundial em função da própria expansão dos estudos acerca da produção de energia através da digestão anaeróbia, ainda apresentam uma baixa adesão a esse tipo de tecnologia. Em função disso existem atualmente poucos casos de reaproveitamento do biogás no cenário nacional para servir como base.

3.4.4. Experiências nacionais

Apesar de ser uma área de pesquisa já consolidada em países como a Alemanha, a produção e utilização do biogás no Brasil ainda não é bem difundida, uma vez que a matriz energética renovável do Brasil em 2017 esteve entre as mais elevadas do mundo, composta por 42,9% da sua produção, mas apenas 0,065% oriunda do biogás (EPE, 2018). Todavia, o aproveitamento energético do biogás possui diversas contribuições no âmbito nacional em que de acordo com Costa (2006), o aproveitamento do biogás responde por 25% da demanda mensal de energia para o funcionamento da ETE Barueri em São Paulo ao passo que na ETE Rio das Antas (Cascavel, Paraná), cuja população atendida é de 85.000 habitantes, tem sua a geração de energia elétrica pelo biogás estimada em 35.459 kWh mensal e potência de 48,57 kW, valor suficiente para atender à demanda elétrica da estação de tratamento de água do município (Zilotti, 2012). Além disso, o autor ainda mostra que a combustão de 1 Nm³ de biogás, com 65% de CH₄ na mistura, libera 23.400 kJ de calor, enquanto 1 Nm³ de CH₄ produz 36.000 kJ.

Outra ETE no Brasil que aproveita o biogás produzido em digestores anaeróbios de lodo é a ETE Arrudas, localizada em Belo Horizonte/MG, atende aproximadamente 1,7 milhão de habitantes e aproveita o biogás por meio da cogeração em 12 microturbinas as quais têm uma capacidade total de geração de 2.400 kW (Copasa, 2015).

Mais um exemplo de ETE em operação no Brasil que também usa energeticamente o biogás produzido em digestores de lodo é a ETE Ribeirão Preto. A ETE atende a cerca de 600.000 habitantes e está localizada no município de Ribeirão Preto, São Paulo. Nesta planta, a energia elétrica vem sendo gerada em dois conjuntos motor-gerador ciclo Otto, com potência elétrica total de 1.500 kW fazendo também o aproveitamento da energia térmica, produzida na cogeração e utilizando a para o aquecimento dos digestores anaeróbios de lodo (GUASCOR, 2015).

A ETE Vieiras, em Montes Claros/MG, segundo Platzer (2015), apesar de não realizar a geração de eletricidade em suas instalações, utiliza a energia térmica produzida no processo de secagem do lodo. O autor ainda abordou também o projeto na ETE Franca, localizada em Franca/SP, de transformar o biogás em biometano e utilizá-lo como combustível veicular na frota da SABESP (Platzer, 2015).

A ETE Jacuípe II, em Feira de Santana/BA, atende uma população de aproximadamente 100.000 habitantes e utiliza de um motor-gerador com potência elétrica de aproximadamente 200 kW cuja conclusão e sua operação do projeto estava datada para 2016. O biogás, neste sistema, é gerado em um reator UASB, e a energia elétrica produzida compensaria grande parte da demanda de energia necessária para o tratamento do efluente no processo de lodo ativado.

De acordo com o GDF (2017), o biogás ainda é pouco utilizado no mercado brasileiro, mas, com grandes perspectivas de avanço e utilização num futuro muito próximo, as ETEs que possuem geração de gás (sistema anaeróbios), podem ser transformadas em plantas de tratamento autossustentáveis e também rentáveis, com a implantação de sistema de cogeração de energia e de secagem de lodo, onde o lodo gerado é secado termicamente após desaguamento, enquanto o biogás é usado parte para geração de energia e parte para secagem do lodo.

Segundo Gomes (2005), devido à limitação, a curto e médio prazo, do aumento da disponibilidade energética, é imprescindível a gestão racional e utilização eficiente para redução no consumo e, por conseguinte, nos custos. Existe também o projeto de uma usina de

biogás para a ETE Brasília Sul que consiste na implantação de sistemas de cogeração (eletricidade e calor), por meio do aproveitamento energético do biogás, resultante do tratamento do esgoto (Caesb, 2017).

3.4.5. Projeções financeiras

O cenário de investimentos para implantação ou expansão de infraestrutura de longo prazo, como concessões e Parcerias Público-Privadas, a instituição privada parceira do poder público pode receber pelo projeto por até 35 anos, o que, apesar de delongar o retorno do investimento, pode tornar a rentabilidade do projeto muito mais atrativa Palhares (2019). Desse modo o prolongamento do pagamento pode acarretar na possibilidade de um lucro maior e mais garantido com perspectivas de tornar o investimento com retorno a longo prazo em um negócio propício.

Com relação ao cenário de investimentos públicos em infraestrutura de saneamento a SABESP (2018) realizou um projeto avaliado em R\$2,644 bilhões para a construção da ETE São Lourenço, São Paulo, no ano de 2014. O valor estabelecido do financiamento foi de R\$2,352 bilhões com período de carência do pagamento de 48 meses e duração do financiamento de 210 meses pagas em parcelas anuais de R\$202 milhões, ou mensais de R\$16,833 milhões, compostas pela amortização e taxas, equivalentes a 8,59% do valor contratado.

Além de observar formas de investimentos, a utilização de indicadores de rentabilidade é fundamental na observância sobre as condições favoráveis ou não a um empreendimento. Entre esses indicadores o Valor Presente Líquido é um dos métodos que levam em consideração o fluxo de caixa descontado. É um dos métodos mais utilizados pelas empresas e quanto maior for o seu valor, melhor será o projeto (Cherobim *et al.*, 2002). Além disso, o VPL calcula o ganho monetário líquido, ou a perda de um projeto, descontando todas as entradas e desembolsos futuros esperados para o momento atual, utilizando uma taxa de retorno esperada (Horngren *et al.*, 1997).

Gitman (2001) ainda aborda essa taxa que nesse indicador ou em outros, de uma forma ou de outra, descontam os fluxos de caixa da empresa com uma taxa específica. Essa taxa muitas vezes chamada de taxa de desconto, retorno exigido, custo de oportunidade, se refere ao retorno mínimo que deve ser conseguido de um projeto, para não alterar o valor da empresa no mercado, de modo a não ocorrerem prejuízos.

No Brasil, a opção de aplicação financeira com maior liquidez e menor risco do devedor não cumprir suas obrigações é a compra de Letras Financeiras do Tesouro (LFT) cujo valor nominal é indexado pela taxa Selic (Oreiro *et al.*, 2007). Dessa forma, na análise de investimentos a taxa Selic é usualmente utilizada como taxa de custo do capital que analisa a perspectiva do investimento frente ao cenário nacional. Além disso, BCB (2019) apresenta o valor da taxa Selic referente a julho de 2019 como 6,50% ao ano.

3.5. ETE BRASÍLIA SUL

Inaugurada em 1962, para atender uma população de 150.000 habitantes, seguido de estudos de ampliação e modernização para tratamento terciário com remoção dos nutrientes fósforo e nitrogênio, na década de 80, a ETE Sul foi direcionada para minimização do processo de eutrofização do Lago Paranoá. A ampliação ocorreu no ano de 1993 e capacidade de atender 460.000 habitantes das RAs da Asa Sul de Brasília, Núcleo Bandeirante, Candangolândia, Cruzeiro, parte de Águas Claras, parte do Lago Sul, parte do Riacho Fundo, Guará, SIA, SCIA e Setor Sudoeste (SIESG, 2014).

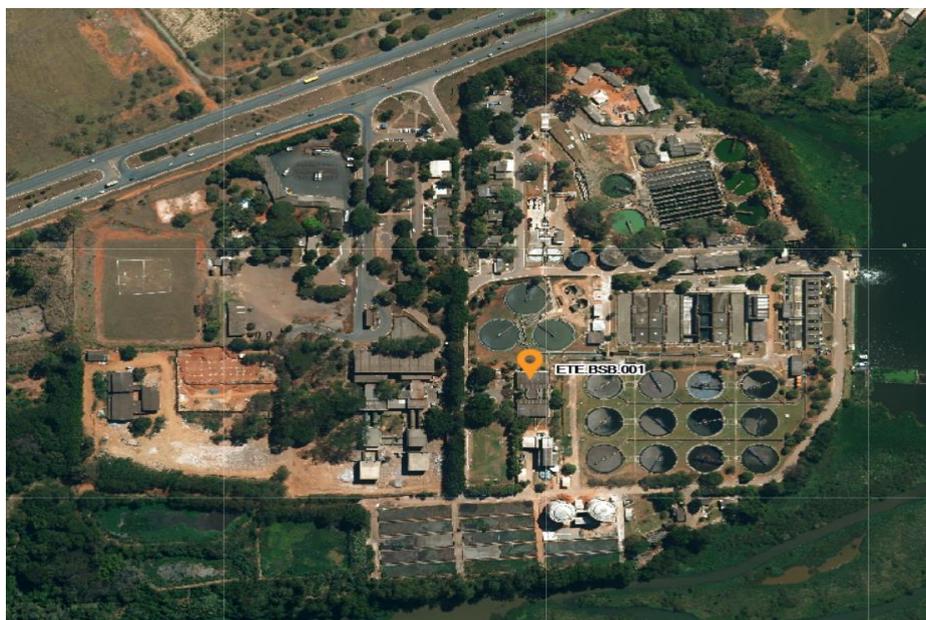


Figura 3.5.1 Visualização superior da ETE Sul.
Fonte: Caesb (2017)

3.5.1. Descrição da ETE

O sistema de tratamento da estação conta com a remoção biológica de nutrientes de modo aeróbio, anaeróbio e anóxico, seguido de polimento final e com uma vazão operante atualmente de 1.330 L/s, embora possua capacidade para 1.500 L/s. Além disso, o sistema que pode ser

visto na Figura 3.5.2 conta com as unidades de elevatória de esgoto bruto, gradeamentos manual e mecanizado, 2 desarenadores circulares, 3 decantadores primários, 4 reatores biológico de nutrientes (aeróbio, anaeróbio e anóxico), 12 decantadores secundários, 9 tanques de Polimento final, estação de tratamento do lodo gerado (ETL) composta por 6 adensadores (2 por flotação e 4 mecanizados), 4 digestores, elevatórias de lodo, 3 centrífugas e 26 leitos de secagem (GDF, 2017).

As etapas de tratamento da ETE Brasília Sul são compostas pelo gradeamento automatizado na parte preliminar, decantadores primários no tratamento primário, lodos ativados modificados para remoção de nitrogênio e fósforo no tratamento biológico e tratamento físico-químico compostos por coagulação com sulfato de alumínio e polímero catiônico, floculação e lotação por ar dissolvido no polimento final.

Segundo o GDF (2017) o esgoto que chega à ETE passa pelo tratamento preliminar cujo gradeamento é dividido em grosso e fino, com limpeza mecânica para remoção dos sólidos grosseiros. Após essa etapa, o esgoto segue para os desarenadores circulares e depois para os clarificadores cujo resíduo retirado de ambos é encaminhado para o aterro sanitário do Jóquei de Brasília.

Após passagem pelos desarenadores o esgoto segue para os decantadores primários de modo a começar a separação inicial entre as fases líquida e sólida em que a fase sólida vai para os digestores anaeróbios enquanto a parte líquida segue para os reatores biológicos adaptados para também remover nitrogênio e fósforo. Após o tratamento biológico, o efluente segue para os decantadores secundários que visam reduzir a concentração de sólidos suspensos ao separar os microrganismos do líquido e assim encaminhar o efluente para o polimento final em que os sólidos e fósforo remanescente são removidos através da coagulação e floculação seguidos da flotação por ar dissolvido para então o efluente tratado ser lançado no Lago Paranoá. As etapas do tratamento são mostradas na Figura 3.5.2.



Figura 3.5.2 Área da ETE Brasília Sul.
Fonte: GDF (2017)

No processo de tratamento são produzidos, segundo GDF (2017), em média, 169 m³/dia de lodo, destinados para a aplicação em áreas degradadas ou armazenamento temporário na Unidade de Gerenciamento de Lodo localizada na ETE Melchior. Esse lodo produzido nos processos, rico em nutrientes, após estabilizado, pode ser utilizado como condicionador de solo.

Além disso, existe um gerador elétrico instalado para emergências apenas no tratamento preliminar. A estação conta com duas opções de alimentação de energia através de redes independentes entre si, garantindo o pleno funcionamento da ETE em ocasiões de falta de energia elétrica em uma delas. Em função de ocasiões como essa, verifica-se mais uma vez, a vantagem da produção de energia pela própria ETE que pode ser utilizada nessas situações de interrupção do fornecimento elétrico pela rede.

O fluxograma da ETE Brasília Sul, segundo o SIESG (2014), está demonstrado na Figura 3.5.3, resumindo o processo de tratamento.

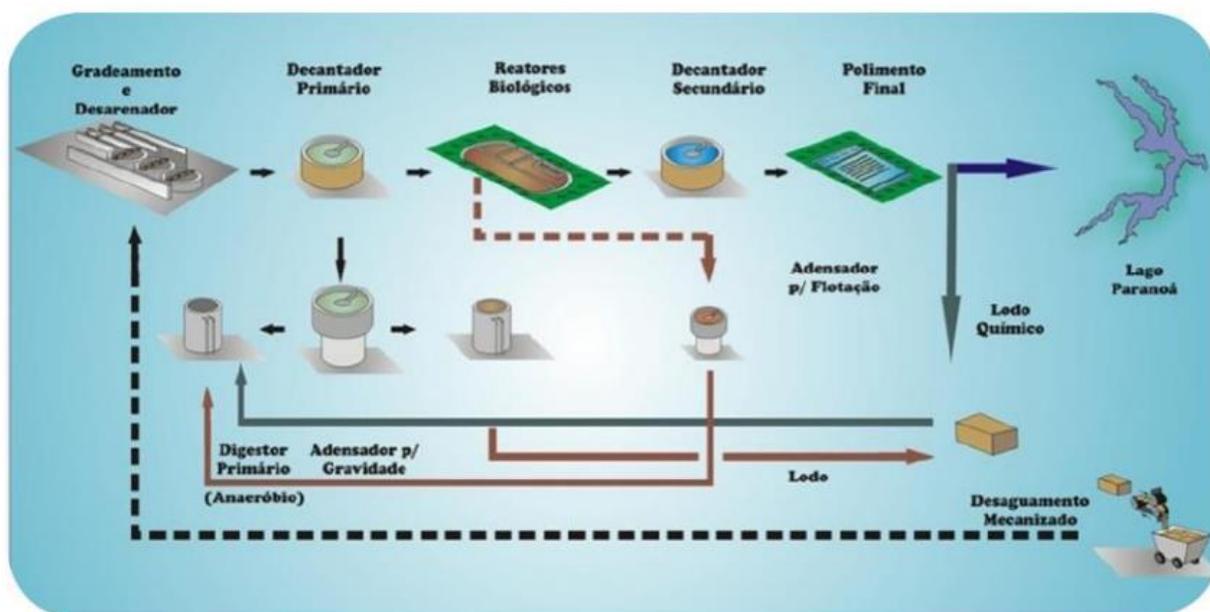


Figura 3.5.3 Fluxograma da ETE Brasília Sul.
Fonte: SIESG (2014).

3.5.2. Características do lodo gerado

A produção de lodo no DF no ano de 2015 foi avaliada em 123.639 m³/ano, em que 49,26% ou 60.900m³/ano dessa produção está associada a ETE Sul, seguida da ETE Norte com 20,10% e Melchior com 12,26% (Caesb, 2015). Quando se compara a quantidade de lodo produzido com a vazão tratada em cada ETE, percebe-se que a ETE Sul é a que mais produz lodo por m³/ano de esgoto tratado no DF, produzindo 60.900 m³/ano seguido pela ETE Norte com 24.852 m³/ano e Melchior com 15.154 m³/ano. Do lodo gerado em todas essas estações, segundo GDF (2017), 31,2% é destinado à recuperação ambiental em áreas degradadas, 19,1% é submetida ao processo de secagem natural para redução do volume e o restante encontra-se armazenado na UGL para também passar pelo processo de secagem natural ao realizar a coleta do líquido drenado.

Ao analisar o quesito econômico, verifica-se um custo associado ao transporte de lodo uma vez que a distância da ETE Sul até a UGL é de 33km. Em função da grande produção de lodo, também está prevista, segundo GDF (2017), a aquisição de uma secadora térmica para a respectiva estação em que aumentaria o teor de sólidos do lodo ao reduzir seu volume, resultando em economias no transporte até a UGL.

3.5.3. Produção e gerenciamento do lodo

A produção de lodo na ETE Sul, avaliando-se apenas o afluente aos digestores anaeróbios, é composta pelo lodo primário, pelos lodos flotados do secundário e do terciário, após

adensamento, e pela parcela do lodo de fundo do secundário que não é destinada a recirculação. Esses valores usualmente apresentam bastante variação devido a sazonalidade, feriados, balanços devido a manutenções, entre outros eventos aleatórios. Além disso, os digestores cujos volumes são apresentados na Tabela 3.5.1, funcionam através do sistema de alimentação semi-contínua controlada automaticamente pelo nível ótimo de trabalho de cada digestor.

Tabela 3.5.1 Características dos digestores e do lodo em 2019

Digestor	Volume (m ³)	Abril		Maio	
		Tempo de detenção médio (dia)	Vazão de lodo misto (m ³ /dia)	Tempo de detenção em (dias)	Vazão de lodo misto (m ³ /dia)
DGP2	4.260	39,3	108,4	31,3	137,5
DGP3	7.030	20,4	344,6	18,0	387,1
DGP4	7.030	21,2	331,6	18,8	372,0
Total ¹	18.320	23,4	784,6	20,4	896,6

Fonte: Caesb (2019)

3.5.4. Energia elétrica

De acordo com Caesb (2015), as despesas com energia elétrica somaram R\$ 101.123.213,00 no ano de 2015, um custo que representou 7,93% da despesa total de exploração no respectivo período, tal como apresentado na Tabela 3.5.2. Segundo Caesb (2015), a despesa com pessoal é o principal custo da empresa, seguida dos tributos, serviços de terceiros e energia elétrica. Salienta-se o significativo aumento dos custos com energia elétrica, que passou de R\$ 5 milhões por mês, no ano de 2014, para cerca de R\$ 11 milhões por mês, a partir de setembro de 2015.

Tabela 3.5.2 Despesas com os serviços em 2015

Descrição	2015	Percentual (%)
FN010 - Despesa com pessoal próprio (R\$/ano)	676.693.815,00	53,10%
FN011 - Despesa com produtos químicos (R\$/ano)	23.025.766,00	1,81%
FN013 - Despesa com energia elétrica (R\$/ano)	101.123.213,00	7,93%
FN014 - Despesa com serviços de terceiros (R\$/ano)	183.489.313,00	14,39%
FN027 - Outras despesas de exploração (R\$/ano)	141.569.520,00	11,11%
FN021 - Desp. Fiscais ou tributárias comput. Na DEX (R\$/ano)	148.613.452,00	11,66%
FN015 - Despesas de exploração (DEX) (R\$/ano)	1.274.785.079,00	100,00%

Fonte: CAESB (2015)

Com base em todos esses fatores, GDF (2017), acredita que a energia elétrica gerada a partir do biogás de estações de tratamento de esgotos reduziria os gastos da companhia com energia elétrica, além de ser uma atitude ambientalmente responsável. Além disso, o aproveitamento do lodo como uma fonte geradora de energia (utilização de biogás), permitiria uma redução do volume produzido para destinação final e conseqüentemente uma segunda redução no custo

¹ Tempo de detenção total representado pela média ponderada entre o tempo de detenção e a vazão de lodo misto.

operacional. Contudo, GDF (2017) ainda afirma que em termos de eficiência energética, a utilização do biogás para produção de energia nas ETEs é uma boa prática a ser estimulada, embora não seja possível torná-las autossuficientes em energia, já que é grande a demanda de eletricidade requerida pelos equipamentos do processo de tratamento de esgoto.

Dessa maneira, GDF (2017) traz como uma possibilidade a utilização da energia oriunda do biogás de forma sistemática, nos horários de pico, quando esse insumo é mais caro. Outra maneira apresentada seria em momentos de emergência, quando houvesse falhas no fornecimento de energia.

4. METODOLOGIA

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A análise do potencial energético da ETE Brasília Sul com foco na digestão anaeróbia dos lodos gerados foi baseada na quantificação do metano gerado e na composição do biogás em que este se encontra. A análise foi realizada com base nos dados dos meses de janeiro a abril de 2019, utilizando-se as médias mensais de cada mês em todos os dados secundários fornecidos. Para poder avaliar todos os objetivos propostos foram necessários que algumas etapas, mostradas na Figura 4.1.1, fossem seguidas.

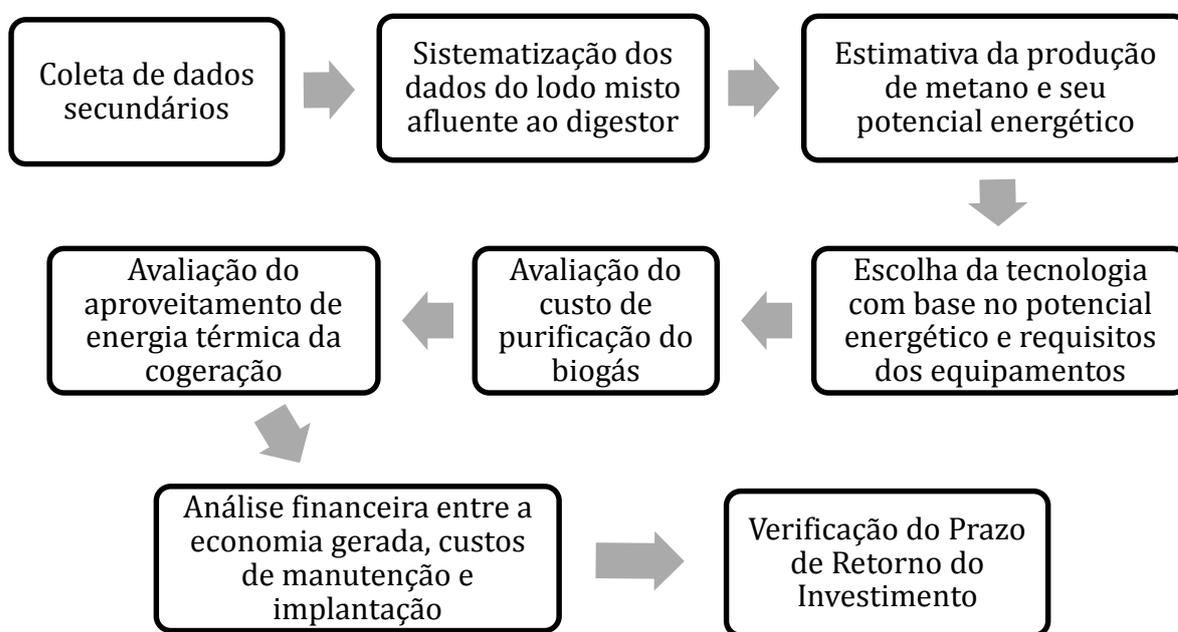


Figura 4.1.1 Sequência de etapas metodológicas.

Com base nos dados secundários fornecidos pela Caesb, realizou-se a caracterização do lodo misto que é digerido anaerobiamente. De posse da caracterização realizada do lodo afluente ao digestor, a mesma foi comparada com o lodo efluente e assim estimou-se a produção de gás gerado e a sua eficiência.

A metodologia adotada buscou fornecer valores próximos do real, contudo essa não abrange os custos das instalações elétricas, do sistema de medição de vazão e composição do biogás para controle de qualidade, tubulação de transporte de biogás, mão de obra, materiais entre outras fundamentais à uma análise de viabilidade. Também podem ser significativos na estimativa da economia produzida os valores desatualizados das tecnologias de aproveitamento e purificação

cujos desenvolvimentos desde a sua publicação até a atualidade provavelmente reduziram seus custos e aumentaram suas eficiências. Desse modo, o presente estudo objetivou estimar o potencial energético da ETE para embasar estudos mais detalhados.

4.2. QUANTIFICAÇÃO DO METANO E SEU POTENCIAL ENERGÉTICO

A quantificação do metano produzido na digestão anaeróbia é realizada através de uma série de processos sequenciais que se inicia na quantificação da carga orgânica em função da concentração de SV, utilizado em Probiogás (2016a) no lodo afluyente aos digestores e da sua vazão volumétrica (Equação 4.1).

$$COA = S_2 \cdot Q_{D2} + S_3 \cdot Q_{D3} + S_4 \cdot Q_{D4} \quad 4.1$$

$COA =$ Carga orgânica aplicada (kg/d)

$Q_{Dn} =$ Vazão volumétrica de lodo afluyente ao digestor n (Nm^3/d)

$S_n =$ Concentração de matéria orgânica no substrato do digestor n kg_{SV}/Nm^3

Com base no valor obtido da COA e na eficiência de remoção de SV durante a digestão anaeróbia com valores entre 40% e 55% (Silva, 1982; Von Sperling; Gonçalves, 2001), adotando ainda o valor de 0,43 indicado como o mais acurado para digestão de lodo misto por Probiogás (2015), calcula-se a quantidade de SV digeridos por dia (Equação 4.2).

$$SV_d = COA \cdot 0,43 \quad 4.2$$

$SV_d =$ Sólidos Voláteis digeridos (kg_{SV}/dia)

A produção de biogás pode ser estimada a partir da avaliação dos SV digeridos e uma taxa específica de geração de biogás (Equação 4.3) que segundo Metcalf & Eddy (2003), pode ser de 0,75 a 1,12 Nm^3/kg_{SV} digerido, utilizando-se o valor mínimo de 0,75 Nm^3/kg_{SV} .

$$Q_{biogás} = SV_d \cdot q_{biogás} \quad 4.3$$

$Q_{biogás} =$ Vazão de biogás gerado (Nm^3/d)

$q_{biogás} =$ Taxa específica de geração de biogás ($Nm^3/kg_{SVdestruído}$)

$SV_d =$ Sólidos Voláteis digeridos (kg_{SV}/d)

Em função da vazão de biogás previamente calculada e da concentração de metano presente no mesmo, decorrente da digestão de lodo, que segundo Lobato (2011) e mostrado na Tabela 3.3.2,

é de 60% a 70%, utilizando-se o valor médio de 65% para calcular a vazão diária de metano (Equação 4.4)

$$Q_{CH_4} = C_{CH_4} \cdot Q_{biogás} \quad 4.4$$

Q_{CH_4} = Vazão de metano gerado (Nm^3CH_4/d)

C_{CH_4} = Porcentagem de CH_4 no biogás (%)

$Q_{biogás}$ = Vazão de biogás gerado (Nm^3/d)

Para embasar a posterior escolha do tipo de máquina responsável pela conversão da energia potencial do metano em energia elétrica e calorífica é necessário estimar a potência total oriunda do metano produzido, tal como em Probiogás (2016a), calculado em função da sua vazão e do seu Poder Calorífico Inferior – PCI² (Equação 4.5).

$$P_{CH_4} = \frac{Q_{CH_4}}{24} \cdot PCI_{CH_4} \quad 4.5$$

P_{CH_4} = Potência disponível do metano (kW)

Q_{CH_4} = Vazão de metano gerado (Nm^3/d)

PCI_{CH_4} = Potencial Calorífico Inferior do metano (kWh/Nm^3)

4.3. CONVERSÃO DO BIOGÁS EM ENERGIA

A determinação da tecnologia mais adequada para cogeração de calor e eletricidade, entre as principais do mercado, para realização do aproveitamento energético do metano gerado se embasa no potencial energético e na qualidade dos gases gerados na ETE enquadrados nas especificidades dessas tecnologias, apresentadas na Tabela 3.4.2.

As energias térmica e elétrica foram calculadas separadamente, tendo em vista que os sistemas de valoração energética expressam eficiências diferentes e utilizações diferentes entre elas.

4.3.1. Seleção da tecnologia de aproveitamento energético

Com base na potência disponível do metano e nas faixas de operação de cada uma das tecnologias apresentadas na Tabela 3.4.2, a tecnologia utilizada foi escolhida através da comparação entre essas e as características da ETE, para escolher aquela que melhor atende às demandas. A definição da escolha foi realizada primeiramente através do método de

² O Poder Calorífico Inferior do metano é de 10 kWh/Nm³ (Tabela 3.3.4).

eliminação, ao avaliar a potência a ser instalada e quais tecnologias atendem esse requisito. Em seguida, realizou-se a comparação do custo benefício daquelas que se enquadrarem na faixa de potência obtida ao observar o rendimento da conversão energética elétrica e térmica com maior prioridade para a elétrica cujo valor monetário é superior, custos de manutenção e implementação.

4.3.2. Conversão do biogás em energia elétrica

O cálculo da potência elétrica inicia-se com a utilização dos parâmetros da tecnologia mais adequada, previamente escolhida, com base no valor da potência disponível do metano, definido na Equação 4.6, multiplicado pela eficiência de recuperação elétrica da respectiva tecnologia, apresentada na Tabela 3.4.2.

$$P_{el} = P_{CH_4} \cdot e_{el} \quad 4.6$$

P_{el} = Potência elétrica instalada (kW)

P_{CH_4} = Potência disponível do metano (kW)

e_{el} = Eficiência de recuperação de energia elétrica (%)

4.3.3. Conversão do biogás em energia térmica

A potência da energia térmica gerada na cogeração (Equação 4.7) foi calculada de modo semelhante à potência elétrica com base na tecnologia adotada (Tabela 3.4.2) ao considerar a respectiva faixa de eficiência de recuperação de energia térmica e com base na potência disponível do metano.

$$P_{th} = P_{CH_4} \cdot e_{th} \quad 4.7$$

P_{th} = Potência de energia térmica instalada (kW)

P_{CH_4} = Potência disponível do metano (kW)

e_{th} = Eficiência de recuperação de energia térmica (%)

A utilização da energia térmica usualmente é destinada a manutenção da temperatura do digestor e a secagem do lodo. A temperatura do digestor é um fator limitante na produção do biogás ao alterar o tempo de digestão do lodo e conseqüentemente a vazão comportada pelos digestores. Desse modo a sua atenção seria prioritária sobre a secagem caso houvesse a necessidade do aquecimento do digestor, nas condições apresentadas na Tabela 3.3.1 para

comportar adequadamente a vazão de lodo da ETE. Contudo, tal como mostrado na Tabela 3.5.1, o TRS médio se enquadra nas faixas apresentadas e por isso a energia térmica produzida foi direcionada apenas a secagem do lodo.

A secagem térmica pode apresentar eficiência de até 90%, dependendo da tecnologia (Lobato, 2011). Desse modo, calcula-se o potencial de redução no volume da torta de lodo através da evaporação de parte da água nele contida. Ao considerar, diariamente, o volume do lodo efluente ao digestor, seu teor de sólidos e de umidade e relacionando-os com a potência térmica disponível é possível avaliar o volume de água a ser evaporada³ (Equação 4.8)

$$V_{H_2O, ev} = P_{th} \cdot 24/760 \quad 4.8$$

$V_{H_2O, ev}$ = Volume de água a ser evaporada (Nm^3)

P_{th} = Potência de energia térmica instalada (kW)

Uma vez obtida o volume final da torta de lodo, compara-se esse valor com o volume inicial para estimar a redução percentual do volume de lodo produzido (Equação 4.9).

$$R_{VL} = 1 - \frac{V_{seco}}{V_{lodo, efl}} \quad 4.9$$

R_{VL} = Redução do volume do lodo (%)

$V_{lodo, efl}$ = Vazão de torta de lodo efluente ao digestor ($N m^3/d$)

$V_{lodo, seco}$ = Vazão de lodo após secagem térmica (Nm^3/d)

4.4. IMPACTOS DA PURIFICAÇÃO E SUAS DIMENSÕES

Assim como apresentado na Tabela 3.4.9, diversos mecanismos estão envolvidos para proporcionar a separação seletiva de componentes gasosos. Contudo, apesar do processo de purificação ser uma forte recomendação para aumentar a vida útil dos equipamentos assim como a qualidade do gás gerado, o mesmo acarreta em uma redução do valor econômico gerado ao fim do processo.

Dessa forma, com base na tecnologia de aproveitamento energético (Tabela 3.4.2) e seus requisitos de qualidade, assim como em função da composição do biogás obtido na ETE Brasília Sul, verificou-se o sistema de purificação (Tabela 3.4.6) que atende as demandas,

³ A energia para evaporar $1m^3$ de água é de 760 kWh (Andreoli, 2007).

principalmente em função da concentração de H₂S com referência ao valor recomendado por Rosa *et al.* (2016) e Elfattah *et al.* (2016) de 1000 ppm.

A escolha da tecnologia de purificação foi realizada de maneira semelhante àquela utilizada na determinação da tecnologia de aproveitamento energético ao avaliar inicialmente a capacidade de dessulfurização, seguido pela comparação entre a vazão de biogás e o atendimento a capacidade da tecnologia, para então observar o custo benefício da mesma.

$$C_{pel} = V_{CH_4} \cdot D_{el} \quad 4.10$$

C_{pel} = Consumo de energia elétrica na purificação (kWh)

V_{CH_4} = Volume disponível do metano (Nm³)

D_{el} = Demanda de energia elétrica (kWh/Nm³ biometano⁴)

Com base no sistema selecionado, avaliou-se o seu consumo energético e o impacto no rendimento do sistema (Equação 4.11). Desse modo, estimou-se um o balanço energético, consistindo do saldo entre a potência bruta gerada e a potência consumida na purificação, obtendo-se assim a potência líquida do biogás purificado.

$$I_{PSel} = \frac{C_{pel}}{P_{el}} \quad 4.11$$

I_{PSel} = Impacto da purificação no sistema elétrico(%)

P_{el} = Potência elétrica instalada (kWh)

C_p = Consumo elétrico da purificação (kWh)

4.5. ESTIMATIVA ECONÔMICA

A análise do potencial de implantação de uma central de aproveitamento energético é realizada através do balanço entre as economias produzidas, compostas pelas economias geradas no custo evitado no consumo de eletricidade externa e transporte de lodo após a secagem térmica, com os custos de implantação e manutenção dos sistemas de aproveitamento energético e purificação do biogás. O cálculo referente aos custos de implantação abrange o custo de aquisição da infraestrutura de aproveitamento e purificação do biogás ao passo que a manutenção do projeto corresponde aos custos operacionais desses sistemas.

⁴ Biometano é composto por 96,5% de metano

4.5.1. Economias produzidas

As economias produzidas são compostas principalmente por dois elementos: o custo evitado no consumo de eletricidade externa e no custo evitado de transporte do lodo. O custo evitado no consumo de energia elétrica externa é calculado ao estimar a quantidade de energia produzida pela ETE e o quanto isso reduziria a demanda de eletricidade provinda da concessionária. Essa receita foi calculada com base no consumo médio de energia elétrica pela ETE Brasília Sul nos quatro primeiros meses de 2019, retirada das faturas da sua conta de energia elétrica, emitidas mensalmente pela concessionária de energia com a diferenciação das tarifas em função do seu uso, em horários de pico ou não, cujos custos são diferentes.

Em posse da média ponderada da tarifa, da potência elétrica produzida e do consumo energético de purificação (Tabela 3.4.6), estimou-se o custo evitado ou economia em energia elétrica (Equação 4.12) ao observar a quantidade de energia que passaria a ser produzido pela ETE e não mais dependente de fontes externas.

$$E_{el} = P_{el} \cdot T_{en} - P_{p,el} \quad 4.12$$

E_{el} = Economia gerada pela energia elétrica produzida (R\$)

P_{el} = Potência elétrica instalada (kW)

$P_{p,el}$ = Potência elétrica de purificação (kW)

T_{en} = Tarifa de energia (R\$/kW)

A outra fonte de ganhos é a economia gerada pela energia térmica (Equação 4.13), responsável principalmente pela secagem do lodo que aumenta a concentração de sólidos e assim reduz o seu volume, acarretando em diminuição do custo de transporte e disposição do lodo, aumento da vida útil da UGL.

$$E_{th} = (V_{lodo,efl} - V_{lodo,seco}) \cdot CT_{lodo} \quad 4.13$$

E_{th} = Economia gerada pela energia térmica produzida (R\$)

$V_{lodo,efl}$ = Vazão de torta de lodo efluente ao digestor (m³/d)

$V_{lodo,seco}$ = Vazão de lodo após secagem térmica (m³/d)

CT_{lodo} = Custo de transporte do lodo (R\$/m³.km)

4.5.2. Custos de implantação

O custo de implantação (Equação 4.14) é composto principalmente em função da tecnologia selecionada (Tabela 3.4.2) com a respectiva potência instalada e do custo de implantação do sistema de purificação (Tabela 3.4.8) além das relações monetárias entre as diferentes moedas.

$$Ct_i = C_i \cdot P + (C_{ip} \cdot 0,965) \cdot V_{CH_4} \quad 4.14$$

Ct_i = Custo total de implantação (R\$)

C_{ic} = Custo de implantação do sistema de conversão energética (R\$/kW)

P = Potência instalada (kW)

C_{ip} = Custo de instalação da purificação (R\$/m³)

V_{CH_4} = Volume de metano a ser produzido (m³)

Contudo, a metodologia utilizada se baseia apenas nos custos de instalação do sistema de aproveitamento energético e de purificação, subestimando o valor real ao não considerar fatores como mão de obra, tubulação, sistemas de medição de vazão e concentração de gás, instalações elétricas entre outras.

4.5.3. Custos de manutenção

De modo semelhante aos custos de implantação, os custos de manutenção (Equação 4.15) são determinados com base na mesma tecnologia ao considerar a potência instalada e o fator de utilização do motor que determina a frequência de manutenções (Tabela 3.4.2), assim como os custos de manutenção dos processos de purificação do biogás (Tabela 3.4.8), com a devida correção cambial.

$$Ct_m = C_{OM} \cdot D_{eu} + C_{op} \cdot 0,965 \cdot V_{CH_4} \quad 4.15$$

Ct_m = Custo total de manutenção (R\$)

C_{OM} = Custo de operação e manutenção do sistema de conversão (R\$/kWh)

D_{eu} = Demanda energética utilizada (kWh)

C_{op} = Custo de operação da purificação (R\$/m³)

V_{CH_4} = Volume de metano a ser produzido (m³)

Uma vez estabelecidas as economias produzidas, os custos de implantação e manutenção, tornou-se possível a comparação entre estes para estimar a viabilidade do sistema de aproveitamento energético.

Uma vez conferida a existência da possibilidade de economia e quantificado o seu valor, estimou-se o prazo de retorno do investimento (Equação 4.16), sendo esse definido pelo tempo necessário para que o valor economizado ou gerado seja capaz de arcar com o valor investido.

$$PRI = \frac{Ct_i}{(E_{th} + E_{el} - Ct_m)} \quad 4.16$$

PRI = Prazo de Retorno do Investimento (mês)

Ct_i = Custo total de implantação (R\$)

Ct_m = Custo total de manutenção (R\$/mês)

E_{th} = Economia gerada pela energia térmica produzida (R\$/mês)

E_{el} = Economia gerada pela energia elétrica produzida (R\$/mês)

Além disso, foi realizada a comparação entre os valores propostos com as condições do financiamento realizado pela SABESP na construção da ETE São Lourenço, com um PRI de 210 meses ou 17,5 anos e uma proporção de pagamento anual de 8,59% do valor do projeto.

4.5.4. Valor Presente Líquido

Uma vez que o valor do dinheiro sofre uma depreciação ao longo do tempo foi utilizado o indicador do Valor Presente Líquido para estimar com maior precisão as condições que tornam um investimento favorável ou não. O VPL mostra-se favorável quando este é maior que zero, ao passo que quando este é inferior a zero a implantação do projeto usualmente é rejeitada. Desse modo, buscou-se estimar o número de meses mínimos para que fosse produzido um VPL favorável ao utilizar a Equação 4.17.

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{FC_t}{(1 + K)^t} \quad 4.17$$

VPL = Valor Presente Líquido (R\$)

FC_t = Fluxo de caixa gerado pelo projeto no período t (R\$)

t = número de meses

n = total de meses em avaliação

K = Custo de capital

5. RESULTADOS

Nessa etapa do trabalho são apresentados os resultados obtidos através da avaliação do potencial energético do biogás produzido na digestão anaeróbia do lodo da ETE Brasília Sul. Além do potencial energético foram avaliadas também as tecnologias de aproveitamento e purificação do biogás para então estimar a receita mensal, o custo de implantação do sistema e o prazo de retorno do investimento.

5.1. DADOS SECUNDÁRIOS

O presente estudo analisou a produção de lodo da ETE Brasília Sul no período de janeiro de 2019 a abril de 2019, não sendo possível realizar uma análise mais completa proporcionada em um período maior ao considerar a escala temporal e a influência da sazonalidade devido à ausência de dados em tempo hábil.

Analisou-se, portanto, os parâmetros da produção do biogás como carga orgânica, sólidos voláteis digeridos, vazão de biogás e vazão de metano no período mencionado para avaliar o saldo oriundo da produção energética e os custos de manutenção que tendem a variar com a produção assim como os custos de implantação dos sistemas de aproveitamento energético e purificação do biogás.

5.1.1. Geração de lodo da ETE Brasília Sul

O sistema de digestão anaeróbia dos lodos produzidos na ETE Sul é composto por 3 digestores anaeróbios: DGP2, DGP3 e DGP4 cujo modo de alimentação é semi-contínuo e independente entre eles. As suas concentrações de sólidos voláteis, passíveis de degradação, são mostradas na Tabela 5.1.1.

Tabela 5.1.1 Concentração de SV no lodo

Mês	Sólidos Voláteis (kg/m ³)		
	DGP2	DGP3	DGP4
Janeiro	15,77	12,67	13,09
Fevereiro	16,13	15,89	18,34
Março	16,64	14,74	12,86
Abril	14,29	14,77	14,99
Média	15,70	14,52	14,82

A vazão volumétrica diária de lodo é independente entre os digestores, assim como a sua concentração, e é mostrada na Tabela 5.1.2. com vazões diárias relativamente próximas com

exceção de janeiro de 2019, em que o valor baixo é provavelmente atribuído a redução do contingente populacional do período de férias e em abril apresentou uma variação inesperada.

Tabela 5.1.2 Vazão volumétrica diária de lodo em 2019

Mês	Vazão diária Média de Lodo por Digestor (m ³ /dia)			Vazão Total de lodo
	DGP2	DGP3	DGP4	m ³ /dia
Janeiro	181,27	180,47	286,52	648,26
Fevereiro	152,05	309,91	381,54	843,50
Março	239,21	383,79	267,23	890,23
Abril	108,39	343,90	330,77	783,07
Média	170,23	304,52	316,52	791,26

Em posse das concentrações de matéria orgânica no lodo e as suas respectivas vazões possibilita-se a avaliação da carga orgânica aplicada e a quantificação do processo produtivo de biogás.

5.1.2. Consumo de energia elétrica na ETE Brasília Sul

Os parâmetros referentes ao consumo de energia elétrica na ETE Brasília Sul (Tabela 5.1.3) segundo Caesb (2019), apresenta os dados referentes ao seu consumo de energia elétrica, valor da sua fatura e custo por kWh nos meses de janeiro a abril de 2019 além da média dos respectivos parâmetros.

Tabela 5.1.3 Consumo de energia elétrica na ETE Brasília Sul em 2019

Mês	Consumo (KWh/mês)	Valor da Fatura (R\$)	Custo (R\$/kWh)
Janeiro	1.776.776,00	R\$ 909.515,84	R\$ 0,51
Fevereiro	1.737.896,00	R\$ 915.459,28	R\$ 0,53
Março	1.547.433,00	R\$ 831.476,69	R\$ 0,54
Abril	1.702.464,00	R\$ 898.849,99	R\$ 0,53
Média	1.691.142,25	R\$ 888.825,45	R\$ 0,53

Fonte: Caesb (2019)

Os custos energéticos pagos pela Caesb foram, posteriormente, associados com a energia produzida pelo sistema de aproveitamento energético para estimar a economia que seria produzida.

5.2. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS

Em função da carga de SV (Tabela 5.2.1) calculada pelo produto da vazão de lodo destinado a cada um dos digestores e as suas respectivas concentrações de SV, calculou-se a porção

degradável de SV responsável pela geração de biogás. Através da vazão de biogás, calculou-se a vazão de metano ao considerar o teor de metano em sua composição de 65% (Lobato, 2011) e a sua potência ao considerar o PCI de 10kWh.

Tabela 5.2.1 Determinação de parâmetros associados à geração da potência

Mês	Carga de SV (kg/dia)	SV destruídos (kg/dia)	Vazão de biogás (m³/dia)	Vazão CH₄ (m³/dia)	Potência (kW)
Janeiro	8.896,86	3.825,65	2.869,24	1.865,00	777,09
Fevereiro	14.372,74	6.180,28	4.635,21	3.012,88	1.255,37
Março	13.070,71	5.620,41	4.215,31	2.739,95	1.141,65
Abril	11.584,42	4.981,30	3.735,97	2.428,38	1.011,83
Média	11.981,18	5.151,91	3.863,93	2.511,56	1.046,48

O dimensionamento da produção energética, por questões de segurança operacional, foi realizado utilizando os valores mínimos ou usuais para cada parâmetro de conversão, de modo que os resultados são observados na Tabela 5.2.1. Os valores adotados de SV digeridos variam na faixa 40% a 55% da carga de SV, sendo utilizado o valor de 43% usual para lodo misto (Probiogás, 2015).

A produção de biogás através da análise de sólidos voláteis digeridos ocorre nas faixas entre 0,75 a 1,12 m³/kg SV destruído segundo Metcalf & Eddy (2003) de modo que ao observar o período analisado a maior produção foi obtida em fevereiro com uma vazão média de 4.635,21 m³/dia.

O metano, cuja parcela presente no biogás é de 60% a 70% (Lobato, 2011), foi calculado com base no valor médio de 65% e apresentou uma vazão diária média, no período analisado, de 2.511,55 m³/dia. Com base nisso, é possível visualizar as variações nos volumes de metano produzidos e suas respectivas potências através da Figura 5.2.1 com um valor 25,74% inferior à média em janeiro, devido ao menor contingente populacional em Brasília durante o período de férias seguido por um brusco aumento em fevereiro.

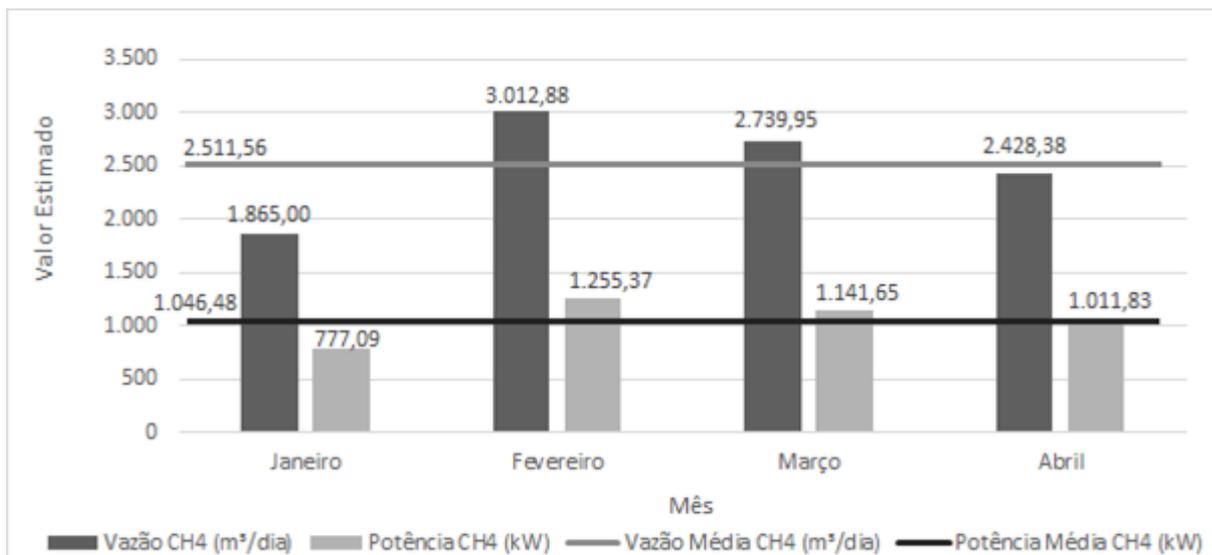


Figura 5.2.1 Potência e Vazão de CH4 gerada

Já a potência média obtida foi comparada com a produção de energia de outras ETEs brasileiras ao relacionar a potência gerada com a população atendida (Tabela 5.2.2) de modo que a relação de energia por habitante da ETE Brasília sul de 0,00234 kW/hab situa-se inferior apenas à ETE Ribeirão Preto.

Tabela 5.2.2 Comparação das potências geradas entre as ETEs nacionais e o potencial da ETE Brasília Sul

ETE	Local	População Atendida (Hab)	Tecnologia utilizada	Potência gerada (kW)	Relação kW/hab
Arrudas	Belo Horizonte, MG	1.700.000	Microturbinas	2.400	0,00141
Ribeirão Preto	Ribeirão Preto, SP	600.000	Motor-gerador ciclo Otto	1.500	0,00250
Jacuípe	Feira de Santana, BA	100.000	Motor-gerador	200	0,00200
Rio das Antas	Cascável, Paraná	85.000	Não informado	49	0,00057
Brasília Sul	Brasília, DF	460.000	Motor de combustão Interna	1.077	0,00234

Além de apresentar uma relação de energia produzida por habitante favorável com relação as outras ETEs, a ETE Brasília Sul atende um contingente populacional, apresenta uma produção energética e utiliza de uma tecnologia semelhante à ETE Ribeirão Preto, de modo que caso a população atendida pelas ETEs fossem iguais, a produção energética da ETE Brasília Sul seria de 1404,7 kW.

5.3. TECNOLOGIA DE APROVEITAMENTO E PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

A capacidade instalada da tecnologia de aproveitamento foi definida com base na maior potência gerada no período de janeiro a abril de 2019, com 1.255,37 kW em fevereiro. As características das tecnologias de cogeração apresentadas na Tabela 3.4.2 foram aqui associadas à potência gerada, mostradas na Tabela 5.3.1, que apresenta as potências e custos gerados com relação ao valor máximo gerado.

Tabela 5.3.1 Características das tecnologias associadas à potência gerada na ETE Brasília Sul em fevereiro de 2019

Parâmetros	Principais Tecnologias					
	Motor de combustão interna		Turbina		Microturbina	
Faixa de Potência (kW)	5,00	5.000,00	500,00	250.000,00	30,00	1.000,00
Potência total (kW)	941,53	954,08	853,65	866,20	753,22	916,42
Potência elétrica (kW)	414,27	451,93	276,18	338,95	276,18	414,27
Potência térmica (kW)	502,15	527,25	527,25	577,47	477,04	502,15
Custo de implantação (R\$/kW)	4.361.150	4.845.723	4.845.723	8.722.301	19.382.891	24.228.614
Custo de manutenção (R\$/kWh)	43,61	48,46	29,07	48,46	726,86	969,14

Posto isso, verificou-se através capacidade de cada tecnologias em função do potencial de produção de energia pela ETE (Figura 5.3.1) que a microturbina mostrou-se incompatível com a demanda produzida, uma vez que sua capacidade máxima é de 1000 kW, inferior a demanda de 1255,37 kW.

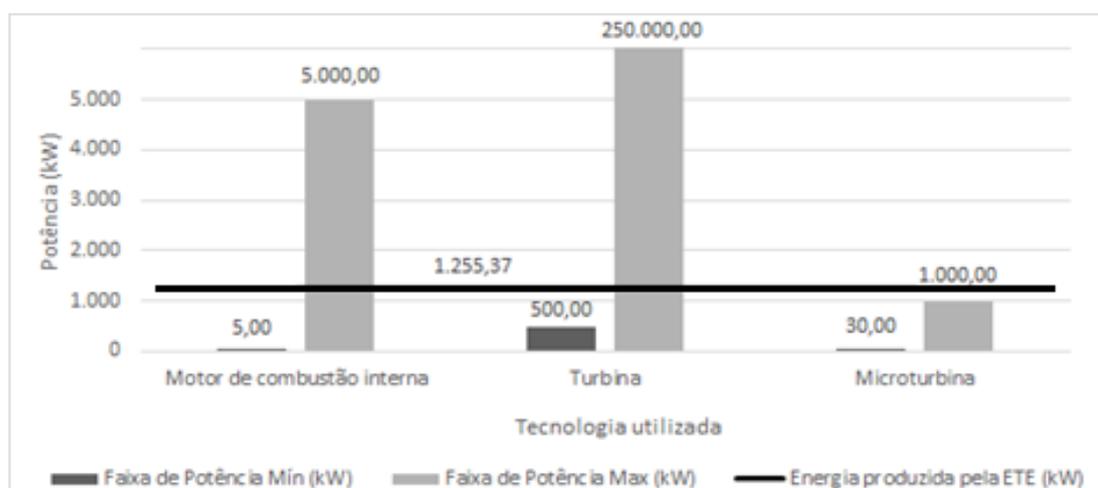


Figura 5.3.1 Análise das tecnologias utilizadas com base na potência.

Com relação aos custo médios de implantação e manutenção das tecnologias (Figura 5.3.2), o motor de combustão interna, com custo médio de implementação de R\$4,60 milhões, mostrou-

se 32,15% inferior ao custo médio de implantação da turbina de R\$6,78 milhões. Por outro lado, o custo de manutenção do motor de combustão interna avaliado em R\$46,03 por kWh, mostrou-se 18,73% superior ao da turbina de R\$38,77 por kWh.

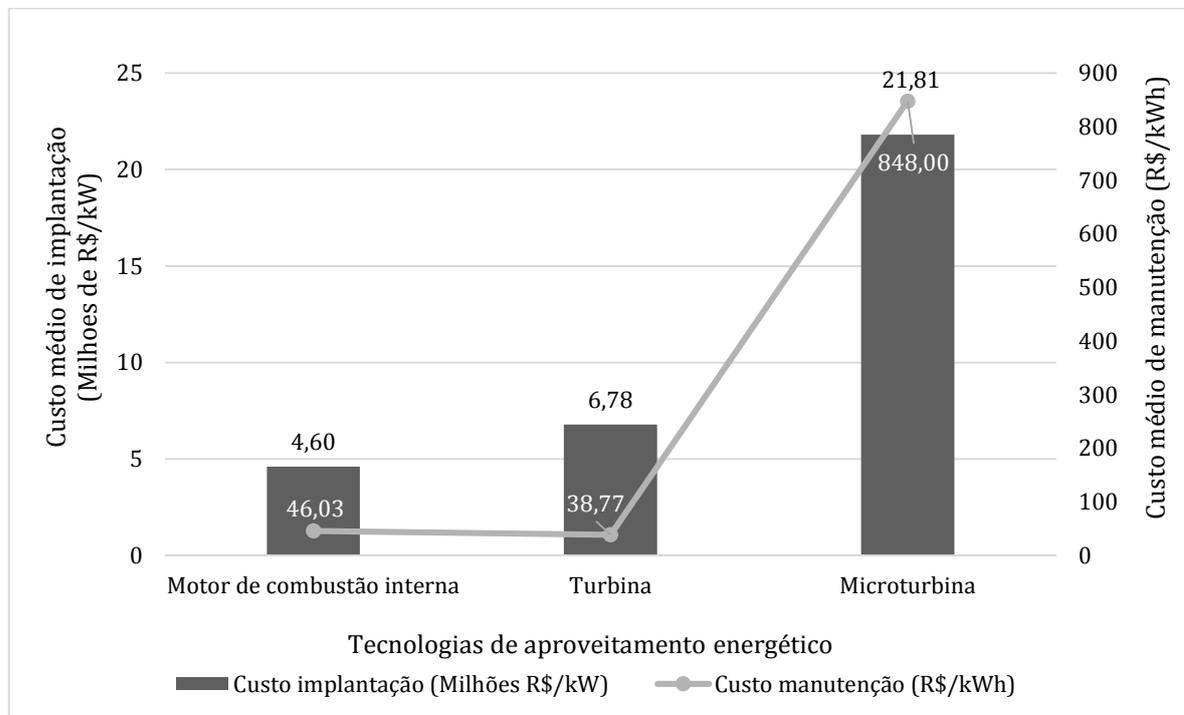


Figura 5.3.2 Custos médios de implantação e manutenção por tecnologia.

Além do custo inferior, as relações entre as potências geradas por tecnologias (Figura 5.3.3) mostram que a fração energética recuperada do metano pelo motor de combustão interno, de 947,8 kW, foi 10,22% superior à da turbina de 859,93 kW. No que diz respeito aos aproveitamentos energéticos do motor de combustão com relação à turbina, a fração elétrica apresentou um rendimento superior na faixa de 40,81% enquanto a fração térmica apresentou um rendimento inferior de 6,82%.

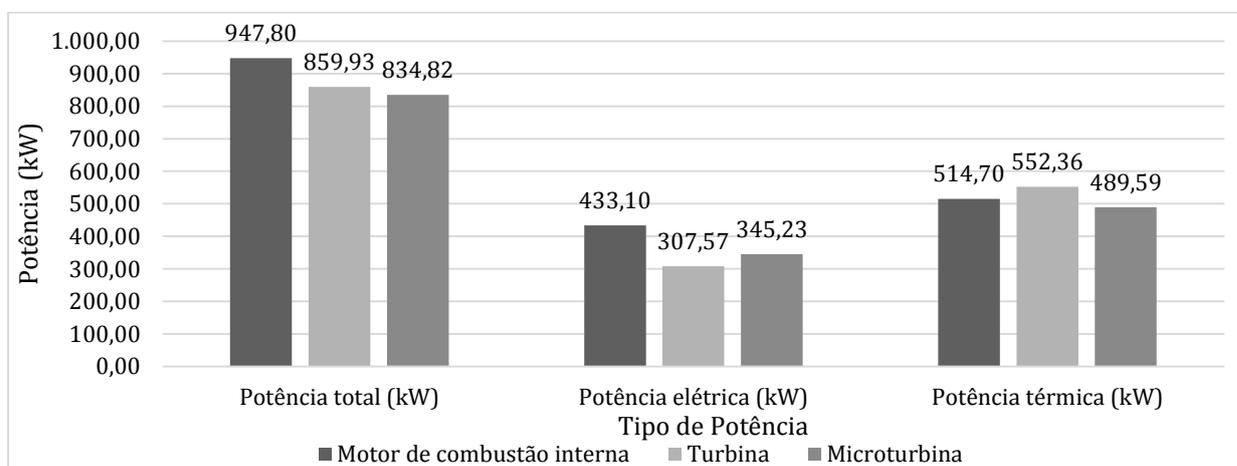


Figura 5.3.3 Potências geradas por tecnologia.

Desse modo, ao avaliar as características produzidas para escolha entre o motor de combustão interna e a turbina, verificou-se que o primeiro se apresentou mais coerente a ser escolhido por possuir custo de implantação e taxas de aproveitamento consideravelmente mais favoráveis, mesmo embora a turbina tenha apresentado custos de manutenção e aproveitamento térmico melhores.

Com a escolha do motor de combustão interna e em função da potência produzida em cada mês e das faixas de rendimento do motor, são obtidos os valores de aproveitamento de energia elétrica e térmica, além da energia eventualmente perdida no processo (Tabela 5.3.2).

Tabela 5.3.2 Potências geradas

Mês	Potência CH ₄ (kW/h)	Potência Elétrica (kW/h)		Potência Térmica (kW/h)		Energia Perdida (kW/h)	
		33%	36%	40%	42%	22%	27%
Janeiro	777,09	256,44	279,75	310,83	326,38	170,96	209,81
Fevereiro	1.255,37	414,27	451,93	502,15	527,25	276,18	338,95
Março	1.141,65	376,74	410,99	456,66	479,49	251,16	308,24
Abril	1.011,83	333,90	364,26	404,73	424,97	222,60	273,19
Média	1.046,48	345,34	376,73	418,59	439,52	230,23	282,55

Para escolha da tecnologia de purificação, segundo os parâmetros apresentados na Tabela 3.4.7 e os requisitos operacionais do motor de combustão interna, prioriza-se a adequação da vazão de gás a do purificador, assim como a realização de dessulfurização, tal como indica a Tabela 3.4.6, apresentando a demanda de energia elétrica pelo processo de purificação do biogás (Tabela 5.3.3).

Tabela 5.3.3 Demanda elétrica na purificação do biogás

Mês	Vazão de biogás (m ³ /dia)	Vazão de biogás (m ³ /h)	Demanda Elétrica (kWh)
Janeiro	2.869,24	119,55	42,12
Fevereiro	4.635,21	193,13	68,05
Março	4.215,31	175,64	61,88
Abril	3.735,97	155,67	54,85
Média	3.863,93	161,00	56,72

Em função das faixas obtidas, elimina-se as tecnologias PSA (300 a 800m³/h), Absorção Química (400 a 2.000 m³/h) e Absorção Física (300 a 1500 m³/h) por não se enquadrarem nas faixas de vazões do projeto. A tecnologia DWW também é desconsiderada, uma vez que a dessulfurização não é tida como certa, escolhendo, portanto, o tratamento por membrana cujo

consumo elétrico é apresentado na Tabela 5.3.3, representa 13,22% da potência elétrica produzida.

5.4. APROVEITAMENTO TÉRMICO

A energia térmica produzida pode ser aproveitada na manutenção da qualidade do sistema de digestão ao manter o digester funcionando na faixa de temperatura mesofílica adequada à eficiência ótima das arqueas metanogênicas (32°C a 36°C). A sua aplicação nessa função remete diretamente a eficiência de degradação de SV e produção de biogás com o TRS tal como mostrado na Tabela 3.3.1. Contudo, uma vez que o tempo de retenção de sólidos da ETE Brasília Sul varia entre 20 dias (Tabela 3.5.1) e apesar da temperatura inferior à ótima, ainda se enquadra em condições eficientes de operação.

Desse modo, a energia térmica produzida deve ser direcionada a secagem da torta de lodo previamente a disposição final com o intuito de reduzir os custos de transporte e disposição do mesmo ao reduzir a sua umidade e consequentemente o volume do lodo. As características previamente a secagem são mostradas na Tabela 5.4.1.

Tabela 5.4.1 Produção diária de lodo e sua composição volumétrica

Mês	Produção Diária de Torta Desidratada (m ³)	Teor de sólidos (%)	Umidade (%)
Janeiro	105,55	15,17%	84,83%
Fevereiro	124,29	14,98%	85,03%
Março	144,71	16,72%	83,29%
Abril	133,60	16,85%	83,14%
Média	127,04	15,93%	84,07%

Calculou-se o volume de água retirável do lodo, ao considerar a energia necessária para evaporação de 1m³ de água do lodo é estimada em 760 kWh (Andreoli, 2007). Com base nesse volume calculado e na potência térmica disponível em cada mês, cujo valor médio foi de 10.595,08 kWh/dia, suficiente para retirar 11,77 m³ de água, foi calculado o volume final das tortas de lodo após a secagem térmica (Tabela 5.4.2).

Tabela 5.4.2 Parâmetros da redução de volume do lodo

Mês	Potência Térmica Disponível (kWh/dia)	Volume de água retirada (m ³)	Volume final da torta desidratada (m ³)
Janeiro	7.646,52	10,06	95,49
Fevereiro	12.352,83	16,25	108,03
Março	11.233,79	14,78	129,93
Abril	9.956,37	13,10	120,50
Média	10.297,38	13,55	113,49

Realizada a secagem térmica, obtém-se um novo teor de sólidos, mais elevado, e uma nova umidade, inferior, tal como mostrado na Tabela 5.4.3, assim como a redução percentual do volume da torta de lodo.

Tabela 5.4.3 Teor de sólidos, umidade e redução de volume do lodo após secagem térmica

Mês	Novo Teor de sólidos (%)	Nova Umidade (%)	Redução de Volume da torta (%)
Janeiro	16,77%	83,23%	9,53%
Fevereiro	17,23%	82,77%	13,08%
Março	18,62%	81,38%	10,21%
Abril	18,69%	81,31%	9,81%
Média	17,83%	82,17%	10,66%

No que tange a economia gerada pela redução do volume de lodo, e de acordo com o valor de transporte do lodo de R\$10,00/m³ (Batista, 2014), quantificou-se o valor do custo evitado no transporte de lodo (Tabela 5.4.4) com essa redução de volume do lodo.

Tabela 5.4.4 Economias com a redução de volume do lodo

Mês	Volume de lodo reduzido (m ³ /dia)	Custo Evitado (R\$/dia)	Economia mensal (R\$)
Janeiro	10,06	R\$ 100,61	R\$ 3.118,97
Fevereiro	16,25	R\$ 162,54	R\$ 4.551,04
Março	14,78	R\$ 147,81	R\$ 4.582,20
Abril	13,10	R\$ 131,00	R\$ 3.930,15
Média	13,55	R\$ 135,49	R\$ 4.045,59

Desse modo, o volume reduzido médio do lodo é de 13,55 m³/dia que ao ser observado em um contexto mensal seria responsável por uma economia de R\$4045,59.

5.5. ANÁLISE FINANCEIRA

A análise financeira buscou investigar a possibilidade de serem gerados lucros ou economias, mediante reaproveitamento energético do biogás, que seriam responsáveis por subsidiar a sua implantação e operação ao passo que além de gerar ganhos financeiros, também gerasse benefícios ao meio ambiente através da redução do volume de lodo.

5.5.1. Economias produzidas

As economias produzidas são compostas por duas principais vertentes: elétrica e térmica. Na economia elétrica foi contabilizado inicialmente o saldo entre a potência elétrica produzida e a consumida no processo de purificação para se obter o saldo entre elas (Tabela 5.5.1).

Tabela 5.5.1 Saldo da potência elétrica produzida

Mês	Potência Elétrica Produzida (kWh/dia)		Consumo Elétrico na Purificação (kWh/dia)	Saldo da Potência Elétrica Produzida (kWh/dia)	
	Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo
Janeiro	6.154,50	6.714,0	1.010,92	5.143,58	5.703,08
Fevereiro	9.942,50	10.846,30	1.633,13	8.309,37	9.213,17
Março	9.041,80	9.863,80	1.485,19	7.556,61	8.378,61
Abril	8.013,60	8.742,10	1.316,30	6.697,30	7.425,80
Média	8.288,10	9.817,40	1.361,39	6.926,72	7.680,17

O saldo de potência elétrica obtido foi multiplicado pelo valor da tarifa de eletricidade paga naquele mês, o consumo elétrico da purificação e a economia gerada com o custo evitado no transporte de lodo. Ao reunir e associar os dados supracitados obtém-se o valor da faixa de economia diária (Tabela 5.5.2).

Tabela 5.5.2 Elementos das economias produzidas por dia

Mês	Saldo da Potência Elétrica Produzida (kWh/dia)		Tarifa (R\$/kW)	Custo evitado no transporte de lodo (R\$)	Faixa de ganhos (R\$/dia)	
	Mínimo	Máximo			Mínimo	Máximo
Janeiro	5.143,58	5.703,08	R\$ 0,51	R\$ 100,61	R\$ 2.733,57	R\$ 3.930,29
Fevereiro	8.309,37	9.213,17	R\$ 0,53	R\$ 162,54	R\$ 4.539,62	R\$ 6.486,33
Março	7.556,61	8.378,61	R\$ 0,54	R\$ 147,81	R\$ 4.208,20	R\$ 5.987,24
Abril	6.697,30	7.425,80	R\$ 0,53	R\$ 131,00	R\$ 3.667,01	R\$ 5.236,94
Média	6.926,72	7.680,17	R\$ 0,53	R\$135,49	R\$ 3.787,10	R\$ 5.410,20

Além disso, ao comparar o consumo de energia elétrica da ETE Brasília Sul, nos meses analisados de 2019, com o potencial de produção elétrica oriundo da digestão dos lodos (Tabela 5.5.3), verifica-se a possibilidade de uma economia mensal média de 16,69%.

Tabela 5.5.3 Economia de eletricidade em 2019

Mês	Consumo (kWh)	Valor da Fatura (R\$)	Produção elétrica (kWh)	Economia (%)	Economia (R\$/mês)
Janeiro	2.388,14	R\$ 909.515,84	279,75	11,71%	R\$ 106.542,18
Fevereiro	2.335,88	R\$ 915.459,28	451,93	19,35%	R\$ 177.117,70
Março	2.079,88	R\$ 831.476,69	410,99	19,76%	R\$ 164.302,74
Abril	2.288,26	R\$ 898.849,99	364,26	15,92%	R\$ 143.083,90
Média	2.273,04	R\$ 888.825,45	376,73	16,69%	R\$ 148.301,60

Desse modo, através do aproveitamento energético do biogás verifica-se a possibilidade de uma economia elétrica mensal estimada em R\$148.301,60 e anual de R\$1.779.619,20 que pode ser

ainda maior ao utilizar a energia produzida nos horários em que a tarifa é mais cara e utilizar a eletricidade da rede nos horários que não sejam de pico e logo, mais baratos.

5.5.2. Custo de implantação

O custo de implantação (Tabela 5.5.4) que contempla os custo do sistema de aproveitamento energético e do sistema de purificação do biogás foi calculado com base na maior potência alcançada durante o período avaliado de 1.255,37 kW em fevereiro de 2019.

Tabela 5.5.4 Custo de implantação dos sistemas de aproveitamento e purificação

Parâmetros	Valores	
	Mínimo	Máximo
Potência Instalada (kW/dia)	1255,37	
Vazão De Biogás (m ³ /h)	125,54	
Custo Do Sistema De Aproveitamento Energético (R\$)	R\$ 4.361.150,69	R\$ 4.845.722,98
Custo Unitário Do Sistema De Aproveitamento Energético (R\$/kW)	R\$ 3.474,00	R\$ 3.860,00
Custo do Sististema de Purificação (R\$)	R\$ 1.920.086,35	R\$ 2.029.805,57
Custo Unitário Do Sistema De Purificação (R\$/kW)	R\$ 13.510,00	R\$ 14.282,00
Custo Total (R\$)	R\$ 6.281.237,03	R\$ 6.875.528,55

O custo de implantação do sistema de aproveitamento energético varia entre R\$3.474,00 e R\$3.860,00 por kW instalado e o custo do sistema de purificação variando de R\$13.510,00 a R\$14.282,00 por m³/h de biogás. Posto isso, o custo total de implantação do projeto ficaria na margem entre R\$6.281.237,03 e R\$6.875.528,55.

5.5.3. Custo de manutenção

O custo de manutenção (Tabela 5.5.5) se aplica também ao sistema de aproveitamento energético e ao sistema de purificação. O sistema de aproveitamento com a utilização do motor de combustão interna apresentou os custos de R\$0,035 a R\$ 0,039 por kWh ao passo que o sistema de purificação utilizando membranas apresentou um custo de R\$0,251 a R\$0,390 por m³.

Tabela 5.5.5 Custo de manutenção diário em função do mês

Mês	Potência Instalada (kW)	Vazão de Biogás (m ³ /dia)	Custo Do Sistema de Aproveitamento Energético (R\$)		Custo Do Sistema de Purificação (R\$/dia)	
			Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Janeiro	777,09	2.869,2	R\$ 647,90	R\$ 719,89	R\$ 815,01	R\$ 1.266,40
Fevereiro	1.255,37	4.635,2	R\$ 1.046,68	R\$ 1.162,97	R\$ 1.316,63	R\$ 2.045,84
Março	1.141,65	4.215,3	R\$ 951,86	R\$ 1.057,62	R\$ 1.197,36	R\$ 1.860,51
Abril	1.011,83	3.736,0	R\$ 843,62	R\$ 937,36	R\$ 1.061,20	R\$ 1.648,95
Média	1.046,48	3.863,93	R\$ 872,51	R\$ 969,46	R\$ 1.097,55	R\$ 1.705,42

Além disso, ao avaliar os custos médios de manutenção mensal (Figura 5.5.1), verifica-se que o custo total do sistema é composto pelo sistema de aproveitamento energético numa parcela de 39,66% com R\$920,99 por dia ao passo que o sistema de purificação representa 60,34% do custo de manutenção com um valor de R\$1401,49 por dia, totalizando um custo anual médio de R\$511.543,85.

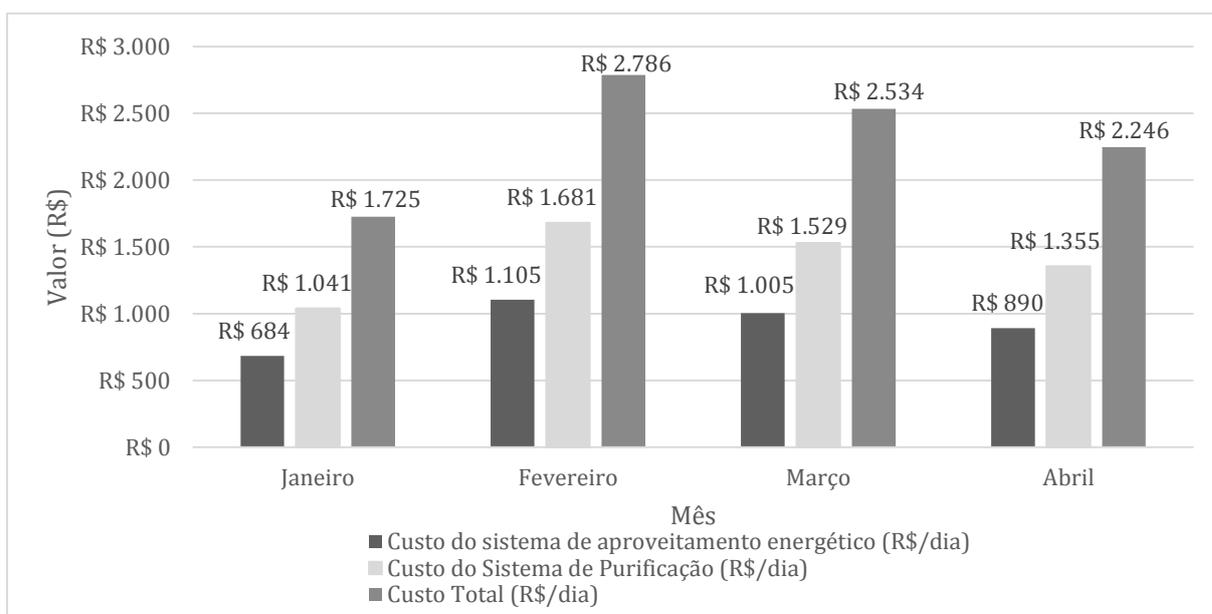


Figura 5.5.1 Custos médio de manutenção diária por mês

Desse modo, a faixa de custos diários por mês no período analisado (Tabela 5.5.6) apresenta uma média de R\$2322,44. Contudo, é esperado que em uma escala temporal maior esse valor também seja superior uma vez que o valor de janeiro se encontra 25,74% abaixo dessa média ao passo que abril apresenta valores bem próximos de 3,31%, mas ainda abaixo da média enquanto fevereiro e março já apresentam valores superiores em 19,96% e 9,09% respectivamente.

Tabela 5.5.6 Custo mensal total

Mês	Custo Mensal (R\$/dia)	
	Mínimo	Máximo
Janeiro	R\$ 1.462,91	R\$ 1.986,29
Fevereiro	R\$ 2.363,31	R\$ 3.208,81
Março	R\$ 2.149,22	R\$ 2.918,13
Abril	R\$ 1.904,82	R\$ 2.586,30
Média	R\$ 1.046,48	R\$ 3.863,93

5.5.4. Balanço financeiro

O balanço financeiro (Tabela 5.5.7) realizado através da comparação entre a receita operacional e os custos de manutenção, no âmbito mensal, apresenta os custos na faixa de 19,85% a 21,28%

do valor do lucro, demonstrando um considerável potencial de retorno com a implantação do projeto.

Tabela 5.5.7 Balanço financeiro mensal

Mês	Lucro Mensal (R\$)		Custo Mensal (R\$)		Receita Líquida Mensal (R\$)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Janeiro	R\$ 84.740,68	R\$ 121.838,83	R\$ 45.350,18	R\$ 61.574,89	R\$ 39.390,50	R\$ 60.263,94
Fevereiro	R\$ 127.109,25	R\$ 181.617,29	R\$ 66.172,59	R\$ 89.846,82	R\$ 60.936,66	R\$ 91.770,47
Março	R\$ 130.454,14	R\$ 185.604,58	R\$ 66.625,68	R\$ 90.462,01	R\$ 63.828,46	R\$ 95.142,56
Abril	R\$ 110.010,37	R\$ 157.108,31	R\$ 57.144,72	R\$ 77.589,10	R\$ 52.865,65	R\$ 79.519,21
Média	R\$ 113.078,61	R\$ 161.542,25	R\$ 58.823,30	R\$ 79.868,20	R\$ 54.255,32	R\$ 81.674,05

O balanço financeiro mensal pode ser ainda visualizado através da Figura 5.5.2 em que ao longo do período analisado obteve-se uma economia bruta média de R\$137.310,43 ao passo que os custos de manutenção e operação representaram aproximadamente 50,5% desse valor, gerando um saldo mensal médio de R\$67.964,68.

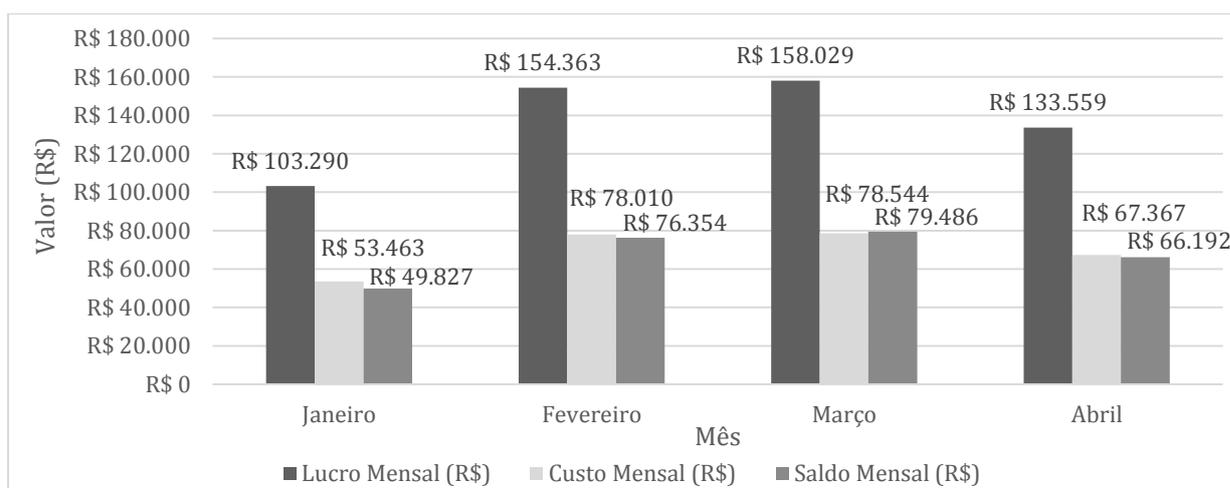


Figura 5.5.2 Balanço financeiro mensal

Desse modo, com a existência de um balanço financeiro positivo e a viabilidade do projeto se pagar após um determinado tempo de operação, calculou-se o prazo de retorno do investimento (Tabela 5.5.8) ao dividir o custo de implantação pela média das receitas líquidas mensais. Chega-se assim ao prazo de retorno do investimento no período de 7,0 a 9,6 anos, um prazo considerado curto e interessante para empreendimentos públicos frente ao prazo de até 35 anos abordado por Palhares (2019), não só pelo seu retorno financeiro que viabiliza o projeto, mas também pelo seu impacto positivo no meio ambiente ao transformar uma problemática em uma solução.

Tabela 5.5.8 Avaliação do Prazo de Retorno do Investimento

Parâmetros	Mínimo	Máximo
Custo de Implantação	R\$ 6.281.237,03	R\$ 6.875.528,55
Saldo Mensal Médio	R\$ 54.255,32	R\$ 81.674,05
PRI (meses)	115,8	84,2
PRI (anos)	9,6	7,0

Outro resultado relevante é a percepção de que o aumento da eficiência da operação tende a gerar lucros numa proporção maior do que a dos custos referentes a esse aumento de rendimento. Essa percepção foi realizada ao observar as faixas mínimas e máximas e verificar que o saldo mensal médio aumenta numa proporção muito maior do que o custo de implantação. Desse modo, o prazo de retorno dos investimentos cairia com o acréscimo de eficiência de 9,6 anos para 7 anos, ao atingir esse patamar.

Por fim, considerou-se a possibilidade de financiamento nos moldes utilizados pela SABESP (2018) na construção da ETE São Lourenço, com um PRI de 210 meses ou 17,5 anos e uma proporção de pagamento anual de 8,59% do valor do projeto. Desse modo o saldo mensal médio não seria mais utilizado exclusivamente para pagar o custo de implantação do projeto, mas geraria um retorno, expressado na Tabela 5.5.9, ao longo de toda a operação do sistema.

Tabela 5.5.9 Valores do investimento com a utilização de financiamento

Valores	Mínimo	Máximo
Custo de Implantação	R\$ 6.281.237,03	R\$ 6.875.528,55
Parcela Anual	R\$ 539.432,64	R\$ 590.470,39
Parcela Mensal	R\$ 44.952,72	R\$ 49.205,87
Saldo Mensal Médio	R\$ 54.255,32	R\$ 81.674,05
Lucro Líquido Mensal	R\$ 9.302,60	R\$ 32.468,18

A utilização de financiamentos reduz a taxa de lucro realizada pelo sistema ao realizar o pagamento de juros. Por outro lado, isso pode ser fundamental a depender do valor do empreendimento e as condições de arcar com ele. Contudo, embora o lucro líquido médio seja consideravelmente inferior ao saldo mensal médio, que seria recebido após a quitação do custo de implantação, dentro desse conjunto de dados e relações referentes a financiamentos, ele ainda é positivo e capaz de se auto pagar.

Além disso, ao considerar o Valor Presente Líquido em que o saldo mensal médio sofreria depreciação ao longo dos anos, o PRI conseqüentemente aumentaria conforme exposto no Anexo I. Com base no Saldo Mensal Médio mínimo de R\$ 54.255,32 e a taxa Selic de 6,50% ao ano ou 0,5261% ao mês como custo de capital seriam necessários 179 meses ou 14,92 anos

e referente ao Saldo Mensal Médio máximo de R\$ 81.674,05 seriam necessários 112 meses ou 9,33 anos para que fosse produzido um VPL positivo e favorável.

Contudo, outros fatores ainda podem influenciar na taxa de depreciação da economia produzida como o custo do kWh pago que de segundo Caesb (2019), esse custo em fevereiro de 2018 era de R\$0,43 ao passo que em abril de 2019 já valia R\$0,56, um aumento de 30,2% em um período de 14 meses. Esse e outros fatores também são sujeitos a ajustes de modo que se recomenda uma análise financeira mais detalhada para assegurar essas informações.

6. CONCLUSÃO

A análise do potencial energético da ETE Brasília Sul com base na produção de metano gerado na digestão anaeróbia dos seus lodos foi possível de ser realizada, embora o curto período avaliado de janeiro a abril de 2019 fosse inferior ao desejado para a análise ao não permitir a análise da influência da sazonalidade na produção de biogás. Desse modo, em função do curto período analisado, é gerada uma certa incerteza com relação a faixa de variação do volume de biogás produzido ao longo dos meses.

O estudo da eficiência energética na digestão anaeróbia de lodos da ETE Brasília Sul foi realizado considerando os fatores mínimos ou usuais na degradação de matéria orgânica de 0,43 $\text{kg}_{\text{SVd}}/\text{kg}_{\text{SV}}$, na produção de biogás de 0,75 $\text{m}^3/\text{kg}_{\text{SVd}}$, na porcentagem de metano no biogás de 65%, entre outros parâmetros que garantissem segurança ao dimensionamento e ainda assim, apresentou resultados favoráveis.

O dimensionamento, mesmo embasado nos limites inferiores da produção de biogás e energia, apresentou um cenário que se mostra bastante propício à implantação do sistema de aproveitamento energético com potencial de reduzir o consumo energético de fontes externas, em média, em 16,69% ao ano, assim como um apresentou um prazo de retorno do investimento no faixa de 7,0 anos a 9,6 anos. Outra análise realizada foi a verificação do VPL ao mensurar a depreciação do valor monetário produzido com base na taxa Selic de 0,5261% ao mês, aumentando esses prazos para a faixa de 112 meses ou 9,33 anos a 179 meses ou 14,92 anos.

Cabe ainda ressaltar que após o fim do prazo de retorno do investimento a ETE Brasília Sul contaria com um lucro mensal avaliado entre R\$54.255,32 a R\$81.674,05. Uma outra maneira de visualizar a viabilidade do projeto seria mediante comparação com o projeto realizado pela SABESP na ETE São Lourenço com a utilização de financiamento cujos valores possibilitariam lucros mensais entre R\$9.302,60 a R\$32.468,18 que apesar de inferiores seriam recebíveis durante toda a sua operação.

Uma vez avaliada a possibilidade de se obter economias com a implantação de um sistema de aproveitamento energético baseado na utilização do lodo, verifica-se conseqüentemente um cenário em que a problemática do desperdício do biogás queimado na ETE Brasília Sul pode ser transformada em uma solução.

A utilização da energia renovável oriunda da digestão de lodo, assim como da digestão de outras fontes de matéria orgânica e outras fontes renováveis, são fontes que se mostram propícias ao

seu aproveitamento em diversas situações, mas ainda carecem de estudos e divulgação do seu potencial para promover a sua utilização e a diversificação da matriz energética no Brasil, aumentando a pequena porcentagem de apenas 0,065% ao passo que reduz o seu potencial gerador de resíduos.

Todavia, a metodologia utilizada, embora estime os valores de financeiros próximos à realidade, ainda apresenta os custos subestimados uma vez que o presente estudo não avaliou todas as fontes de custos como instalações elétricas, sistemas de medição de vazão e composição do biogás para controle de qualidade, tubulação de transporte de biogás, entre outras. A economia estimada também é subestimada uma vez que os valores das tecnologias de aproveitamento energético e purificação do biogás estão desatualizados e os seus desenvolvimentos desde a sua publicação até a atualidade provavelmente reduziram seus custos e aumentaram suas eficiências.

O presente estudo trata-se de uma análise preliminar, importante para sensibilizar e subsidiar estudos mais detalhados para a implantação de um sistema de aproveitamento de biogás na ETE Brasília Sul. Desse modo, com a apresentação do potencial de retorno do aproveitamento de biogás na digestão anaeróbia do lodo, recomenda-se em futuros estudos o seu aprofundamento ao utilizar um maior período como base e um maior detalhamento das estruturas, equipamentos necessários ao seu funcionamento e características relativas ao financiamento do projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Além Sobrinho, P. (1983) “*Estudo dos fatores que influem no processo de lodos ativados - determinação de parâmetros de projeto para esgotos predominantemente domésticos.*” Rev. DAE, 132.
- ANA - Agência Nacional de Águas (2015). “*Resolução N°601/2015 Regulamento do Programa Despoluição de Bacias Hidrográficas – PRODES.*” Brasil.
- Andreoli, C.V., Von Sperling, M. E Fernandes, F. (2014). “*Lodo de esgotos: tratamento e disposição final.*” 2. ed. UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Aquino, S.F.; Chernicharo, C.A.L. (2005). “*Acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV) em reatores anaeróbios sob estresse: causas e estratégias de controle.*” Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental
- Batista, L.F. (2014). *Lodos gerados nas estações de tratamento de Esgotos no distrito federal: um estudo de sua Aptidão para o condicionamento, utilização e Disposição final.* Dissertação de mestrado em tecnologia ambiental e Recursos hídricos. PTARH, UnB, Brasília, DF, Brasil.
- BCB (2019). *Taxa Selic.* Disponível em: <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>> Acesso em julho de 2019.
- Bento, A. P.; Lapolli, F. R. E Spiller V.R. (2005). “*Tratamento de esgoto doméstico em lagoas de estabilização com suportes para o desenvolvimento de perifiton - biofilme.*” [s.l.: s.n.]
- Bilotta, P. E Ross, B. Z. Leite. (2016). “*Estimativa de geração de energia e emissão evitada de gás de efeito estufa na recuperação de biogás produzido em estação de tratamento de esgotos.*” Engenharia Sanitária e Ambiental, vol. 21, no. 2, p. 275–282,
- Bischofsberger, W., Dichtl, N., Rosenwinkel, K.H., Seyfried, C.F., Bohnke, B. (2005). “*Anaerobtechnik.*” Heidelberg: Springer-Verlag. Berlim, Alemanha.
- CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (2015). “*Relatório da*

Administração.” Brasília, DF, Brasil.

CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. (2017). “*Relatório da Administração.*” Brasília, DF, Brasil.

CAESB - Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. (2018). “*Relatório da Administração.*” Brasília, DF, Brasil.

Cassini, S. T. (2003). “*Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás.*” PROSAB, RiMa, Rio de Janeiro, Brasil.

Chernicharo, C.A.L. (2007). “*Reatores anaeróbios.*” DESA/UFMG, Minas Gerais, Brasil.

Chernicharo, C.A.L. (1997). “*Princípios do Tratamento Biológico de Água Residuárias - Vol 5 - Reatores Anaeróbio.*” Segrac, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Chernicharo, C.A.L., Borges, A.M., Mesquita, L.C.P., Dias, A.M.A. (1997). “*Desenvolvimento de um respirômetro automatizado para avaliação da atividade microbiana anaeróbia.*” Revista Engenharia Sanitária.

Chernicharo, C.A.L. (2016). “*Reatores Anaeróbios.*” 2. Ed. Ampl. e Atual. UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

Cherobim, A.P.M.S.; Junior, A.B.L; Rigo, C.M. (2002). *Administração financeira: princípios, fundamentos e práticas brasileiras.* Ed. Elsevier, São Paulo, Brasil.

Coelho, S.T.; Velázquez, S.M.S.G.; Martins, O.S.; Costa, D.F.; Basaglia, F.; Bacic, A.C.K. (2004). “*Instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto.*” USP, São Paulo, Brasil.

Constant, M., Naveau, H., Ferrero, G.L., Nyns, E.J. (1989). “*Biogas End-Use in the European Community.*” Elsevier Science Publisher, Barking, Inglaterra.

Costa, D.F. (2006). “*Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto.*” USP, São Paulo, Brasil.

Copasa (Minas Gerais). *Ete Arrudas: Tratamento De Esgotos. A Nova Prioridade Da Copasa.* Disponível em: <<http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/imprensa/noticias/releases/2012/mai>

o/ete-arrudas-20050310-ie470!/ut/p/a0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfGjzOJ9D LwdPby9Dbz8gzdzDBY9g_zd_T2dgvx8zfULsh0VAfwq3lw!/>. Acesso em: novembro 2018.

David, A.C. (2002). “*Secagem térmica de lodos de esgoto. Determinação da umidade de equilíbrio.*” Dissertação (Mestrado em Energia). Programa de Interunidades de Pós-graduação em Energia – PIPGE (EP/FEA/IEE/IF), USP, São Paulo, Brasil.

De Sena, R.F.; Claudino, A.; Moretti, K.; Bonfanti, I.C.; Moreira, R.F.P.M.; José, H.J. (2007). “*Biofuel application of biomass obtained from a meat industry wastewater plant through the flotation process – A case study.*” *Resources Conservation and Recycling*.

Deublein, D. E Steinhauser, A. (2008). “*Biogas from waste and renewable resources: An introduction.*” Wiley-V CH, Weinheim, Alemanha.

Elfattah, T.A.; Eldrainy, Y.A.; Attia, A. (2016). “*Utilization of Aspen HYSYS simulation to determine the optimum absorber working pressure needed to achieve more than 0.99 methane purity.*” *International Journal of Information Research and Review*.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. (2018). *Relatório Síntese: ano base 2017*. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

Estadão. (2018). *Empresas buscam alternativas a BNDES para financiar projetos em infraestrutura.* Disponível: <<https://economia.estadao.com.br/noticias/geral,empresas-buscam-alternativas-a-bndes-para-financiar-projetos-em-infraestrutura,70002291029>> Acesso em: junho de 2019.

França, A.T.J. (2008). “*Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto.*” UNESP, Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.

GDF (2017). *Plano Distrital de Saneamento Básico: Diagnóstico Situacional - Esgotamento Sanitário*. Disponível em: <<http://www.adasa.df.gov.br/plano-distrital-de-saneamento-basico-e-de-gestao-integrada-de-residuos-solidos>> Brasília, DF, Brasil. Acesso em: Junho de 2019.

- Gitman, L. (2001). *Princípios de administração financeira essencial*. 2. ed., Bookman, Porto alegre, Brasil.
- GUASCOR. *Ano novo, geração nova!: Guascor implanta primeira usina do país com aproveitamento de biogás de uma Estação de Tratamento de Esgoto*. Disponível em: <<http://www.guascor.com.br/conexaoguascor/tag/biogas/>>. Acesso em: novembro 2018.
- Gomes, H.P. (2005). *“Eficiência Hidráulica e Energética em Saneamento: Análise Econômica de Projetos.”* ABES, Rio de Janeiro, Brasil.
- Gomes, G.V; Suda, S.J; Rosa, A.P. E Rodrigues, F.A. (2017). *“Estudo da produção de energia elétrica a partir de biogás com e sem purificação de estação de tratamento de esgoto.”* UFV, Viçosa, Minas Gerais, Brasil.
- Horngren, C.T.; Datar, S.M.; Foster (2000). *Contabilidade de custos*. 9. ed. LTC, Rio de Janeiro, Brasil.
- IBGE. (2011). *“Censo Demográfico 2010.”* Área territorial brasileira, Rio de Janeiro, Brasil.
- IBGE. (2018). *“Estimativas da população residente.”* Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Rio de Janeiro, Brasil.
- IBGE. (2008). *“Pesquisa Nacional de Saneamento Básico.”* Rio de Janeiro, Brasil.
- IBGE. (2000). *“Pesquisa Nacional de Saneamento Básico.”* Departamento de População e Indicadores Sociais, Rio de Janeiro, Brasil.
- Johansson, T.B.; Kelly, H.; Reddy, A.K.N.; Williams, R.H. (1993). *“Renawable energy sources for fuels and electricity.”* Island Press, Washington, EUA.
- Jordão, E. P. (2017). *“Tratamento de esgotos domésticos.”* ABES 8ª edição, Brasil.
- Jordão, E. P. (2015). *“É possível economizar energia nas estações de tratamento de esgoto?”* Revista DAE, Brasil.
- Koga, P.; Possetti, G.R.C.; Rietow, J.C.; Amaral, K.J.; Grauer, A. (2015). *“Geração de energia renovável em uma estação de tratamento anaeróbio de esgotos domésticos.”* 10º Congresso sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural, USP, São Paulo, Brasil.

- Lima, F.P. (2005). *“Energia no tratamento de esgotos: análise tecnológica e institucional para a conservação de energia e o uso do biogás.”* Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, USP, São Paulo, Brasil.
- Lobato, L.C.S. (2011). *“Aproveitamento Energético de Biogás Gerado em Reatores UASB Tratando Esgoto Doméstico.”* Dissertação de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, UFMG, Minas Gerais, Brasil.
- Loureiro, J.M; Kartel, M.T. (2006). *“Combined and Hybrid adsorbents: Fundamentals and applications.”* Springer Science & Business Media, Heidelberg, Alemanha.
- McCarty, P. L. (1964). *“Anaerobic waste treatment fundamentals.”* Public Works, Vol 95 N° 9, 10, 11 e 12, parte quatro, Stanford, California, EUA.
- Metcalf & Eddy. (2003). *“Wastewater engineering, Treatment and Reuse.”* 4ª Edição, McGraw-Hill.
- Morin, P.; Marcos, B.; Moresoli, C.; Laflamme, C.B. (2010). *“Economic and environmental assessment on the energetic valorization of organic material for a municipality in Quebec, Canada.”* Applied Energy. n. 83, p. 275-283, Quebec, Canadá.
- Mujumdar, A.S. (2006). *“Handbook of Industrial Drying:”* Chen, G.; Yue, P.L.; Mujumdar, A.S. *“Dewatering and drying of wastewater treatment sludge.”* 3ª ed., CRC Press, 1312p.
- Nuvolari, A. (2011) *“Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola.”* Editora Blucher.
- Noyola, A.; Morgan-Sagastume, J.M.; López-Hernández, J.E. (2006). *“Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery.”* Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology, Volume 5.

- Oreiro, J.L.; de Paula, L.F.Rodrigues; da Silva, G.J.C.; Amaral, R.Q. (2007). *Por que o Custo do Capital no Brasil é Tão Alto?* Conselho de Política Industrial, da Confederação Nacional da Indústria – CNI, Brasília, Brasil.
- Palhares, G. *Retorno A Curto Ou A Longo Prazo: O Que Vale A Pena Para A Estrutura Do Seu Negócio?* Disponível em: <<https://blog.houer.com.br/estrutura-de-negocio/>> Acesso em junho,2019.
- Park, K.J.; Antonio, G.C.; Oliveira, R. A.; Park, K.J.B. (2007). “*Conceitos de processo e equipamentos de secagem.*” Campinas, São Paulo, brasil.
- Paula Junior, D.R.; Roston, D.M.; Nour, E.A.B.; Mores, L.M.; Camargo, S. A.R. (2002). “*Anaerobic digestion of sewage sludge using sequential reactors.*” Latinamerican Workshop and Symposiun On Anaerobic Digestion, Merida, México.
- Pecora, V. (2006). “*Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso.*” USP, São Paulo, Brasil.
- Platzer, C. J.; Rosenfeldt, S.; Cabral, C. B. G.; Hoffmann, H.; Araujo, R.A. (2015). *Avaliação da viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás por meio de motor-gerador em uma ETE.* 28º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- Perry, R.H.; Green, D.W. (1997). “*Perry’s chemical engineers’ handbook.*” 7ª ed., McGraw-Hill, Nova York, EUA.
- PROBIOGÁS – Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil. (2015). “*Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás.*” Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); Ministério das Cidades, Brasília, DF, Brasil.

PROBIOGÁS – Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil. (2016a). “*Conceitos para o licenciamento ambiental de usinas de biogás.*” Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); Ministério das Cidades, Brasília, DF, Brasil.

PROBIOGÁS – Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil. (2016b). “*Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás.*” Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); Ministério das Cidades, Brasília, DF, Brasil.

PROBIOGÁS – Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil. (2017a). “*Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto.*” Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); 2ª Edição, Ministério das Cidades, Brasília, DF, Brasil.

PROBIOGÁS – Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil. (2017b). “*Guia técnico sobre geração distribuída de energia elétrica por biogás em ETEs.*” Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Ministério das Cidades e Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); Ministério das Cidades, Brasília, DF, Brasil.

Rosa, A.P; Lobato, L.C.S.; Melo, G.C.B.; Chernicharo, C.A.L. (2016). “*Potencial energético e alternativas para o aproveitamento do biogás e lodo de reatores UASB: estudo de caso Estação de tratamento de efluentes Laboreaux (Itabira).*” Vol. 21, Nº 2, Engenharia Sanitária e Ambiental.

SABESP (2018). *Relatório da Administração: Sistema Produtor São Lourenço S.A.* KPMG

- Audidores Independentes, São Paulo, Brasil. Disponível em: <https://www.valor.com.br/sites/default/files/upload_element/05-04_sao_lourenco_balanco_c.pdf> Acesso em junho/2019.
- Sampaio, F.P. (2012). “*Produção centralizada a biogás – Análise do impacto a nível cooperativo.*” Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal.
- Technische Universität Wien. (2012). “*Überblick über Biogasaufbereitungstechnologien zur Produktion von Biomethan.*” Viena, Austria.
- UE. (2010). “*Using official statistics to calculate greenhouse gas emissions - A statistical guide.*” Eurostat, Statistical books.
- USEPA. (2003). “*A brief characterization of gas turbines in combined heat and power applications.*” Environmental Protection Agency, Washington, EUA.
- Van Haandel, A.C., Lettinga, G. (1994). “*Tratamento anaeróbio de esgotos. Um manual para países de clima quente.*” Epgraf, Campina Grande, Paraíba, Brasil.
- Vesilind, P.A. (2003). “*Wastewater treatment plant design.*” Water environment Federation, Alexandria, Virginia, EUA.
- Verma, S. (2002). “*Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes.*” Columbia University, Nova York, EUA.
- Vieira, G.C. (2017). “*Inibição e toxicidade no processo de digestão anaeróbia dos lodos gerados na ETE Brasília Sul: estudo em escala laboratorial.*” Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Von Sperling, M. (1997). “*Lodos ativados.*” 2ª Edição, UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- WEF. (2002). “*Activated Sludge, Manual of Practice no. 9.*”, Water Environment Federation.
- Zanette, A.L. (2009). “*Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil.*” UFRJ,

Rio de Janeiro, Brasil.

Zilotti, H.A.R. (2012). *“Potencial de produção de biogás em uma Estação de tratamento de esgoto de cascavel para a geração de energia elétrica.”* Unioeste, Cascavél, Paraná, Brasil.

ANEXO I

Mês	Faixa de Lucro Mínima		Faixa de Lucro Máxima	
	Fluxo de Caixa	Saldo Atualizado	Fluxo de Caixa	Saldo Atualizado
0	-R\$ 6.281.237,03	-R\$ 6.281.237,03	-R\$ 6.875.528,55	-R\$ 6.875.528,55
1	R\$ 53.971,38	-R\$ 6.227.265,65	R\$ 81.246,61	-R\$ 6.794.281,94
2	R\$ 53.688,92	-R\$ 6.173.576,73	R\$ 80.821,41	-R\$ 6.713.460,53
3	R\$ 53.407,94	-R\$ 6.120.168,79	R\$ 80.398,43	-R\$ 6.633.062,09
4	R\$ 53.128,43	-R\$ 6.067.040,36	R\$ 79.977,67	-R\$ 6.553.084,42
5	R\$ 52.850,39	-R\$ 6.014.189,98	R\$ 79.559,11	-R\$ 6.473.525,31
6	R\$ 52.573,79	-R\$ 5.961.616,18	R\$ 79.142,74	-R\$ 6.394.382,57
7	R\$ 52.298,65	-R\$ 5.909.317,53	R\$ 78.728,55	-R\$ 6.315.654,02
8	R\$ 52.024,95	-R\$ 5.857.292,58	R\$ 78.316,53	-R\$ 6.237.337,49
9	R\$ 51.752,68	-R\$ 5.805.539,91	R\$ 77.906,66	-R\$ 6.159.430,83
10	R\$ 51.481,83	-R\$ 5.754.058,07	R\$ 77.498,94	-R\$ 6.081.931,90
11	R\$ 51.212,40	-R\$ 5.702.845,67	R\$ 77.093,35	-R\$ 6.004.838,55
12	R\$ 50.944,38	-R\$ 5.651.901,29	R\$ 76.689,88	-R\$ 5.928.148,66
13	R\$ 50.677,77	-R\$ 5.601.223,52	R\$ 76.288,53	-R\$ 5.851.860,13
14	R\$ 50.412,55	-R\$ 5.550.810,97	R\$ 75.889,28	-R\$ 5.775.970,85
15	R\$ 50.148,72	-R\$ 5.500.662,25	R\$ 75.492,11	-R\$ 5.700.478,74
16	R\$ 49.886,26	-R\$ 5.450.775,99	R\$ 75.097,03	-R\$ 5.625.381,71
17	R\$ 49.625,19	-R\$ 5.401.150,80	R\$ 74.704,01	-R\$ 5.550.677,70
18	R\$ 49.365,47	-R\$ 5.351.785,33	R\$ 74.313,05	-R\$ 5.476.364,66
19	R\$ 49.107,12	-R\$ 5.302.678,21	R\$ 73.924,13	-R\$ 5.402.440,52
20	R\$ 48.850,12	-R\$ 5.253.828,08	R\$ 73.537,25	-R\$ 5.328.903,27
21	R\$ 48.594,47	-R\$ 5.205.233,62	R\$ 73.152,40	-R\$ 5.255.750,87
22	R\$ 48.340,15	-R\$ 5.156.893,47	R\$ 72.769,56	-R\$ 5.182.981,31
23	R\$ 48.087,16	-R\$ 5.108.806,31	R\$ 72.388,72	-R\$ 5.110.592,59
24	R\$ 47.835,50	-R\$ 5.060.970,81	R\$ 72.009,88	-R\$ 5.038.582,71
25	R\$ 47.585,15	-R\$ 5.013.385,65	R\$ 71.633,02	-R\$ 4.966.949,69
26	R\$ 47.336,12	-R\$ 4.966.049,54	R\$ 71.258,13	-R\$ 4.895.691,56
27	R\$ 47.088,39	-R\$ 4.918.961,15	R\$ 70.885,20	-R\$ 4.824.806,36
28	R\$ 46.841,95	-R\$ 4.872.119,20	R\$ 70.514,23	-R\$ 4.754.292,14
29	R\$ 46.596,81	-R\$ 4.825.522,39	R\$ 70.145,19	-R\$ 4.684.146,95
30	R\$ 46.352,94	-R\$ 4.779.169,45	R\$ 69.778,09	-R\$ 4.614.368,86
31	R\$ 46.110,36	-R\$ 4.733.059,09	R\$ 69.412,91	-R\$ 4.544.955,95
32	R\$ 45.869,04	-R\$ 4.687.190,06	R\$ 69.049,64	-R\$ 4.475.906,31
33	R\$ 45.628,98	-R\$ 4.641.561,07	R\$ 68.688,27	-R\$ 4.407.218,05
34	R\$ 45.390,19	-R\$ 4.596.170,88	R\$ 68.328,79	-R\$ 4.338.889,25
35	R\$ 45.152,64	-R\$ 4.551.018,24	R\$ 67.971,19	-R\$ 4.270.918,06
36	R\$ 44.916,33	-R\$ 4.506.101,91	R\$ 67.615,47	-R\$ 4.203.302,59
37	R\$ 44.681,27	-R\$ 4.461.420,64	R\$ 67.261,61	-R\$ 4.136.040,98

Mês	Faixa de Lucro Mínima		Faixa de Lucro Máxima	
	Fluxo de Caixa	Saldo Atualizado	Fluxo de Caixa	Saldo Atualizado
38	R\$ 44.447,43	-R\$ 4.416.973,22	R\$ 66.909,59	-R\$ 4.069.131,39
39	R\$ 44.214,81	-R\$ 4.372.758,40	R\$ 66.559,43	-R\$ 4.002.571,97
40	R\$ 43.983,42	-R\$ 4.328.774,99	R\$ 66.211,09	-R\$ 3.936.360,88
41	R\$ 43.753,23	-R\$ 4.285.021,75	R\$ 65.864,58	-R\$ 3.870.496,30
42	R\$ 43.524,25	-R\$ 4.241.497,50	R\$ 65.519,88	-R\$ 3.804.976,43
43	R\$ 43.296,47	-R\$ 4.198.201,04	R\$ 65.176,98	-R\$ 3.739.799,45
44	R\$ 43.069,88	-R\$ 4.155.131,16	R\$ 64.835,88	-R\$ 3.674.963,57
45	R\$ 42.844,47	-R\$ 4.112.286,69	R\$ 64.496,56	-R\$ 3.610.467,01
46	R\$ 42.620,25	-R\$ 4.069.666,44	R\$ 64.159,02	-R\$ 3.546.307,99
47	R\$ 42.397,20	-R\$ 4.027.269,24	R\$ 63.823,25	-R\$ 3.482.484,74
48	R\$ 42.175,31	-R\$ 3.985.093,93	R\$ 63.489,23	-R\$ 3.418.995,51
49	R\$ 41.954,59	-R\$ 3.943.139,34	R\$ 63.156,96	-R\$ 3.355.838,55
50	R\$ 41.735,02	-R\$ 3.901.404,32	R\$ 62.826,43	-R\$ 3.293.012,12
51	R\$ 41.516,60	-R\$ 3.859.887,72	R\$ 62.497,63	-R\$ 3.230.514,49
52	R\$ 41.299,33	-R\$ 3.818.588,40	R\$ 62.170,55	-R\$ 3.168.343,94
53	R\$ 41.083,19	-R\$ 3.777.505,21	R\$ 61.845,18	-R\$ 3.106.498,75
54	R\$ 40.868,18	-R\$ 3.736.637,03	R\$ 61.521,52	-R\$ 3.044.977,23
55	R\$ 40.654,30	-R\$ 3.695.982,73	R\$ 61.199,55	-R\$ 2.983.777,68
56	R\$ 40.441,53	-R\$ 3.655.541,20	R\$ 60.879,26	-R\$ 2.922.898,42
57	R\$ 40.229,88	-R\$ 3.615.311,32	R\$ 60.560,65	-R\$ 2.862.337,77
58	R\$ 40.019,34	-R\$ 3.575.291,97	R\$ 60.243,71	-R\$ 2.802.094,06
59	R\$ 39.809,90	-R\$ 3.535.482,07	R\$ 59.928,43	-R\$ 2.742.165,63
60	R\$ 39.601,56	-R\$ 3.495.880,51	R\$ 59.614,79	-R\$ 2.682.550,83
61	R\$ 39.394,31	-R\$ 3.456.486,20	R\$ 59.302,80	-R\$ 2.623.248,03
62	R\$ 39.188,14	-R\$ 3.417.298,07	R\$ 58.992,44	-R\$ 2.564.255,59
63	R\$ 38.983,05	-R\$ 3.378.315,02	R\$ 58.683,71	-R\$ 2.505.571,88
64	R\$ 38.779,03	-R\$ 3.339.535,99	R\$ 58.376,59	-R\$ 2.447.195,29
65	R\$ 38.576,08	-R\$ 3.300.959,91	R\$ 58.071,08	-R\$ 2.389.124,22
66	R\$ 38.374,20	-R\$ 3.262.585,71	R\$ 57.767,16	-R\$ 2.331.357,05
67	R\$ 38.173,37	-R\$ 3.224.412,35	R\$ 57.464,84	-R\$ 2.273.892,21
68	R\$ 37.973,59	-R\$ 3.186.438,76	R\$ 57.164,10	-R\$ 2.216.728,11
69	R\$ 37.774,85	-R\$ 3.148.663,91	R\$ 56.864,93	-R\$ 2.159.863,18
70	R\$ 37.577,16	-R\$ 3.111.086,75	R\$ 56.567,33	-R\$ 2.103.295,84
71	R\$ 37.380,50	-R\$ 3.073.706,25	R\$ 56.271,29	-R\$ 2.047.024,55
72	R\$ 37.184,87	-R\$ 3.036.521,38	R\$ 55.976,80	-R\$ 1.991.047,75
73	R\$ 36.990,27	-R\$ 2.999.531,11	R\$ 55.683,84	-R\$ 1.935.363,91
74	R\$ 36.796,68	-R\$ 2.962.734,43	R\$ 55.392,42	-R\$ 1.879.971,49
75	R\$ 36.604,10	-R\$ 2.926.130,33	R\$ 55.102,53	-R\$ 1.824.868,96
76	R\$ 36.412,54	-R\$ 2.889.717,79	R\$ 54.814,15	-R\$ 1.770.054,80
77	R\$ 36.221,97	-R\$ 2.853.495,82	R\$ 54.527,28	-R\$ 1.715.527,52

Mês	Faixa de Lucro Mínima		Faixa de Lucro Máxima	
	Fluxo de Caixa	Saldo Atualizado	Fluxo de Caixa	Saldo Atualizado
78	R\$ 36.032,41	-R\$ 2.817.463,41	R\$ 54.241,92	-R\$ 1.661.285,60
79	R\$ 35.843,83	-R\$ 2.781.619,58	R\$ 53.958,04	-R\$ 1.607.327,56
80	R\$ 35.656,25	-R\$ 2.745.963,33	R\$ 53.675,66	-R\$ 1.553.651,90
81	R\$ 35.469,64	-R\$ 2.710.493,69	R\$ 53.394,75	-R\$ 1.500.257,15
82	R\$ 35.284,01	-R\$ 2.675.209,68	R\$ 53.115,31	-R\$ 1.447.141,85
83	R\$ 35.099,35	-R\$ 2.640.110,33	R\$ 52.837,33	-R\$ 1.394.304,51
84	R\$ 34.915,66	-R\$ 2.605.194,67	R\$ 52.560,81	-R\$ 1.341.743,71
85	R\$ 34.732,93	-R\$ 2.570.461,74	R\$ 52.285,73	-R\$ 1.289.457,97
86	R\$ 34.551,16	-R\$ 2.535.910,58	R\$ 52.012,10	-R\$ 1.237.445,88
87	R\$ 34.370,34	-R\$ 2.501.540,25	R\$ 51.739,89	-R\$ 1.185.705,98
88	R\$ 34.190,46	-R\$ 2.467.349,79	R\$ 51.469,11	-R\$ 1.134.236,87
89	R\$ 34.011,52	-R\$ 2.433.338,26	R\$ 51.199,75	-R\$ 1.083.037,12
90	R\$ 33.833,53	-R\$ 2.399.504,74	R\$ 50.931,80	-R\$ 1.032.105,32
91	R\$ 33.656,46	-R\$ 2.365.848,28	R\$ 50.665,25	-R\$ 981.440,07
92	R\$ 33.480,32	-R\$ 2.332.367,96	R\$ 50.400,10	-R\$ 931.039,97
93	R\$ 33.305,10	-R\$ 2.299.062,86	R\$ 50.136,33	-R\$ 880.903,64
94	R\$ 33.130,80	-R\$ 2.265.932,05	R\$ 49.873,94	-R\$ 831.029,70
95	R\$ 32.957,41	-R\$ 2.232.974,64	R\$ 49.612,93	-R\$ 781.416,77
96	R\$ 32.784,93	-R\$ 2.200.189,71	R\$ 49.353,28	-R\$ 732.063,49
97	R\$ 32.613,35	-R\$ 2.167.576,36	R\$ 49.094,99	-R\$ 682.968,50
98	R\$ 32.442,67	-R\$ 2.135.133,69	R\$ 48.838,05	-R\$ 634.130,45
99	R\$ 32.272,88	-R\$ 2.102.860,81	R\$ 48.582,46	-R\$ 585.547,98
100	R\$ 32.103,98	-R\$ 2.070.756,83	R\$ 48.328,21	-R\$ 537.219,78
101	R\$ 31.935,97	-R\$ 2.038.820,86	R\$ 48.075,28	-R\$ 489.144,49
102	R\$ 31.768,83	-R\$ 2.007.052,02	R\$ 47.823,68	-R\$ 441.320,81
103	R\$ 31.602,57	-R\$ 1.975.449,45	R\$ 47.573,40	-R\$ 393.747,41
104	R\$ 31.437,18	-R\$ 1.944.012,27	R\$ 47.324,43	-R\$ 346.422,98
105	R\$ 31.272,66	-R\$ 1.912.739,62	R\$ 47.076,75	-R\$ 299.346,23
106	R\$ 31.108,99	-R\$ 1.881.630,63	R\$ 46.830,38	-R\$ 252.515,85
107	R\$ 30.946,18	-R\$ 1.850.684,44	R\$ 46.585,29	-R\$ 205.930,55
108	R\$ 30.784,23	-R\$ 1.819.900,22	R\$ 46.341,49	-R\$ 159.589,06
109	R\$ 30.623,12	-R\$ 1.789.277,10	R\$ 46.098,97	-R\$ 113.490,10
110	R\$ 30.462,85	-R\$ 1.758.814,24	R\$ 45.857,71	-R\$ 67.632,39
111	R\$ 30.303,43	-R\$ 1.728.510,82	R\$ 45.617,71	-R\$ 22.014,67
112	R\$ 30.144,84	-R\$ 1.698.365,98	R\$ 45.378,97	R\$ 23.364,30
113	R\$ 29.987,07	-R\$ 1.668.378,91	R\$ 45.141,49	R\$ 68.505,79
114	R\$ 29.830,14	-R\$ 1.638.548,77	R\$ 44.905,24	R\$ 113.411,02
115	R\$ 29.674,02	-R\$ 1.608.874,75	R\$ 44.670,23	R\$ 158.081,25
116	R\$ 29.518,72	-R\$ 1.579.356,02	R\$ 44.436,45	R\$ 202.517,70
117	R\$ 29.364,24	-R\$ 1.549.991,79	R\$ 44.203,89	R\$ 246.721,59

Mês	Faixa de Lucro Mínima		Faixa de Lucro Máxima	
	Fluxo de Caixa	Saldo Atualizado	Fluxo de Caixa	Saldo Atualizado
118	R\$ 29.210,56	-R\$ 1.520.781,22	R\$ 43.972,55	R\$ 290.694,15
119	R\$ 29.057,69	-R\$ 1.491.723,53	R\$ 43.742,42	R\$ 334.436,57
120	R\$ 28.905,62	-R\$ 1.462.817,92	R\$ 43.513,50	R\$ 377.950,07
121	R\$ 28.754,34	-R\$ 1.434.063,58	R\$ 43.285,77	R\$ 421.235,84
122	R\$ 28.603,86	-R\$ 1.405.459,72	R\$ 43.059,24	R\$ 464.295,08
123	R\$ 28.454,16	-R\$ 1.377.005,56	R\$ 42.833,89	R\$ 507.128,97
124	R\$ 28.305,24	-R\$ 1.348.700,32	R\$ 42.609,72	R\$ 549.738,69
125	R\$ 28.157,11	-R\$ 1.320.543,21	R\$ 42.386,72	R\$ 592.125,41
126	R\$ 28.009,75	-R\$ 1.292.533,46	R\$ 42.164,89	R\$ 634.290,30
127	R\$ 27.863,16	-R\$ 1.264.670,30	R\$ 41.944,22	R\$ 676.234,53
128	R\$ 27.717,34	-R\$ 1.236.952,95	R\$ 41.724,71	R\$ 717.959,24
129	R\$ 27.572,28	-R\$ 1.209.380,67	R\$ 41.506,35	R\$ 759.465,58
130	R\$ 27.427,99	-R\$ 1.181.952,69	R\$ 41.289,12	R\$ 800.754,71
131	R\$ 27.284,44	-R\$ 1.154.668,24	R\$ 41.073,04	R\$ 841.827,75
132	R\$ 27.141,65	-R\$ 1.127.526,59	R\$ 40.858,08	R\$ 882.685,83
133	R\$ 26.999,60	-R\$ 1.100.526,99	R\$ 40.644,25	R\$ 923.330,08
134	R\$ 26.858,30	-R\$ 1.073.668,69	R\$ 40.431,54	R\$ 963.761,63
135	R\$ 26.717,74	-R\$ 1.046.950,95	R\$ 40.219,95	R\$ 1.003.981,58
136	R\$ 26.577,91	-R\$ 1.020.373,03	R\$ 40.009,46	R\$ 1.043.991,03
137	R\$ 26.438,82	-R\$ 993.934,21	R\$ 39.800,07	R\$ 1.083.791,10
138	R\$ 26.300,45	-R\$ 967.633,76	R\$ 39.591,78	R\$ 1.123.382,88
139	R\$ 26.162,81	-R\$ 941.470,95	R\$ 39.384,57	R\$ 1.162.767,45
140	R\$ 26.025,89	-R\$ 915.445,06	R\$ 39.178,46	R\$ 1.201.945,91
141	R\$ 25.889,68	-R\$ 889.555,38	R\$ 38.973,42	R\$ 1.240.919,33
142	R\$ 25.754,19	-R\$ 863.801,19	R\$ 38.769,45	R\$ 1.279.688,78
143	R\$ 25.619,41	-R\$ 838.181,78	R\$ 38.566,55	R\$ 1.318.255,33
144	R\$ 25.485,33	-R\$ 812.696,45	R\$ 38.364,72	R\$ 1.356.620,05
145	R\$ 25.351,95	-R\$ 787.344,50	R\$ 38.163,94	R\$ 1.394.783,99
146	R\$ 25.219,27	-R\$ 762.125,23	R\$ 37.964,21	R\$ 1.432.748,19
147	R\$ 25.087,29	-R\$ 737.037,94	R\$ 37.765,52	R\$ 1.470.513,71
148	R\$ 24.956,00	-R\$ 712.081,94	R\$ 37.567,88	R\$ 1.508.081,59
149	R\$ 24.825,39	-R\$ 687.256,56	R\$ 37.371,27	R\$ 1.545.452,86
150	R\$ 24.695,47	-R\$ 662.561,09	R\$ 37.175,69	R\$ 1.582.628,54
151	R\$ 24.566,22	-R\$ 637.994,87	R\$ 36.981,13	R\$ 1.619.609,67
152	R\$ 24.437,66	-R\$ 613.557,21	R\$ 36.787,59	R\$ 1.656.397,26
153	R\$ 24.309,76	-R\$ 589.247,45	R\$ 36.595,06	R\$ 1.692.992,32
154	R\$ 24.182,54	-R\$ 565.064,91	R\$ 36.403,54	R\$ 1.729.395,86
155	R\$ 24.055,98	-R\$ 541.008,93	R\$ 36.213,03	R\$ 1.765.608,89
156	R\$ 23.930,08	-R\$ 517.078,85	R\$ 36.023,51	R\$ 1.801.632,40
157	R\$ 23.804,85	-R\$ 493.274,00	R\$ 35.834,98	R\$ 1.837.467,37

Mês	Faixa de Lucro Mínima		Faixa de Lucro Máxima	
	Fluxo de Caixa	Saldo Atualizado	Fluxo de Caixa	Saldo Atualizado
158	R\$ 23.680,26	-R\$ 469.593,73	R\$ 35.647,44	R\$ 1.873.114,81
159	R\$ 23.556,33	-R\$ 446.037,40	R\$ 35.460,88	R\$ 1.908.575,69
160	R\$ 23.433,05	-R\$ 422.604,35	R\$ 35.275,29	R\$ 1.943.850,98
161	R\$ 23.310,42	-R\$ 399.293,93	R\$ 35.090,68	R\$ 1.978.941,67
162	R\$ 23.188,42	-R\$ 376.105,51	R\$ 34.907,04	R\$ 2.013.848,70
163	R\$ 23.067,07	-R\$ 353.038,44	R\$ 34.724,35	R\$ 2.048.573,05
164	R\$ 22.946,35	-R\$ 330.092,09	R\$ 34.542,62	R\$ 2.083.115,68
165	R\$ 22.826,26	-R\$ 307.265,83	R\$ 34.361,85	R\$ 2.117.477,52
166	R\$ 22.706,80	-R\$ 284.559,04	R\$ 34.182,01	R\$ 2.151.659,53
167	R\$ 22.587,96	-R\$ 261.971,08	R\$ 34.003,12	R\$ 2.185.662,66
168	R\$ 22.469,75	-R\$ 239.501,33	R\$ 33.825,17	R\$ 2.219.487,83
169	R\$ 22.352,15	-R\$ 217.149,17	R\$ 33.648,15	R\$ 2.253.135,97
170	R\$ 22.235,17	-R\$ 194.914,00	R\$ 33.472,05	R\$ 2.286.608,02
171	R\$ 22.118,81	-R\$ 172.795,19	R\$ 33.296,87	R\$ 2.319.904,90
172	R\$ 22.003,05	-R\$ 150.792,14	R\$ 33.122,62	R\$ 2.353.027,51
173	R\$ 21.887,90	-R\$ 128.904,24	R\$ 32.949,27	R\$ 2.385.976,78
174	R\$ 21.773,35	-R\$ 107.130,90	R\$ 32.776,83	R\$ 2.418.753,61
175	R\$ 21.659,40	-R\$ 85.471,50	R\$ 32.605,30	R\$ 2.451.358,91
176	R\$ 21.546,04	-R\$ 63.925,46	R\$ 32.434,66	R\$ 2.483.793,57
177	R\$ 21.433,28	-R\$ 42.492,17	R\$ 32.264,91	R\$ 2.516.058,48
178	R\$ 21.321,11	-R\$ 21.171,06	R\$ 32.096,05	R\$ 2.548.154,53
179	R\$ 21.209,53	R\$ 38,47	R\$ 31.928,08	R\$ 2.580.082,61
180	R\$ 21.098,53	R\$ 21.137,00	R\$ 31.760,99	R\$ 2.611.843,60
181	R\$ 20.988,11	R\$ 42.125,11	R\$ 31.594,77	R\$ 2.643.438,36
182	R\$ 20.878,27	R\$ 63.003,38	R\$ 31.429,41	R\$ 2.674.867,78
183	R\$ 20.769,01	R\$ 83.772,39	R\$ 31.264,93	R\$ 2.706.132,71
184	R\$ 20.660,31	R\$ 104.432,70	R\$ 31.101,31	R\$ 2.737.234,01
185	R\$ 20.552,19	R\$ 124.984,89	R\$ 30.938,54	R\$ 2.768.172,55
186	R\$ 20.444,63	R\$ 145.429,51	R\$ 30.776,62	R\$ 2.798.949,17
187	R\$ 20.337,63	R\$ 165.767,15	R\$ 30.615,55	R\$ 2.829.564,73
188	R\$ 20.231,19	R\$ 185.998,34	R\$ 30.455,33	R\$ 2.860.020,06
189	R\$ 20.125,32	R\$ 206.123,66	R\$ 30.295,94	R\$ 2.890.316,00
190	R\$ 20.019,99	R\$ 226.143,65	R\$ 30.137,39	R\$ 2.920.453,39