

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Análise da Viabilidade Econômica da Recuperação do Biogás Produzido em  
Estações de Tratamento de Esgoto e do Potencial Disponível no Estado de  
Minas Gerais**

**Laura Dardot Campello**

**Itajubá, dezembro de 2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Laura Dardot Campello**

**Análise da Viabilidade Econômica da Recuperação do Biogás Produzido em  
Estações de Tratamento de Esgoto e do Potencial Disponível no Estado de  
Minas Gerais**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia de Energia como parte  
dos requisitos para obtenção do Título de Mestre  
em Ciências em Engenharia de Energia.**

**Área de Concentração: Energia, Sociedade e Meio  
Ambiente.**

**Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Regina Mambeli Barros  
Co-orientador: Prof. Dr. Geraldo Lucio Tiago Filho**

**Dezembro de 2017  
Itajubá**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

**Laura Dardot Campello**

**Análise da Viabilidade Econômica da Recuperação do Biogás Produzido em  
Estações de Tratamento de Esgoto e do Potencial Disponível no Estado de  
Minas Gerais**

Dissertação aprovada por banca examinadora em 07 de dezembro de 2017, apresentado conferindo ao autor o título de ***Mestre em Engenharia de Energia.***

**Banca Examinadora:**

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Regina Mambeli Barros (Orientador)  
Prof. Dr. Geraldo Lucio Tiago Filho (Co-orientador)  
Prof. Dr. Rubenildo Vieira Andrade  
Prof. Dr. Valdir Schalch

**Itajubá  
2017**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Jacques, pelo apoio e companheirismo que foram imprescindíveis para o sucesso dessa jornada.

À minha família, pelo amor e carinho.

Aos meus amigos do CERPCH, pela amizade, incentivo e risadas.

À professora Prof. Dra Regina Mambeli Barros pela oportunidade e orientação.

Ao professor Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho pelas contribuições e auxílio.

A Capes pela concessão de bolsa de mestrado (processo número 1648634).

## RESUMO

O saneamento básico no Brasil, apesar de ter evoluído bastante nos últimos anos, ainda enfrenta graves problemas, portanto, o estudo de tecnologias que possam viabilizar a implantação de sistemas de tratamento de esgoto torna-se fundamental para que o país atinja as metas estabelecidas no Plano Nacional de Saneamento Básico, de 2013. Nesse sentido, este estudo teve como objetivo avaliar o potencial energético e a viabilidade econômica da exploração energética do biogás proveniente da digestão anaeróbia de esgotos e lodo de esgotos em Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) no estado de Minas Gerais, a luz das Resoluções Normativas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) 482/2012 e 687/2015, que estabeleceram o sistema de compensação de energia pela mini e microgeração distribuída. O estudo também objetivou estimar o potencial de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) com a aplicação do sistema de recuperação de metano. Foram utilizadas quatro metodologias para determinação do potencial de produção do biogás produzido pela digestão anaeróbia de esgotos via reator anaeróbio de leito fluidizado (RALF), além de uso dados experimentais para avaliação da produção de biogás pela biodigestão anaeróbia do lodo remanescente do tratamento de esgotos. Para os cálculos de produção de biogás foram utilizados dados reais de volume de esgoto tratado e população atendida com esgotamento sanitário apresentados no relatório do Diagnóstico de Serviços Água e Esgoto – 2015 (BRASIL, 2017). Os resultados indicaram que este sistema é economicamente viável na maioria das cidades acima de 50.000 habitantes, sendo que 86% dos municípios com população entre 50.000 e 150.000, 67% dos municípios com população entre 150.000 e 250.000 e 100% dos municípios com população superior a 250.000 apresentaram Valor Presente Líquido (VPL) positivo e Taxa Interna de Retorno (TIR) maior que a taxa de atratividade (8%). O tempo de retorno do investimento (payback) médio nos municípios onde o investimento se mostrou viável foi de 1,25 anos para as cidades com população superior a 250.000 habitantes, 4,49 anos as cidades com população entre 150.000 e 250.000, 2,08 anos para as cidades com população entre 50.000 e 150.000 habitantes e de 7,97 anos para as cidades com população inferior a 50.000 habitantes. Foi identificado um potencial de geração de eletricidade de cerca de 47.140 MWh por ano e um potencial de redução de emissões de GEEs próximo de 325.800 tCO<sub>2</sub>eq/ano com a implantação do sistema de recuperação energética de metano nas ETEs de Minas Gerais.

**Palavras-chave:** tratamento anaeróbio de esgotos, biogás, lodo, recuperação energética de metano.

## ABSTRACT

Basic sanitation in Brazil, despite having evolved significantly in recent years, still faces serious problems, therefore, the study of technologies that can make the implantation of sewage treatment systems feasible is fundamental for the country to reach the goals established in the National Plan of Basic Sanitation of 2013. In this sense, this study aimed to evaluate the potential energy and economic viability of biogas energy exploration from the anaerobic digestion of sewage and sewage sludge in Wastewater Treatment Plants (WWTPs) in the state of Minas Gerais, considering the Normative Resolutions of the National Electric Energy Agency (ANEEL) 482 / 2012 and 687/2015. These resolutions established the system of compensation for energy produced by mini and distributed microgeneration. The present study also aimed to estimate the potential to reduce greenhouse gas (GHG) emissions with the application of the methane recovery system. Four methodologies were used to determine the biogas production potential produced by anaerobic digestion of sewage via UASB, in addition to using experimental data to evaluate the biogas production by the anaerobic biodigestion of the remaining sludge from the sewage treatment. For the biogas production calculations, real data on the volume of treated sewage and population served with sanitary sewage, as presented in the Water and Sewage Services Diagnostic report - 2015 (BRASIL, 2017), were used. The results indicated that this system is economically viable in most cities with over 50,000 inhabitants; 86% of municipalities with a population between 50,000 and 150,000, 67% of municipalities with a population between 150,000 and 250,000, and 100% of municipalities with a population greater than 250,000 had positive NPV and IRR that were greater than the attractive rate (8%)The average payback time in municipalities where the investment was viable was 1.25 years for cities with populations greater than 250,000, 4.49 years for cities with populations between 150,000 and 250,000, 2.08 years for cities with populations between 50,000 and 150,000, and 7.97 years for cities with populations of less than 50,000 people. Adding the methane energy recovery system in the WWTPs of Minas Gerais leads to a potential electricity production value of around 47,140 MWh per year and a GHG emission reduction potential of close to 325,800 tCO<sub>2</sub>eq per year.

**Keywords:** Anaerobic treatment of sewage, biogas, sludge, methane energy recovery.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Etapas e microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia .....	21
Figura 3.2 - Etapas de gerenciamento do lodo e principais processos utilizados.....	33
Figura 3.3 - Fluxogramas usuais de tratamento e disposição do lodo.....	34
Figura 3.4 – Diagrama esquemático do reator UASB .....	37
Figura 3.5 – Esquema de um digestor anaeróbio e lodo cilíndrico .....	42
Figura 3.6 – Principais aplicações do biogás.....	48
Figura 3.7 – Fluxograma simplificado do ciclo a vapor.....	49
Figura 3.8 – Fluxograma Ciclo Rankine simples .....	49
Figura 3.9 – Fluxograma simplificado da turbina a gás .....	50
Figura 3.10 – Fluxograma Ciclo Brayton.....	50
Figura 3.11 – Fluxograma Ciclo Combinado .....	51
Figura 3.12 – Ciclo Otto.....	52
Figura 3.13 – Ciclo Diesel.....	52
Figura 3.14 – Ciclo Stirling .....	53
Figura 4.1 – Fluxograma da recuperação energética do biogás .....	68
Figura 5.1 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com menos de 50.000 habitantes.....	83
Figura 5.2 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com 50.000 a 150.000 habitantes.....	84
Figura 5.3 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com 150.000 a 250.000 habitantes.....	85
Figura 5.4 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com mais de 250.000 habitantes.....	86
Figura 5.5 - Comparação entre as metodologias empregadas nos cálculos de potencial de produção de energia elétrica através do biogás proveniente do tratamento anaeróbio de esgotos. ....	87

Figura 5.6 - Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com menos de 50.000 habitantes.....	89
Figura 5.7 - Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com 50.000 a 150.000 habitantes .....	89
Figura 5.8 – Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com 150.000 a 250.000 habitantes .....	90
Figura 5.9 - Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com mais de 250.000 habitantes.....	91
Figura 5.10 – Produção de energia elétrica através do biogás oriundo do lodo de esgotos com dados experimentais de Felca (2016) e Moni Silva (2016).....	91
Figura 5.11 – Custo total de investimento para população menor que 50.000 habitantes .....	92
Figura 5.12 – Custo evitado de energia por mês (benefício) para população menor que 50.000 habitantes.....	93
Figura 5.13 – VPL para população menor que 50.000 habitantes.....	93
Figura 5.14 – TIR para população menor que 50.000 habitantes.....	94
Figura 5.15 – Payback para população menor que 50.000 habitantes.....	94
Figura 5.16 – Custo total de investimento para população entre 50.000 e 150.000 habitantes	95
Figura 5.17 – Custo evitado de energia por mês (benefício) para população entre 50.000 e 150.000 habitantes.....	95
Figura 5.18 – VPL para população entre 50.000 e 150.000 habitantes.....	96
Figura 5.19 – TIR para população entre 50.000 e 150.000 habitantes .....	96
Figura 5.20 – Payback para população entre 50.000 e 150.000 habitantes.....	97
Figura 5.21 – Custo total de investimento para população entre 150.000 e 250.000 habitantes .....	98
Figura 5.22 – Custo evitado de energia por mês (benefício) para população entre 150.000 e 250.000 habitantes.....	98
Figura 5.23 – VPL para população entre 150.000 e 250.000 habitantes.....	99
Figura 5.24 – TIR para população entre 150.000 e 250.000 habitantes .....	99

Figura 5.25 - Payback para população entre 150.000 e 250.000 habitantes.....	100
Figura 5.26 – Custo total de investimento para população superior a 250.000 habitantes ....	101
Figura 5.27 – Custo evitado de energia por mês (benefício) para população superior a 250.000 habitantes.....	101
Figura 5.28 – VPL para população superior a 250.000 habitantes.....	102
Figura 5.29 – TIR para população superior a 250.000 habitantes.....	102
Figura 5.30 - Payback para população superior a 250.000 habitantes .....	103

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Classificação dos sólidos totais presentes nos esgotos.....	25
Tabela 3.2 - Dados de contribuição per capita e concentração dos principais parâmetros físicos dos esgotos. ....	26
Tabela 3.3 - Concentrações típicas de microrganismos em esgotos.....	27
Tabela 3.4 – Características e quantidade de lodo produzidos em diversos sistemas de tratamento de esgoto.....	31
Tabela 3.5 – Resumo das informações do tratamento com reator UASB.....	37
Tabela 3.6 – Resultados das simulações de balanço de massa em termos de DQO, considerando todas as rotas de conversão .....	41
Tabela 3.7 – Resultados para a produção de metano, biogás e energia no tratamento de esgoto doméstico com reatores UASB.....	41
Tabela 3.8 – Condições e rendimentos das tecnologias de conversão de energia.....	56
Tabela 5.1– Dados do saneamento básico dos municípios com população menor que 50.000 habitantes.....	75
Tabela 5.2– Dados do saneamento básico dos municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes.....	81
Tabela 5.3– Dados do saneamento básico dos municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes.....	82
Tabela 5.4– Dados do saneamento básico dos municípios com população maior que 250.000 habitantes.....	82
Tabela 5.5 – Resultados da análise econômica do ponto de vista do estado de MG.....	104
Tabela 5.6 - Estimativa do potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) no estado de Minas Gerais.....	105

## SIMBOLOGIA

DQO	Demanda química de oxigênio
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO <sub>CH4</sub>	Carga de DQO convertida em metano
Q <sub>med</sub>	Vazão média afluyente
S <sub>0</sub>	Concentração de DQO afluyente
S	Concentração de DQO efluyente
Y <sub>OBS</sub>	Coefficiente de produção de sólidos no sistema em termos de DQO
Q <sub>CH4</sub>	Produção volumétrica de metano
K(t)	Fator de correção para a temperatura operacional do reator
P	Pressão atmosférica
K <sub>DQO</sub>	DQO correspondente a um mol CH <sub>4</sub>
R	Constante dos gases
T	Temperatura operacional do reator
Q <sub>biogás</sub>	Produção volumétrica de biogás
Q <sub>CH4</sub>	Produção volumétrica de metano
C <sub>CH4</sub>	Concentração de metano no biogás
P <sub>XV</sub>	Produção líquida de massa celular
Y	Coefficiente de crescimento celular
E <sub>f</sub>	Eficiência na utilização do resíduo;
DBO <sub>ult</sub>	Carga de DBO <sub>ult</sub> do lodo cru afluyente ao digestor
k <sub>d</sub>	Coefficiente de morte celular ou endógeno
θ <sub>c</sub>	Tempo de residência celular ou período de digestão
V <sub>CH4</sub>	Volume de metano produzido por dia
P <sub>d</sub>	Potência disponível
PC <sub>CH4</sub>	Poder calorífico do metano
P <sub>e</sub>	Potencia elétrica efetiva gerada
η	Rendimento da conversão elétrica
E	Energia produzida
h	Número de horas de operação por dia
d	Número de dias em operação por ano ou mês
V <sub>afl</sub>	Vazão média de esgoto afluyente

Pop	Número de habitantes
$C_{PC}$	Contribuição per capita de esgoto
$DQO_{removida}$	DQO removida do sistema por dia
$C_{PCDQO}$	Contribuição per capita de DQO por dia
$E_{DQO}$	Eficiência da remoção de DQO
$DQO_{lodo}$	Fração de DQO convertida em lodo por dia
$Y_{DQO}$	Coefficiente de produção de sólidos
$CO_{SO_4 \text{ convertido}}$	Carga de sulfato convertida em sulfeto
$C_{SO_4}$	Concentração média de $SO_4$ afluyente
$E_{SO_4}$	Eficiência da remoção de sulfato
$DQO_{SO_4}$	DQO usada pelas bactérias redutoras de sulfato na redução de sulfato
$K_{DQO-SO_4}$	DQO consumida na redução do sulfato
$Q_{W-CH_4}$	Perda de metano como gás residual no reator
$P_W$	Percentual de metano em estado gasoso perdido como gás residual
$Q_{O-CH_4}$	Perdas de metano no estado gasoso como vazamentos
$P_O$	Percentual de metano em estado gasoso como vazamentos
$Q_{L-CH_4}$	Perda de metano em estado líquido dissolvido no efluente tratado
$\rho_L$	Concentração de metano dissolvido no efluente tratado
$f_{CH_4}$	Fator de conversão do metano em DQO
$Q_{liquido-CH_4}$	Produção líquida de metano disponível para reaproveitamento energético
$PE_{disponível-CH_4}$	Energia potencial disponível para reaproveitamento energético
$Q_{N-liquido-CH_4}$	Produção de metano normalizada
TOW	Total de matéria orgânica
I	Fator de correção para contribuição industrial nas redes coletoras
EF	Fatores de emissão
$B_0$	Capacidade máxima de produção de $CH_4$
MCF	Fator de correção para o $CH_4$ de acordo com a via de tratamento e/ou destinação final
Emissões $CH_4$	Emissões de $CH_4$ durante o ano
MO	Matéria orgânica convertida em lodo
$U_i$	Fração da população para cada grupo i
$T_{i,j}$	Grau de utilização da via de tratamento e/ou eliminação j para cada grupo i;
Rec	$CH_4$ recuperado

$BE_{WW,treatment,y}$	Emissões de metano pelo tratamento de esgoto no ano y
$Q_{WW,i,j}$	Volume de esgoto tratado
$COD_{inf\ low\ i,j}$	DQO afluente
$MCF_{WW,treatment,BL,i}$	Fator de emissão de metano conforme IPCC (2006)
$B_{o,WW}$	Capacidade de produção do metano de esgoto conforme IPCC (2006)
$UF_{BL}$	Fator de correção para incertezas
$GWP_{CH4}$	Potencial de aquecimento global do metano
$\rho_{CH4}$	Densidade do metano
$Pb_i$	Produção de biogás
$f_{DBO5}$	Fator de emissão de DBO típico de metano
$MFPM$	Capacidade máxima de produção de CH <sub>4</sub>
$VE$	Massa específica do metano
$Mt$	Matéria total enviada por habitante por dia
$FC_t$	Fluxo de caixa no ano t
$i_{desc}$	Taxa de desconto
t	Ano considerado no fluxo de caixa
n	Vida útil do projeto
$CI_{total}$	Custo de investimento total
$CI_{gerador}$	Custo de investimento do gerador
$CI_{gasômetro}$	Custo de investimento do gasômetro
$CI_{compressor}$	Custo de investimento do compressor
$CI_{dessulfurizador}$	Custo de investimento do dessulfurizador
$CI_{biodigestor}$	Custo de investimento do biodigestor de lodo
$CE$	Custo evitado de energia elétrica
$TE$	Tarifa de energia elétrica paga pela ETE
$P_{fin}$	Valor da parcela do financiamento paga anualmente a instituição financeira
$RD$	Razão da dívida
i	Taxa anual de juros
ni	Prazo da dívida
$FC_t$	Fluxo de caixa no ano t
$FC_0$	Fluxo de caixa no ano 0
$TIR$	Taxa interna de retorno
$VPL$	Valor presente líquido

## SUMÁRIO

1. Introdução .....	16
2. Objetivos .....	19
3. Revisão Bibliográfica.....	20
3.1 Origem do biogás.....	20
3.2 Insumos para produção do biogás.....	23
3.2.1 Esgotos sanitários .....	25
3.2.2 O lodo .....	31
3.3 Geração de biogás em ETEs .....	36
3.3.1 Reatores UASB .....	36
3.3.2 Digestores anaeróbios de lodo.....	42
3.4 Geração de energia em ETEs.....	44
3.4.1 Processamento do biogás.....	44
3.4.2 Aplicações do biogás .....	47
3.4.3 Geração de energia elétrica.....	56
4. Metodologia .....	58
4.1 Levantamento das informações relativas ao saneamento básico no município do estado de Minas Gerais. ....	58
4.2 Cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no tratamento anaeróbio.....	59
4.3 Cálculo da produção de biogás e metano através da biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB.....	66
4.4 Análise da viabilidade econômica da implantação do sistema de recuperação energética do metano produzido no tratamento de esgotos e na digestão anaeróbia do lodo nos municípios analisados .....	67
4.5 Estimativa do potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) no estado de Minas Gerais .....	72

5. Resultados e Discussões.....	75
5.1 Levantamento das informações relativas ao saneamento básico no município do estado de Minas Gerais .....	75
5.2 Cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no tratamento anaeróbio de esgotos.....	82
5.3 Discussão dos resultados gerados por cada metodologia empregada no cálculo da produção de biogás e metano nos municípios analisados.....	86
5.4 Cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB .....	88
5.5 Análise da viabilidade econômica da implantação do sistema de recuperação energética do metano produzido no tratamento de esgotos e digestão anaeróbia do lodo nos municípios analisados .....	92
5.6 Estimativa do potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) no estado de Minas Gerais .....	105
6. Conclusões .....	106
7. Sugestões para trabalhos futuros .....	109
Referências Bibliográficas.....	110
Anexo A – Resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no tratamento anaeróbio de esgotos.....	120
Anexo B - Resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB.....	128
Anexo C – Resultados da análise da viabilidade econômica da implantação do sistema de recuperação energética do metano produzido no tratamento de esgotos e na digestão anaeróbia lodo nos municípios analisados. ....	135

# 1. Introdução

O tratamento de esgoto no Brasil ainda hoje não é uma prática universalizada. Somente em 2007 a Lei 11.445 (BRASIL, 2007) estabeleceu as diretrizes nacionais de saneamento básico. Em 2013 foi criado então o Plano Nacional de Saneamento Básico, PLANSAB (BRASIL, 2013b), que reuniu dados de diagnóstico da situação atual do saneamento básico no país, e estabeleceu prazos e metas para melhorias no setor. De acordo com o documento, em 2008 o percentual de tratamento do esgoto coletado no país era de 58%, ao passo que na região sudeste esse percentual era de 46%. Isto é, menos da metade do esgoto coletado na região com maior renda per capita do país (IBGE, 2016) recebia algum tipo de tratamento antes de ser lançado nos cursos d'água. Com intuito de reverter este quadro, foi publicada a Portaria Interministerial nº. 571 (BRASIL, 2013a) que estabeleceu algumas metas para o tratamento de esgoto no país, apresentadas no PLANSAB (BRASIL, 2013b):

- Para 2023 a meta é de que 77% do esgoto coletado no país sejam tratados, sendo que para a região sudeste o percentual desejado é de 72%.
- Já para 2033 a meta é de que 93% do esgoto coletado no país sejam tratados, sendo que o percentual para a região sudeste é de 90%.

O relatório de pesquisa do Sistema Estadual de Informações sobre Saneamento (SEIS) (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2017) aponta que em Minas Gerais o percentual de coleta de esgoto subiu de 68,23% em 2009 para 74,53% em 2011. Ainda segundo a pesquisa, em 2011 os números de estações de tratamento de esgoto projetadas, com projeto em andamento ou em construção, somavam 533 unidades localizadas em 425 municípios e distritos.

Estes dados indicam que o índice de tratamento de esgoto no país tende a subir de forma rápida e com isso, os resíduos gerados pelos diversos tipos de tratamentos também. A Lei nº 12.305/10 (BRASIL, 2010a) instituiu e o Decreto nº 7.404/10 (BRASIL, 2010c) regulamentou a Política Nacional de Resíduos Sólidos e, com ela a responsabilidade compartilhada em relação ao manejo dos resíduos gerados, além de fornecer diretrizes para o gerenciamento destes resíduos. Para tal, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Dessa forma, o gerenciamento dos resíduos oriundos do tratamento de esgoto, que por vezes foi tratado de forma secundária, ganha importância no cenário nacional. O principal resíduo

gerado pelo tratamento de esgoto é o lodo. De acordo com Andreoli *et al.* (2014), o termo “lodo” é utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de esgotos. O artigo 13 da Lei 12.305/10 classifica os resíduos sólidos quanto a sua origem, sendo o lodo classificado como resíduos dos serviços públicos de saneamento básico. Nos tratamentos biológicos, um percentual da matéria orgânica é absorvido e convertido em biomassa microbiana, em geral chamada de lodo biológico ou secundário, que é, na maior parte, composto de sólidos biológicos. A quantidade e composição do lodo gerado variam bastante conforme o tipo de tratamento aplicado e a origem do esgoto processado. Todavia, França e Junior (2008) salientam que o lodo é constituído basicamente de materiais orgânicos, os sólidos voláteis (SV), minerais, os sólidos fixos (SF), em uma proporção de 4-5%, além de água em uma proporção de 95-96% (JORDÃO E PESSOA, 2005).

Ludovice (2000) alertou que o gerenciamento do lodo de esgoto é uma atividade complexa e de alto custo, que, se não for executada corretamente, pode comprometer os benefícios ambientais e sanitários advindos dos sistemas de tratamento dos esgotos. Embora o lodo represente apenas de 1% a 2% do volume do esgoto tratado, o seu gerenciamento tem um custo geralmente entre 20% a 60% do total do gasto com a operação de uma estação de tratamento de esgoto (ANDREOLI *et al.*, 2014).

Pedroza *et al.* (2010) indicaram uma estimativa de produção de lodo no Brasil entre 150 a 220 mil toneladas de matéria seca por ano. Considerando que 73% do esgoto coletado são tratados (BRASIL, 2017), a geração de lodo seco poderia superar 300 mil toneladas ao ano caso os esgotos fossem totalmente tratados no país.

Segundo o Balanço Energético Nacional de 2017, BEN 2017 (EPE, 2017), o consumo total de energia elétrica no Brasil em 2015 girou em torno de 520 TWh, sendo que, conforme o “Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos - 2015”, elaborado pelo Ministério das Cidades, em seu Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento, SNIS (BRASIL, 2017), o setor de saneamento ambiental consumiu 11 TWh, correspondendo a 2,1% do consumo total de energia elétrica do país. As despesas com energia elétrica no setor de saneamento em 2015 somaram cerca de R\$ 5 bilhões, representando 15,6% do total das despesas correntes das empresas. Apenas o estado de Minas Gerais consumiu no mesmo ano, aproximadamente, 72 GWh de energia elétrica no tratamento de esgoto e gastou R\$ 550 milhões com energia elétrica.

Em 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) realizou uma chamada pública para a apresentação de projetos de pesquisa e desenvolvimento de geração de energia elétrica a partir de biogás, denominada “Arranjos técnicos e comerciais para inserção da geração de energia elétrica a partir do biogás oriundo de resíduos e efluentes líquidos na matriz energética brasileira” que teve 23 propostas com investimento de R\$ 476 milhões.

Em 2014, pela primeira vez a energia proveniente do biogás entrou em um leilão de reserva no Brasil, com um valor de referência, o chamado de “preço inicial do produto quantidade” fixado em R\$ 169,00/MWh. De acordo com o BEN 2017 (EPE, 2017), a capacidade instalada de geração elétrica a partir do biogás no Brasil em 2007 era de 20 MW passando para 119 MW em 2016, um aumento de 595% em nove anos.

Em 2015, a Resolução 8/2015 da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), autorizou e regulamentou a venda do biometano para uso veicular, em instalações comerciais e residenciais e para geração de energia. Em 2017 a ANP estabeleceu as especificações que o biometano oriundo de aterros sanitários precisa atender para ser destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais no país, e as regras para aprovação do controle da qualidade, através da Resolução 685/2017. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estima-se um potencial de produção do biocombustível em torno de 102 milhões de m<sup>3</sup> por dia, o que seria suficiente para atender a demanda nacional de gás natural, que em 2015 atingiu 78 milhões de m<sup>3</sup>/dia. Para ser vendido comercialmente, o biometano produzido precisa atender os requisitos de composição e tratamento determinados pela ANP.

Todos esses dados indicam uma tendência de crescimento no índice de tratamento de esgotos no país, que será acompanhado pelo crescimento da produção de lodo remanescente destes tratamentos, que aliados a políticas de incentivo das agências nacionais de energia, irão contribuir para a formação de um mercado promissor de exploração do potencial energético do biogás produzido nas estações de tratamento de esgotos (ETEs). E, em muitos casos, os benefícios advindos da recuperação energética deste biogás poderá tornar o próprio tratamento de esgoto economicamente sustentável.

Nesse sentido, este trabalho visa a analisar a viabilidade econômica do aproveitamento energético do biogás produzido no tratamento anaeróbio de esgotos e lodo de esgoto nos municípios do estado de Minas Gerais.

## 2. Objetivos

O objetivo geral desta dissertação é avaliar o potencial energético e a viabilidade econômica da exploração do biogás gerado pela digestão anaeróbia do esgoto em estações de tratamento no estado de Minas Gerais. Além disso, foi avaliado o aproveitamento do biogás gerado pela biodigestão anaeróbia do lodo remanescente do tratamento do esgoto via reator anaeróbio de leito fluidizado (RALF) - também conhecido como “*up flow anaerobic sludge blanket*” (UASB) em inglês. Também constituem objetivos específicos deste estudo:

- Fazer uma compilação de dados do tratamento de esgoto nos municípios do estado de Minas Gerais que permita traçar um prognóstico de produção de biogás no estado.
- Estimar a produção de biogás proveniente do tratamento anaeróbio de esgotos por meio de quatro metodologias diferentes e confrontar os resultados.
- Estimar a produção de biogás oriundo da biodigestão anaeróbia do lodo remanescente do tratamento de esgotos via reatores UASB.
- Fazer a análise econômica do aproveitamento energético do biogás proveniente da digestão anaeróbia de esgotos em conjunto com a biodigestão do lodo remanescente do tratamento destes esgotos para os municípios do estado de Minas Gerais sob responsabilidade da Companhia de Saneamento do Estado de Minas Gerais (COPASA), bem como realizar uma análise geral da implantação dos sistemas do ponto de vista do estado.
- Estimar o potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) com a aplicação do sistema de recuperação de metano nas estações de tratamento de esgotos do estado de Minas Gerais.

### 3. Revisão Bibliográfica

#### 3.1 Origem do biogás

O biogás é uma mistura de gases composta principalmente por metano, gás carbônico, gás sulfídrico e amônia, sendo que sua composição varia dependendo do tipo e concentração da matéria orgânica, das condições físico-químicas (pH, alcalinidade, temperatura) do ambiente e da presença de outros ânions, como o nitrato e o sulfato. (NOYOLA *et al.*, 2006).

Dentre os gases que compõem o biogás, o metano se destaca por possuir um alto poder calorífico que pode utilizado como fonte de calor ou energia elétrica, e também por ser mais de vinte vezes mais poluente que o gás carbônico. (IPCC, 1997). Segundo Qasin (1999), o biogás tem um poder calorífico de 21.000 a 25.000 kJ/m<sup>3</sup> e possui uma densidade em torno de 86% da densidade do ar, ou seja, 1 kgf/m<sup>3</sup>.

O biogás resulta da digestão anaeróbia da matéria orgânica, que de acordo com Chernicaró (2007), envolve processos metabólicos complexos e sequenciais de três grupos de microrganismos: as bactérias fermentativas ou acidogênicas, bactérias sintróficas ou acetogênicas e microrganismos metanogênicos. As bactérias fermentativas acidogênicas convertem através da hidrólise, os compostos orgânicos complexos como carboidratos, proteínas e lipídeos em compostos mais simples, como ácidos orgânicos, além de hidrogênio e gás carbônico. Os microrganismos sintróficos acetogênicos, por sua vez, convertem compostos orgânicos intermediários, como propionato e butirato, em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Por fim, os microrganismos metanogênicos, denominados *arqueas* metanogênicas, transformam o acetato e o hidrogênio produzidos nas etapas anteriores em metano e dióxido de carbono. A Figura 3.1 mostra as etapas e microrganismos envolvidos no processo de digestão anaeróbia.

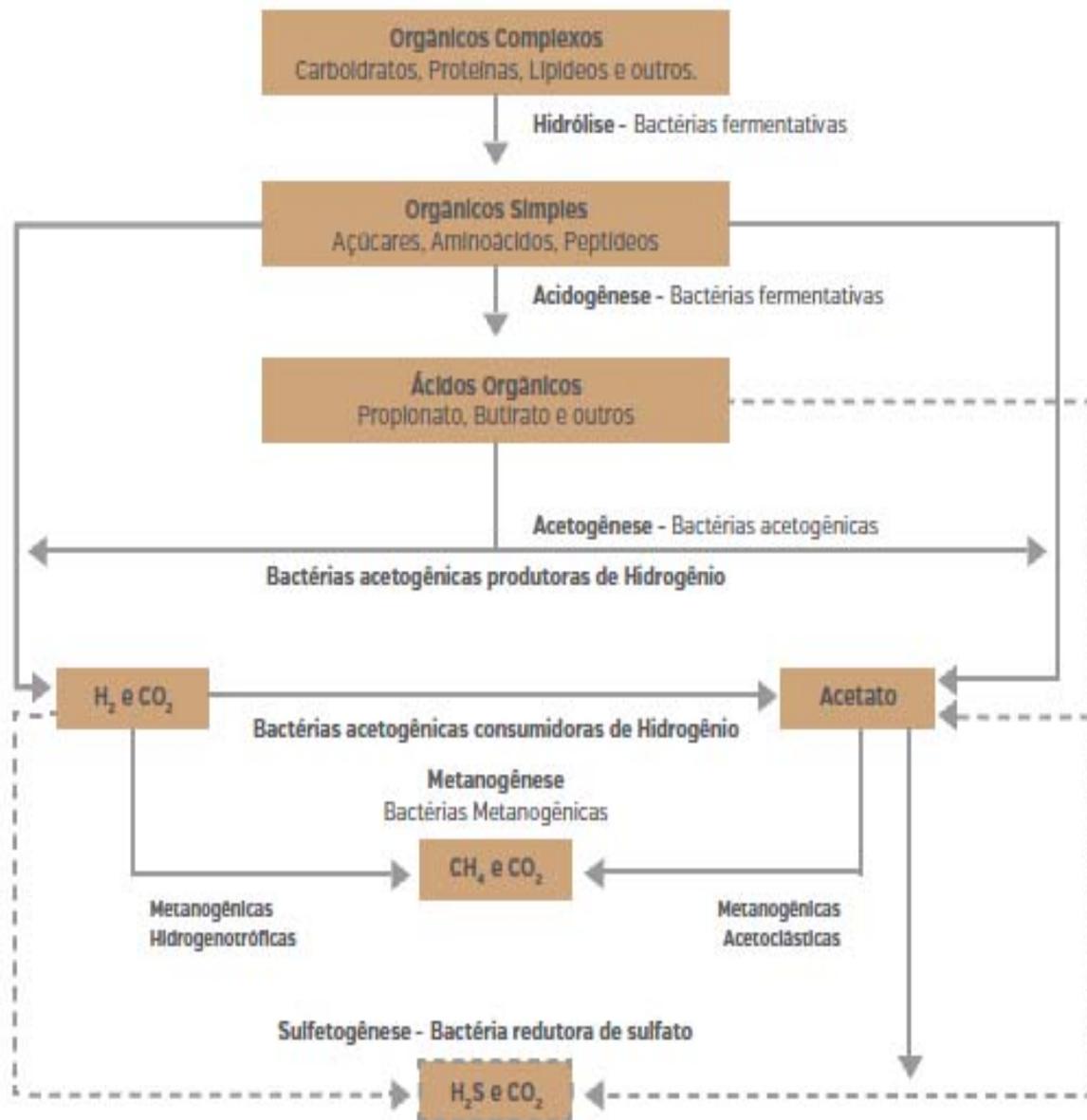


Figura 3.1 – Etapas e microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia

Fonte: Chernicharo (2007 apud BRASIL, 2015a)

A formação do metano durante este processo se dá, basicamente por duas vias (CHERNICHARO, 2007; BRASIL, 2015a):

- Pela decomposição do ácido acético e pela redução do gás carbônico

Na ausência de hidrogênio, a decomposição do ácido acético conduz a formação de metano e gás carbônico. O grupo metil do ácido acético é reduzido a metano, enquanto o grupo carboxílico é oxidado a gás carbônico, conforme equação (3.1).



- Pela redução do gás carbônico

Quando ainda há hidrogênio disponível, a maior parte do metano é formada pela redução do gás carbônico. O dióxido de carbono atua como um acceptor dos átomos de hidrogênio, que foram removidos da matéria orgânica pelas enzimas, como indicado na equação (3.2).



A composição do biogás varia de acordo com as condições ambientais no reator e também das características da matéria orgânica a ser degradada. No processo de digestão anaeróbia de esgotos domésticos a proporção de metano é dióxido de carbono variam de 70% a 80% e 20% a 30%, respectivamente. (CHERNICHARO, 2007).

Ribeiro *et al.* (2016) investigaram a composição e o volume de biogás produzido a partir da biodigestão anaeróbia de dejetos de galinhas em Itanhandu-MG, Brasil. Os autores realizaram experimentos com conteúdo total de sólidos de 6%, 9% e 12% de sólidos totais (ST), a diferentes temperaturas. Os resultados mostraram uma produção de metano de 0,72 m<sup>3</sup>/kgSV para amostra de 6% de ST, 0,42 m<sup>3</sup>/kgSV para amostra de 9% de ST e 0,34 m<sup>3</sup>/kgSV para amostra de 12% de ST. Os valores máximo, médio e mínimo de CH<sub>4</sub> para as amostras foram: 70,9%, 62,5% e 49,2% para amostra de 6% de ST; 68,8%, 62,9% e 43,9% para amostra de 9% de ST; 77,6%, 72,2% e 66,2 para amostra de 12% de ST, respectivamente. Os autores estimaram que o potencial total de geração de energia nas fazendas brasileiras de aves de postura para produção de ovos de galinha seria de 277 TWh/ano.

A temperatura é um fator de muita influência no processo de produção do biogás via reação anaeróbia. Watanabe *et al.* (2017) estudaram a digestão anaeróbia da *Egeria densa* em três temperaturas diferentes, 37°C, 55°C, e 65°C. Os resultados mostram que a taxa média de produção de metano a 55°C foi de 220 ml/l por dia, duas vezes maior que a produção a 37°C e 65°C. Houve acumulação de ácidos graxos voláteis em condições termófilas. Foram encontradas comunidades microbianas diferentes na faixa de temperatura mesófilas (37°C): *Phyla Bacteroidetes* (43%), *Firmicutes* (37%), *Proteobactérias* (9%), *Sinergistas* (5%), *Espiroquetas* (1%) e bactérias não classificadas (5%). Já na faixa termófilas (55°C e 65°C) a *Phylum Firmicutes* foi dominante. Em relação a comunidade *archaeal*, foram encontradas em condição mesofílica as *Methanosaeta concilii* (40%), *Methanolinea sp.* (17%) e *Euryarchaeota* não classificada (43%). Na fase termófila, foram encontradas as

*Methanosarcina thermophila* (87% a 55°C, 54% a 65°C) e *Methanothermobacter thermautotrophicus* (13% a 55°C, 46% a 65°C). Tanto a 37°C como a 55°C, ocorreu a metanogênese acetoclástica, provavelmente devido à menor presença de metanogênicos hidrogenotróficos. Os autores observaram, que a 65°C, o crescimento de metanogênicos acetoclásticos *Methanosarcina thermophila* foi limitado pela alta temperatura, e que, portanto, a oxidação do acetato e a metanogênese hidrogenotrófica podem ter ocorrido.

O potencial de produção do biogás através da matéria orgânica degradada é bastante elevado, Moreda (2016), por exemplo, estimou a produção de biogás através da digestão anaeróbia no Uruguai como sendo em 1,3% a 2,1% da produção total de energia primária do país. As regiões tropicais possuem ainda maior potencial de exploração do biogás, já que as elevadas temperaturas aumentam a eficiência do processo anaeróbio. Shane *et al.* (2017) avaliaram a viabilidade do uso do biogás na Zâmbia e concluíram ser economicamente viável na maioria dos cenários analisados. Os autores também sugeriram formas de ultrapassar as barreiras de financiamento e regulamentação existentes no país, que são comuns a muitos países em desenvolvimento, como o Brasil.

### **3.2 Insumos para produção do biogás**

O principal insumo para produção de biogás é a matéria orgânica degradada proveniente do tratamento dos esgotos sanitários e dos resíduos sólidos urbanos e agrícolas. Nas ETEs também é produzido um resíduo sólido com poder de produção de biogás, o lodo remanescente do processo de tratamento dos esgotos.

Bernal *et al.* (2017) analisaram a viabilidade econômica da combustão do biogás produzido pela digestão anaeróbia da vinhaça, um dos resíduos das Usinas de cana-de-açúcar. Os resultados mostram que o processo se torna economicamente viável a partir de 14.580 ha, considerando o processamento da cana-de-açúcar em plantas unidas, e 6000 ha para plantas autônomas. O potencial energético total poderia atingir 3,26 TWh por ano, o que representa 0,52% de todo o consumo doméstico de energia em 2014. O potencial de emissões evitadas poderia chegar a 1,9 Mt de CO<sub>2</sub> por ano, o que representa aproximadamente 2,1% das emissões para toda a indústria no Brasil em 2014.

Barros *et al.* (2014) estudaram a geração de energia térmica a partir do biogás de aterros sanitários, considerando o tamanho da população contribuinte, os custos associados à geração e coleta de resíduos sólidos no Brasil conforme prognósticos do PIB apresentados no Balanço Energético Nacional (BEN). Os autores avaliaram o valor presente líquido (VPL) e a taxa

interna de retorno (TIR) de cada cenário e utilizaram curvas de estimativa logística, taxa de crescimento decrescente e curvas logarítmicas para estabelecer as relações entre os cenários de geração e a projeção de coleta de resíduos sólidos e PIB projetado. Os resultados demonstraram que a produção de energia a partir do biogás de aterro representa uma pequena porcentagem, 0,00020% em 2010 e de 0,44496 a 0,81042% em 2030, da geração projetada de energia a partir de combustíveis residuais. Os autores apontaram a necessidade de formular políticas que promovam os aterros sanitários como fonte de energia renovável, ampliando os financiamentos para municípios com populações de até 200.000 habitantes.

Silva *et al.* (2017) determinaram teoricamente o potencial ótimo de geração de energia elétrica do biogás de aterros sanitários utilizando a metodologia de benefício líquido máximo, e levando em consideração os aspectos econômicos, demográficos e regionais do Consórcio Intermunicipal da Micro-região do Alto Sapucaí para Aterro Sanitário (CIMASAS), localizado no sul do estado de Minas Gerais. Os resultados indicaram que o aterro nesta região poderia produzir mais 66.293.282 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> em vinte anos. Para atingir a taxa de atratividade mínima de 15%, a menor população possível seria de 3.700.000 habitantes nas condições estudadas.

O PROBIOGÁS - Projeto Brasil-Alemanha de Fomento ao Aproveitamento Energético de Biogás no Brasil - é um projeto de cooperação técnica entre o Governo Brasileiro, por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental do Ministério das Cidades, e o Governo Alemão, por meio da Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ), que tem como objetivo contribuir para a ampliação do uso energético eficiente do biogás no Brasil. O projeto destaca a importância do aproveitamento energético do biogás nos processos de tratamento dos esgotos sanitários e dos resíduos sólidos urbanos para a modernização das instalações dos sistemas brasileiros, aumentando a sustentabilidade econômico-financeira e a qualidade dos processos de tratamento, além de promover melhorias para o meio ambiente, contribuindo de forma efetiva para a redução dos gases de efeito estufa (BRASIL, 2015a).

Barros (2016) cita as potencialidades e gargalos da produção de energia a partir do biogás produzido a partir de resíduos sólidos urbanos, da digestão anaeróbia de esgotos e lodos em ETEs, da digestão anaeróbia de dejetos de bovinos, suínos e aves. A autora ressalta o benefício da geração de energia a partir do biogás de aterros sanitários, principalmente naqueles já existentes, em locais próximos aos grandes centros urbanos, de forma a prolongar a vida útil dos aterros sanitários, em consonância com a Política Nacional de Resíduos, do

aproveitamento energético do biogás oriundo da digestão anaeróbia de esgotos e lodos em ETEs, e de dejetos de suínos, bovinos e aves.

### 3.2.1 Esgotos sanitários

A norma brasileira NBR-9648 (ABNT, 1986) define o termo esgoto sanitário como o despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária. Ainda segundo a norma, esgoto doméstico é o despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas; esgoto industrial é o despejo líquido resultante dos processos industriais, que devem respeitar os padrões de lançamento estabelecidos por leis, decretos ou resoluções federais e estaduais; água de infiltração é toda água proveniente do subsolo que penetra nas canalizações; e contribuição pluvial parasitária é a parcela de deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede coletora de esgoto sanitário.

De acordo com Nuvolari (2011), o esgoto sanitário é composto de 99,9% de água e 0,1% de sólidos, sendo que 75% desses sólidos são constituídos de matéria orgânica em decomposição. Os parâmetros que definem a qualidade do esgoto podem ser divididos em três categorias: parâmetros físicos, químicos e biológicos.

Os parâmetros físicos mais usualmente analisados são cor, turbidez, odor, temperatura. Os principais parâmetros químicos são o pH (acidez e alcalinidade), a quantidade de sólidos orgânicos e inorgânicos, a quantidade de matéria orgânica, a quantidade de nutrientes, como nitrogênio e fósforo, e a quantidade de metais pesados presentes nos esgotos. Os parâmetros biológicos se referem à presença de microrganismos indicadores como as bactérias, dentre elas os coliformes fecais e a *Escherichia Coli*. (VON SPERLING, 2014).

Os sólidos totais representam a quantidade de impurezas presentes nos esgotos e podem ser classificados de acordo com a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Classificação dos sólidos totais presentes nos esgotos

<b>Sólidos Totais (ST)</b>	
<b>Classificação</b>	<b>Descrição</b>
<u>Em suspensão</u>	Fração dos sólidos orgânicos e inorgânicos que são retidos em filtros de papel com aberturas de dimensões padronizadas (0,45 a 2,0 µm)
Sólidos Suspensos Fixos (SSF)	Componentes minerais, não incineráveis, inertes, dos sólidos em suspensão
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)	Componentes orgânicos dos sólidos em suspensão
<u>Dissolvidos</u>	Fração dos sólidos orgânicos e inorgânicos que não são retidos em filtros

<b>Sólidos Totais (ST)</b>	
<b>Classificação</b>	<b>Descrição</b>
	de papel com aberturas de dimensões padronizadas (0,45 a 2,0 µm)
Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF)	Componentes minerais dos sólidos dissolvidos
Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV)	Componentes orgânicos dos sólidos dissolvidos
<u>Sedimentáveis</u>	Fração dos sólidos orgânicos e inorgânicos que sedimenta em uma hora no cone Imhoff

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2014), grifo nosso.

A matéria orgânica presente nos esgotos é um parâmetro fundamental, pois é a principal poluidora dos corpos d'água devido ao consumo de oxigênio dissolvido pelos microrganismos em seus processos metabólicos. Ela pode ser determinada por meio de métodos diretos, como a determinação da “Demanda Bioquímica de Oxigênio” (DBO<sub>5</sub>) que é a medida do oxigênio consumido pelos microrganismos na oxidação bioquímica da matéria orgânica após cinco dias a 20°; da “Demanda Última de Oxigênio” (DBO<sub>última</sub>) que representa o consumo total de oxigênio, pelos microrganismos para oxidação bioquímica da matéria orgânica ao final de vários dias e da “Demanda Química de Oxigênio” (DQO) que representa a quantidade de oxigênio requerida para estabilizar quimicamente a matéria orgânica carbonácea. A quantidade de matéria orgânica também pode ser medida de forma direta através da determinação da quantidade de “Carbono Orgânico Total” (COT) que é a medida de conversão do carbono orgânico em gás carbônico

Von Sperling e Chernicharo (2005) reuniram dados de contribuição per capita e concentração dos principais parâmetros físicos dos esgotos, apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Dados de contribuição per capita e concentração dos principais parâmetros físicos dos esgotos.

<b>Parâmetro</b>	<b>Contribuição per capita (g/hab.dia)</b>		<b>Concentração</b>		
	<b>Faixa</b>	<b>Típico</b>	<b>Unidade</b>	<b>Faixa</b>	<b>Típico</b>
Sólidos totais	120-220	180	mg/L	700-1350	1100
Em suspensão	35-70	60	mg/L	200-450	350
Fixos	7-14	10	mg/L	40-100	80
Voláteis	25-60	50	mg/L	165-350	320
Dissolvidos	85-150	120	mg/L	500-900	700
Fixos	50-90	70	mg/L	300-550	400
Voláteis	35-60	50	mg/L	200-350	300
Sedimentáveis	-	-	mg/L	10-20	15

Parâmetro	Contribuição per capita (g/hab.dia)		Concentração		
	Faixa	Típico	Unidade	Faixa	Típico
Matéria orgânica					
DBO5	40-60	50	mg/L	250-400	300
DQO	80-120	100	mg/L	450-800	600
DBO última	60-90	75	mg/L	350-600	450
Nitrogênio total	6-10	8	mgN/L	35-60	45
Nitrogênio orgânico	2,5-4	3,5	mgN/L	15-25	20
Amônia	3,5-6	4,5	mgNH <sub>3</sub> -/N/L	20-35	25
Nitrito	0	0	mgNO <sub>2</sub> -/N/L	0	0
Nitrato	0-0,2	0	mgNO <sub>3</sub> -/N/L	0-1	0
Fósforo	0,7-2,4	1	mgP/L	4-15	7
Fósforo orgânico	0,2-1	0,3	mgP/L	1-6	2
Fósforo inorgânico	0,5-1,5	0,7	mgP/L	3-9	5
pH	-	-	-	6,7-8	7
Alcalinidade	20-40	30	mgCaCO <sub>3</sub> /L	100-250	200
Metais pesados	0	0	mg/L	traços	traços
Compostos orgânicos tóxicos	0	0	mg/L	traços	traços

Fonte: Von Sperling e Chernicharo (2005)

Metcalf e Eddy (2003) apresentam algumas concentrações típicas de microrganismos presentes nos esgotos domésticos, conforme indicado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Concentrações típicas de microrganismos em esgotos

Características	Valor Médio
Bactérias Totais (/100mL)	$10^9 - 10^{10}$
Coliformes Totais (NMP/100mL)	$10^7 - 10^8$
Coliformes Fecais (NMP/100mL)	$10^6 - 10^7$
Streptococcus Fecais (NMP/100mL)	$10^5 - 10^6$
Salmonella Typhosa (/100mL)	$10^1 - 10^4$
Cistos de Protozoários (/100mL)	$10^2 - 10^5$
Vírus (/100mL)	$10^3 - 10^4$
Ovos de Helmintos (/100mL)	$10^1 - 10^3$

Fonte: Adaptado e traduzido de Metcalf e Eddy (2003)

As técnicas de tratamento de esgotos visam à remoção dos sólidos, através de processos físicos, químicos e biológicos. O tratamento de esgoto normalmente é dividido em três níveis (VON SPERLING, 2014):

- Tratamento preliminar: remoção de sólidos grosseiros através de processos físicos como gradeamento e desarenação.

- Tratamento primário: remoção de sólidos sedimentáveis através de processos físicos como sedimentação e floculação.
- Tratamento secundário: remoção da matéria orgânica por meio de reações bioquímicas realizadas por microrganismos.
- Tratamento terciário: remoção de poluentes específicos, geralmente tóxicos ou não biodegradáveis, ou poluentes não removidos no tratamento secundário.

O tratamento de esgotos também pode contribuir com a redução dos efeitos dos Gases de Efeito Estufa (GEE). Fine e Hadas (2012) estimaram a emissão de GEE para diferentes tipos de tratamento de esgotos em Israel e apresentaram opções de redução da emissão desses gases, considerando a recuperação energética do biogás. Os resultados mostraram que as emissões de CO<sub>2</sub> devido ao uso de energia foram estimadas em 1.618 gCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> para os tratamentos secundários e 2102 gCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> para os tratamentos terciários. Uma redução de 23% a 55% nas emissões de GEE poderia ser alcançada com a produção de fertilizantes a partir do lodo residual e conversão do biogás. Os sistemas de tratamento no Brasil, e na maioria de países em desenvolvimento, normalmente são limitados ao nível de tratamento secundário.

O tratamento secundário se caracteriza pelo uso de processos biológicos nos quais os microrganismos a matéria orgânica em gás carbônico, água e material celular. A conversão pode ocorrer em ambiente com presença de oxigênio, quando o processo é chamado de aeróbio, ou em ambiente sem presença de oxigênio, processo denominado anaeróbio. (VON SPERLING, 2014).

Lima (2005) comparou energeticamente os processos aeróbios e anaeróbios de tratamento de esgoto e concluiu que o processo anaeróbio possui um balanço energético mais favorável, principalmente devido à possibilidade de uso do biogás. Segundo Moreira (2014), 64% as ETEs no Brasil utilizam tratamento anaeróbio de esgotos.

Os sistemas de tratamento anaeróbios podem ser classificados, de forma geral, em dois grandes grupos (NUVOLARI, 2011; VON SPERLING, 2014; CHERNICHARO, 2007; JORDÃO e PESSOA, 2005):

- Sistemas convencionais: digestores de lodo, tanques sépticos e lagoas anaeróbias.
- Sistemas de alta taxa: com crescimento aderido (reatores de leito fixo, leito rotatório, leito expandido/fluidizado) e com crescimento disperso (reatores de dois estágios, de chicanas, de manta de lodo, de leito granular expandido, com recirculação interna).

Os sistemas convencionais são caracterizados por reatores que operam com baixas cargas orgânicas volumétricas. Já os sistemas de alta taxa possuem mecanismos de retenção de grandes quantidades de biomassa de elevada atividade. O conceito de crescimento microbiano disperso tem relação com a presença de flocos de microrganismos inteiramente livres. Já o conceito de crescimento microbiano aderido pressupõe o desenvolvimento de microrganismos agregados a um material inerte, levando a formação de um filme biológico (CHERNICHARO, 2007).

Lin *et al.* (2016) apresentaram uma abordagem de modelagem integrada para avaliar econômica e ambientalmente três sistemas alternativos de remoção nitrogênio em estações de tratamento de esgotos. Os resultados sugerem que o sistema de troca de íons é uma tecnologia promissora com alta eficiência na remoção de nitrogênio em ETEs com tratamento anaeróbio.

Posadas *et al.* (2017) demonstraram que combinação do tratamento anaeróbio com lagoa de estabilização com algas é mais eficiente na remoção de carbono e nutrientes. Embora o sistema combinado não seja economicamente viável para plantas pequenas, quando se usa energia solar para secagem a alternativa se torna econômica e energeticamente mais eficiente para remoção de nutrientes e recuperação energética nas estações de tratamento de esgotos.

Em Minas Gerais, de acordo com SEIS (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2014), os sistemas de tratamento mais utilizados em 2011 eram baseados em reatores anaeróbios, pois 69,2% das sedes e 55,7% dos distritos que tratavam o esgoto adotavam esse sistema de tratamento. Em segundo lugar, são utilizados os filtros biológicos em 31,4% das sedes e em 60,7% dos distritos que tratam os esgotos.

Von Sperling e Chernicharo (2005) levantaram os custos e volume de lodo gerado pelos principais sistemas de tratamento de esgoto, dentre eles se destacam: o reator UASB com custo de construção de US\$ 12,00 a US\$ 20,00 por habitante, custo de operação de US\$ 1,00 a US\$ 1,50 por habitante por ano e geração de 70 L a 220 L por habitante por ano de lodo líquido a ser tratado; e os tanques sépticos com filtros anaeróbios que custam de US\$ 30 a US\$ 50 por habitante, sendo US\$ 2,50 a US\$ 4,00 por habitante por ano de manutenção e geram de 180 L a 1000 L de lodo líquido a ser tratado por habitante por ano.

Fernández-Arévalo *et al.* (2017) propuseram uma biblioteca para modelagem de todo o processo de tratamento de esgotos com recuperação energética. A biblioteca apresentada pelos autores permite uma análise completa e abrangente de diferentes configurações possíveis de plantas, considerando aspectos básicos para tomada de decisão, sob a perspectiva

energética e de recursos. Para demonstrar o potencial da biblioteca e a necessidade de executar simulações, foi realizada uma análise comparativa de ETEs, do ponto de vista técnico-econômico. Os *layouts* selecionados foram uma ETE convencional, uma ETE modernizada e um novo conceito de ETE denominada ETE de desacoplamento C/N/F. Na planta convencional, a DQO utilizada na produção de biogás foi de 29%, na planta modernizada 36% e 34% na ETE de desacoplamento C/N/F. Na planta convencional não foi possível obter autossuficiência energética, na planta modernizada a autossuficiência dependia da relação C/N e na ETE de desacoplamento C/N/F foi possível obter autossuficiência em todos cenários, especialmente para esgotos com alta concentração de DQO.

Kerstens *et al.* (2015) avaliaram técnico e financeiramente a implantação de sistemas de coleta e tratamento de resíduos sólidos municipais e tratamento de esgotos na Indonésia. Os parâmetros DQO, DBO, nitrogênio, fósforo, eficiência de remoção de patógenos, necessidades energéticas, produção de lodo, uso da terra e potencial de recuperação de energia foram determinados para diferentes sistemas de tratamento de esgotos. Os sistemas de tratamento de resíduos sólidos foram analisados de acordo os parâmetros de como a exigência de terra, a produção de energia e a recuperação de plástico e papel. Na análise financeira, investimentos, custos e benefícios operacionais e custo total do ciclo de vida (CTCV) de todas as opções foram comparados. Foi realizada uma análise para determinar o efeito das variações de preços dos recursos recuperáveis e preços de terras no CTCV. Os resultados mostraram que um aumento de dez vezes nos preços das terras usadas para os sistemas de tratamento de esgotos resultou em um CTCV 5 vezes maior, enquanto que um aumento de 4 vezes no preço de venda dos recursos recuperados resultou em um CTCV 1,3 maior.

Larsson *et al.* (2015) avaliaram duas opções de integração da digestão anaeróbia e produção de biogás em uma fábrica de celulose na Suécia: o uso de um reator de alta taxa no tratamento esgotos e o uso de um digestor anaeróbio de lodo primário e secundário. Os resultados mostraram um potencial de produção anual de 26 a 27 GWh em um fábrica típica, o que equivale a uma produção diária de 7.600 litros de diesel em termos de energia e o custo de produção foi estimado em € 0,47 a € 0,82 por litro de diesel equivalente, compatível com o custo de € 0,68 por litro diesel na Suécia. Os autores ressaltaram que a o uso dos digestores anaeróbios nas fábricas de celulose podem tanto contribuir com a expansão da produção de combustível renovável para veículos como o biometano, quanto para aumentar a eficiência e o lucro nas fábricas de celulose.

Santos *et al.* (2016a) apresentaram um método para analisar a viabilidade econômica e o potencial energético da geração de energia por biogás a partir de estações de tratamento de esgoto anaeróbias baseado no número de habitantes contribuintes. Os resultados indicaram viabilidade econômica para municípios com população superior a 300 mil e que o potencial energético poderia fornecer 0,25% dos combustíveis residuais, de acordo com o Ministério da Ciência e Tecnologia. Os autores ressaltam que esse potencial energético poderia ser maior se as plantas se tornassem viáveis para populações menores, o que indica a necessidade de políticas públicas para projetos de biogás no Brasil.

### 3.2.2 O lodo

O lodo é o subproduto sólido do tratamento de esgoto, ainda que constituído de mais de 95% de água. A quantidade e a qualidade do lodo gerado no tratamento de esgotos dependem, intrinsecamente, do tipo de processo utilizado e podem ser expressas em termos de massa e volume. Na etapa biológica do tratamento de esgotos, parte da DQO removida é convertida em biomassa, que constitui o lodo biológico, ou lodo secundário.

Andreoli *et al.* (2014) resumem as características e quantidades de lodo produzido para diversos tipos de tratamento de esgotos, conforme apresentado na tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Características e quantidade de lodo produzidos em diversos sistemas de tratamento de esgoto

Sistema	Características do Lodo Produzido			
	kgSS/kgDQO aplicada	Teor de sólidos secos (%)	Massa de lodo (gSS/hab.d) (a)	Volume de lodo (L/hab.d) (b)
Tratamento primário (convencional)	0,35 - 0,45	2 - 6	35 - 45	0,6 - 2,2
Tratamento primário (tanques sépticos)	0,20 - 0,30	3 - 6	20 - 30	0,3 - 1,0
Lagoa facultativa	0,12 - 0,32	5 - 15	12 - 32	0,1 - 0,25
Lodos ativados convencional	0,60 - 0,80	1 - 2	60 - 80	3,1 - 8,2
Lodos ativados aeração prolongada	0,50 - 0,55	0,8 - 1,2	40 - 45	3,3 - 5,6
Reator UASB	0,12 - 0,18	3 - 6	12 - 18	0,2 - 0,6
Reator UASB + pós tratamento aeróbio	0,20 - 0,32	3 - 4	20 - 32	0,5 - 1,1

Fonte: Adaptado de Andreoli et al (2014)

(a) Assumindo 0,1 kgDQO/hab.dia e 0,06 kgSS/hab.dia

(b) Litros de lodo/hab. Dia = [(gSS/hab.dia) / (sólidos secos (%))] x (100/1000) (assumindo densidade 1000 kg/m<sup>3</sup>)

Hossain, Strezov e Nelson (2009) reuniram dados de produção de lodo de esgoto de vários países no ano de 2008: o Reino Unido produziu cerca de 1 milhão de m<sup>3</sup>, a Alemanha 50

milhões de m<sup>3</sup>, a Suíça 4,2 milhões de m<sup>3</sup>, Singapura 170 mil m<sup>3</sup> e, em Sydney a produção do biossólido atingiu 190 mil toneladas/ano.

Na Espanha, Barneto *et al.* (2009) estimaram produção de lodo de esgoto em torno de 1.120.000 toneladas de matéria seca em 2005, dispostas no solo.

Pedroza *et al.* (2010) indicaram que, no estado do Paraná, a produção de lodo aumentou de 2000 m<sup>3</sup>/mês em 1999, para aproximadamente 4000 m<sup>3</sup>/mês em 2003.

Pegorini *et al.* (2003) estimaram que na cidade de Curitiba, a produção diária de lodo de esgoto em 2003 era aproximadamente de 9,6 toneladas de matéria seca. Os autores alertaram que esta produção deveria aumentar para 120 toneladas de matéria seca devido as perspectivas de implantação de novos sistemas de tratamento.

Conforme Andreoli *et al.* (2014), tratamento do lodo pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Adensamento: processo físico para reduzir umidade e volume
- Estabilização: processo para remoção da matéria orgânica
- Condicionamento: processo de adição de produtos químicos para aumentar sua aptidão à desidratação
- Desidratação: processo natural ou mecânico para redução de umidade e volume
- Higienização: processo para remoção de organismos patogênicos, necessário para o uso agrícola. Para incineração ou disposição em aterro sanitário, a higienização não é necessária.

Ainda conforme o autor, em cada etapa de tratamento do lodo há diversos tipos de processo que podem ser utilizados, conforme Figura 3.2.

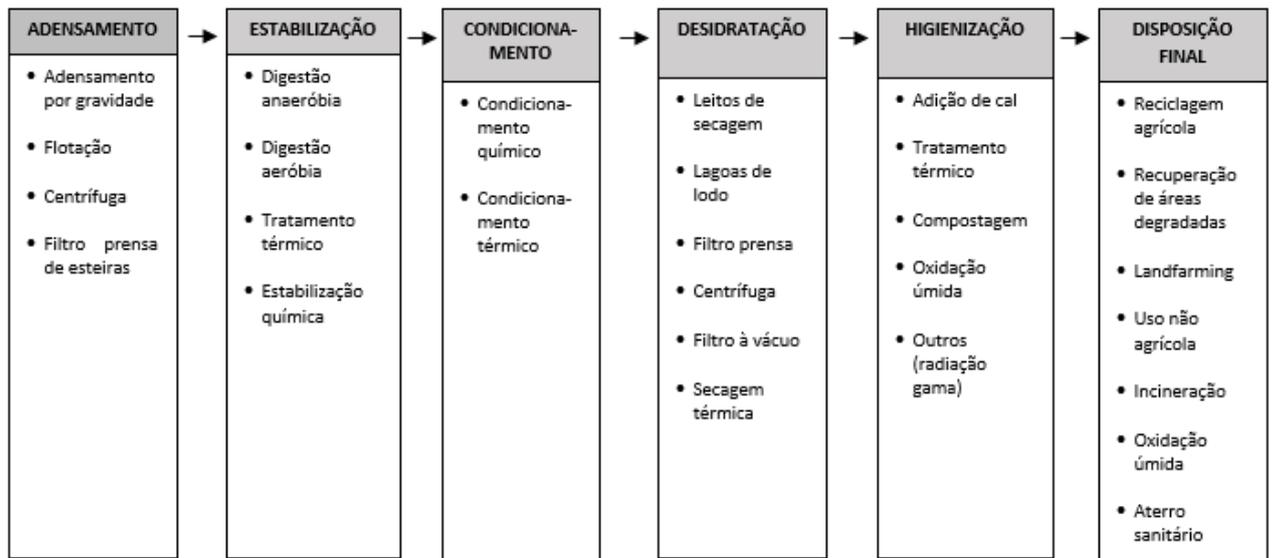


Figura 3.2 - Etapas de gerenciamento do lodo e principais processos utilizados

Fonte: Andreoli *et al.* (2014)

A implantação de cada uma dessas etapas no gerenciamento de lodo depende das características desse lodo, que por sua vez, depende do tipo de tratamento aplicado ao esgoto. A Figura 3.3 apresenta os fluxogramas mais usuais de tratamento e disposição do lodo proveniente de diversos tipos de tratamento de esgotos.

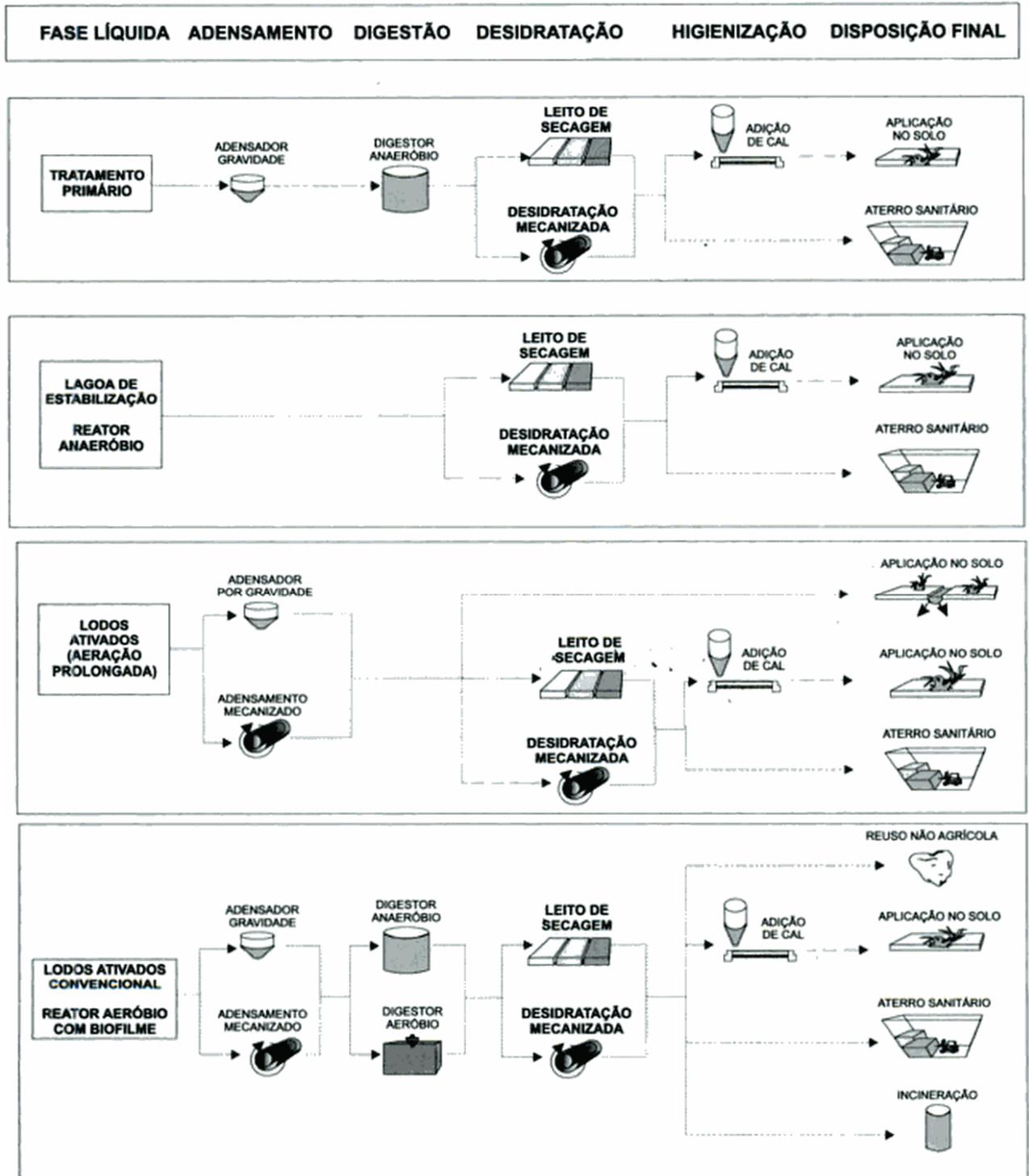


Figura 3.3 - Fluxogramas usuais de tratamento e disposição do lodo

Fonte: Andreoli *et al.* (2014)

De acordo com Khai (2007), metade do lodo de esgoto produzido nos Estados Unidos da América (EUA) é aplicada ao solo, e na comunidade europeia, mais de 30% do lodo de esgoto produzido é utilizado como fertilizante na agricultura.

Eriksson *et al.* (2016) estudaram sistemas biológicos para degradação de resíduos sólidos e lodo de esgotos. Os resultados mostraram que o uso de *pellets* é melhor que a propagação direta do lodo como fertilizante, que em grande escala também pode servir de combustível para produção de energia.

Carlsson *et al.* (2016) fizeram o balanço energético de um sistema de tratamento de esgotos considerando a biodigestão anaeróbia do lodo e a utilização do biogás como combustível para cogeração de calor e eletricidade e produção de biometano. Os resultados mostraram que o pré-tratamento térmico do lodo antes da digestão anaeróbia aumentou em 30% a biodegradabilidade do lodo, aumentando a produção de biogás. Os autores ressaltaram que com a recuperação do metano produzido, a ETE se tornou autossuficiente em energia térmica.

Stoica *et al.* (2009) avaliaram, por meio do uso de modelos matemáticos e informações de três ETEs da Suécia, sete estratégias de manejo do lodo em ETEs considerando a recuperação energética. Os resultados mostraram que o uso excessivo de energia no tratamento de esgotos se contrapõe ao potencial de recuperação de energia nos processos de tratamento do lodo. Os autores recomendam que o uso de energia no tratamento de esgoto não vise a redução da produção de lodo secundário, já que, do ponto de vista energético, o lodo pode ser utilizado como substrato para a produção de calor, biometano ou eletricidade.

As destinações finais comumente usadas para o lodo no Brasil são os aterros sanitários, estabilização anaeróbica com aplicações na agricultura e incineração. A Resolução Nº 375/2006 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) definiu os critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em ETEs e seus produtos derivados.

O lodo possui alto valor calorífico, Moni Silva (2016) realizou experimentos com lodo de reatores UASB e verificou um valor de Poder Calorífico Inferior (PCI) de 13.676 kJ/kg para o lodo seco, e pode ser utilizado para gerar energia elétrica a partir de sua queima direta em caldeiras. Porém, apesar do alto valor calorífico, a combinação da produção de energia elétrica a partir da incineração do lodo, juntamente com a produção de eletricidade a partir do biogás do tratamento de esgoto em ETEs, é uma alternativa pouco viável do ponto de vista econômico, já que seriam necessários dois sistemas de conversão de energia separados, o que onera bastante o custo do investimento. Além do fato de que a produção do lodo não é contínua, os descartes não são feitos de maneira a garantir uma vazão adequada para a geração de energia nas caldeiras, logo a planta de incineração ficaria muito tempo parada.

Uma alternativa interessante para o aproveitamento energético do lodo via incineração seria fazer a queima juntamente com os resíduos sólidos urbanos (RSU) das cidades, neste caso, seria implantado um único sistema de geração de energia para o aproveitamento dos dois tipos de resíduo, e desta forma, a vazão de combustível para planta de conversão seria contínua.

### **3.3 Geração de biogás em ETEs**

#### **3.3.1 Reatores UASB**

Dentre os sistemas mais utilizados em estações de tratamento de esgoto no Brasil está o reator de fluxo ascendente, também conhecido como reator UASB. Ele foi desenvolvido nos anos 70 na Universidade de Wageningen, Holanda, e possui facilidade de operação, hidrodinâmica eficiente e se adapta apresentado bem às condições climáticas do país. (BELLI FILHO *et al.*, 2001).

A Figura 3.4 apresenta um diagrama esquemático do reator UASB, o esgoto afluente entra pela parte inferior do reator e o efluente sai na parte superior do reator. Na parte inferior, chamada leito de lodo, os sólidos são muito densos, já no topo do reator, denominada manta de lodo, o lodo é mais leve. O movimento ascendente do biogás e do esgoto no reator garante que o sistema realize agitação de forma autônoma. Um separador de fases sólido, líquidos e gases é instalado no topo do reator, permitindo a retenção do lodo, contribuindo para o desenvolvimento uma biomassa bem concentrada e ativa. (LOURENÇO e CAMPOS, 2009).

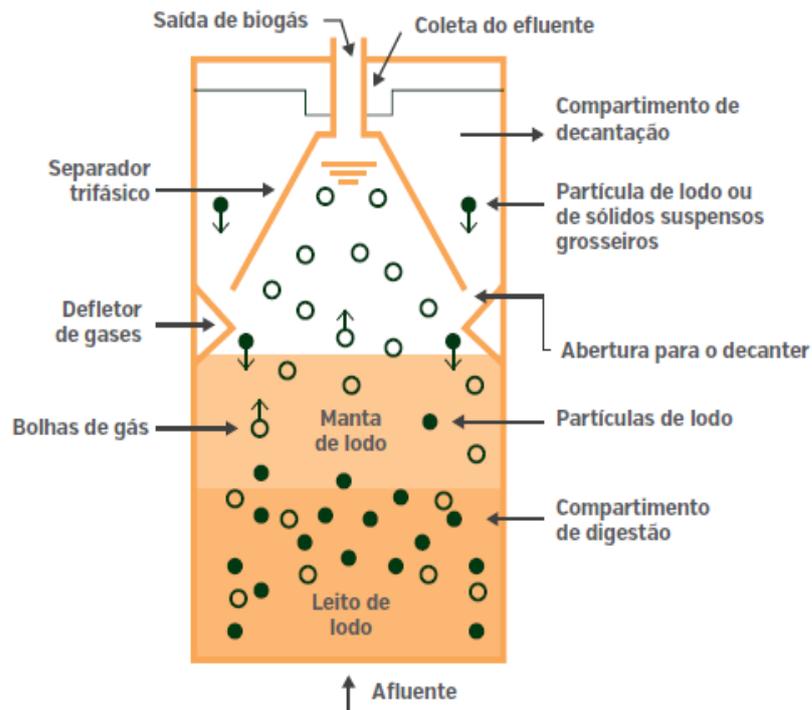


Figura 3.4 – Diagrama esquemático do reator UASB

Fonte: Chernicharo (2007 apud BRASIL, 2015a)

A decantação ocorre ao redor e acima separador trifásico, onde o lodo decantado é removido e retornado ao compartimento de digestão. As partes não decantadas seguem com o efluente final na saída do reator. O tamanho dos grânulos de bactérias varia entre 1,0 a 3,0 mm de diâmetro (CHOU e HUANG, 2005; VERONEZ *et al.*, 2005; VLYSSIDES *et al.*, 2008; YETILMEZSOY e SAKAR, 2008).

Von Sperling (2014) resume as informações gerais do sistema de tratamento com reator UASB, conforme indicado na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Resumo das informações do tratamento com reator UASB

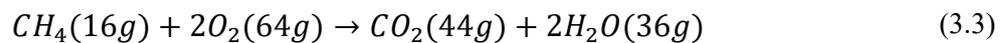
Item	Parâmetro	Reator UASB
Eficiência da remoção	DBO (%)	60 - 75
	DQO (%)	55 - 75
	Sólidos Suspensos (%)	65 - 80
	Amônia (%)	<50
	Nitrogênio (%)	<60
	Fósforo (%)	<35
	Coliformes (unid. log)	1
Área requerida	Área (m <sup>2</sup> /hab)	0,03 -0,10
Energia	Potência Instalada (W/hab)	0
	Consumo energético (kWh/hab.ano)	0

Tabela 3.5 – Resumo das informações do tratamento com reator UASB

Item	Parâmetro	Reator UASB
Volume de lodo	A ser tratado (L lodo/hab.dia)	70 - 220
	A ser disposto (L lodo/hab.dia)	10 - 35
Custos	Implantação (R\$/hab)	40 - 120
	Operação e manutenção (R\$/hab.ano)	6 - 10

Fonte: Adaptado de Von Sperling (2014)

A produção de metano em reatores UASB pode ser calculada pelo método de estimativa de degradação de DQO a partir da equação (3.3) (CHERNICHARO, 2007):



Logo, um mol de metano requer 2 moles de oxigênio para sua completa degradação. Cada 16g de CH<sub>4</sub> produzido e perdido para a atmosfera corresponde a 64g de DQO removida do efluente. Em condições normais de temperatura e pressão, isso corresponde a 350 ml de CH<sub>4</sub> formado para cada grama de DQO removida. De forma simplificada, a determinação da parcela de DQO convertida em CH<sub>4</sub> pode ser calculada pela equação (3.4) (CHERNICHARO, 2007).

$$DQO_{CH_4} = Q_{med} \times (S_0 - S) - Y_{OBS} \times Q_{med} \times S_0 \quad (3.4)$$

Onde:

DQO<sub>CH<sub>4</sub></sub>: carga de DQO convertida em metano (kgDQO<sub>CH<sub>4</sub></sub>/dia);

Q<sub>med</sub>: vazão média afluyente (m<sup>3</sup>/dia);

S<sub>0</sub>: concentração de DQO afluyente (kgDQO/m<sup>3</sup>);

S: concentração de DQO efluente (kgDQO/m<sup>3</sup>);

Y<sub>OBS</sub>: coeficiente de produção de sólidos no sistema em termos de DQO (kgDQO<sub>lodo</sub>/kgDQO<sub>apl</sub>). Segundo Chernicharo (2007), Y<sub>OBS</sub> varia de 0,11 a 0,23 kgDQO<sub>lodo</sub>/kgDQO<sub>apl</sub>.

A conversão da massa de metano em produção volumétrica pode ser feita utilizando-se as equações (3.5) e (3.6) (CHERNICHARO, 2007):

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (3.5)$$

$$K(t) = \frac{P \times K_{DQO}}{R \times (273 + T)} \quad (3.6)$$

Onde:

$Q_{CH_4}$ : produção volumétrica de metano ( $m^3/dia$ );

$K(t)$ : fator de correção para a temperatura operacional do reator ( $kgDQO/m^3$ );

$P$ : pressão atmosférica (1 atm);

$K_{DQO}$ : DQO correspondente a um mol  $CH_4$  (64 gDQO/mol);

$R$ : constante dos gases (0,08206 atm.L/mol.K);

$T$ : temperatura operacional do reator ( $^{\circ}C$ ).

Pode-se estimar a produção total de biogás, a partir do teor esperado de metano na sua composição, conforme equação (3.7) (CHERNICHARO, 2007).

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad (3.7)$$

Onde:

$Q_{biogás}$ : produção volumétrica de biogás ( $m^3/dia$ );

$Q_{CH_4}$ : produção volumétrica de metano ( $m^3/dia$ );

$C_{CH_4}$ : concentração de metano no biogás (%).

Segundo Chernicharo (2007), no caso de tratamento de esgotos domésticos,  $C_{CH_4}$  varia de 70 a 80%.

Geralmente as estimativas de produção de metano por DQO não consideram as porções de metano que seguem dissolvidas no efluente tratado ou as que são emitidas para atmosfera. Apesar das baixas concentrações de sulfatos no esgoto doméstico, há também uma pequena porção de metano que é perdida no processo de redução de sulfatos durante a digestão anaeróbia (METCALF e EDDY, 2003).

Souza e Chernicharo (2011a) estudaram as perdas de metano no processo anaeróbio e concluíram que 36% a 40% do metano gerado em reatores UASB fica dissolvido no efluente tratado e cerca de 4% é perdido na superfície do decantador.

Pierotti (2007) apresentou um balanço de massa de um processo anaeróbio, onde a parcela de DQO convertida em metano foi dividida em duas partes: o percentual de metano presente no biogás gerado foi de 20% a 25% e o percentual de metano dissolvido no efluente também foi de 20% a 25% da DQO afluente.

Souza (2010) mediu o balanço de massa de DQO em uma planta piloto e uma planta de demonstração de reatores UASB e observou que a DQO total foi convertida nas seguintes parcelas: (i) DQO dissolvida no efluente tratado, de 14% a 24%; (ii) DQO convertida em lodo no efluente, 10% a 20%; (iii) DQO convertida em lodo retido no reator, 8% a 10%, (iv) DQO convertida em metano presente no biogás, 24% a 30%, (v) DQO convertida em metano dissolvido no efluente, 16% a 18% e (vi) DQO usada na redução de sulfatos, 4,5% a 5%.

Nesse sentido, Lobato *et al.* (2012) desenvolveram uma metodologia para estimar as perdas de metano e o potencial de reaproveitamento de energia no tratamento anaeróbio de esgoto doméstico em reatores UASB. O modelo matemático do balanço de massa inclui todas as rotas de conversão e perdas no processo anaeróbio: a parcela de DQO usada na redução de sulfatos; a parcela convertida em lodo que engloba a porção que se mantém no reator e a porção que é perdida no efluente tratado; a parcela não convertida em metano dissolvida e descartada junto com o efluente tratado; a parcela convertida em metano que é captado em forma de biogás e ainda a parcela convertida em metano que permanece no reator ou que segue dissolvido no efluente tratado (perdas).

A metodologia desenvolvida por Lobato *et al.* (2012) foi aplicada a três cenários distintos: pior caso, onde a recuperação de energia é baixa por se tratar de sistemas que operam com efluentes mais diluídos com alta presença de sulfatos, baixa eficiência na remoção de DQO e alta taxa de perda de metano; melhor caso, onde a recuperação de energia é maior por envolver sistemas que operam com efluentes mais concentrados, com baixa concentração de sulfatos, alta eficiência na remoção de DQO e baixas taxas de perdas de metano; caso típico, onde foi considerado um sistema operando com valores intermediários. A Tabela 3.6 apresenta os resultados encontrados nas simulações.

Tabela 3.6 – Resultados das simulações de balanço de massa em termos de DQO, considerando todas as rotas de conversão

Cenários	DQO convertida em lodo (%)	DQO consumida na redução de sulfato (%)	DQO não convertida em metano e perdida no efluente tratado (%)	DQO convertida em metano dissolvido e descartado junto com o efluente tratado (%)	DQO convertida em metano presente no biogás captado (%)	DQO convertida em metano e perdida no reator (%)
Pior caso	13	7	40	17	20	3
Melhor caso	15	3	30	11	39	2
Caso Típico	14	5	35	13	30	3

Fonte: Adaptado de Lobato *et al.* (2012)

Os resultados mostram que, apesar de 40% a 52% da DQO ser convertida em metano no processo anaeróbio, apenas 20% a 39% são efetivamente recuperados na forma de biogás e podem ser convertidos em energia. Desta maneira, foi possível estimar a produção de biogás, de metano e o potencial energético efetivamente gerado na digestão anaeróbia de esgoto doméstico através reatores UASB, conforme apresentado na Tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Resultados para a produção de metano, biogás e energia no tratamento de esgoto doméstico com reatores UASB

		Pior caso	Melhor Caso	Caso Típico
<b>Produção de metano</b>	NLCH <sub>4</sub> /hab.dia	6,8	13,7	10,2
	NLCH <sub>4</sub> /m <sup>3</sup> de efluente	42,2	81,3	64,2
	NLCH <sub>4</sub> /kg DQO removida	113,4	196	158,3
<b>Produção de biogás</b>	NLbiogás/hab.dia	9,8	17,1	13,6
	NLbiogás/m <sup>3</sup> de efluente	60,3	101,6	85,6
	NLbiogás/kg DQO removida	162	245	211,1
<b>Potencial Energético</b>	MJ/m <sup>3</sup> de efluente	1,5	2,9	2,3
	MJ/kgDQO removida	4,1	7	5
	MJ/Nm <sup>3</sup> biogás	25,1	28,7	26,9
	MJ/hab. ano	89,7	179,3	133,8

Fonte: Adaptado de Lobato *et al.* (2012)

Zhao (2011) realizou experimentos práticos com reatores anaeróbios em diferentes temperaturas e obteve uma produção de metano na faixa de 0,1 a 0,2 l CH<sub>4</sub>/gDQO.

### 3.3.2 Digestores anaeróbios de lodo

Os digestores anaeróbios de lodo são reatores biológicos fechados construídos em aço ou concreto, de formato cilíndrico ou oval, onde o lodo é misturado e, em países temperados, também aquecidos (ANDREOLI et al., 2014). Na Alemanha, segundo a StBA (2009), 76% do lodo sanitário de esgoto tratado são digeridos a temperaturas próximas de 35°C para produção de produção de biogás. A Figura 3.5 mostra um esquema de um digestor de lodo cilíndrico.



Figura 3.5 – Esquema de um digestor anaeróbio e lodo cilíndrico

Fonte: BRASIL, 2015a.

De acordo com Qasin (1999), a produção de metano gerado nos digestores anaeróbios de lodo pode ser estimada a partir das equações cinéticas (3.8) e (3.9).

$$P_{XY} = \frac{Y \times E \times DBO_{ult}}{1 + k_d \times \theta_c} \quad (3.8)$$

$$V_{CH_4} = \frac{0,35m^3}{kg} \times [(Ef * DBO_{ult}) - 1,42 \times P_{XV}] \quad (3.9)$$

Onde:

$P_{XV}$ : produção líquida de massa celular (kg/dia);

$Y$ : coeficiente de crescimento celular (kgSSV/kgDBO<sub>aplicada</sub>);

Ef: eficiência na utilização do resíduo;

$DBO_{ult}$ : carga de  $DBO_{ult}$  do lodo cru afluente ao digestor;

$k_d$ : coeficiente de morte celular ou endógeno;

$\theta_C$ : tempo de residência celular ou período de digestão;

$V_{CH_4}$ : volume de metano produzido por dia ( $m^3/dia$ );

0,35: fator teórico de conversão de 1 kg de  $DBO_{ult}$  em metano;

1,42: fator de conversão de 1 kg de  $DBO_{ult}$  em massa celular ( $kgSV/kgDBO_{ult}$ );

Nuvolari (2011) indica, para esgoto doméstico, valores usuais de Y, variando de 0,10 a 0,20  $kgSSV/kgDBO_{aplicada}$ ., valores E na faixa de 0,6 a 0,9 e valores de  $k_d$  de 0,02 a 0,04  $dia^{-1}$ .

Nuvolari (2011) também indica algumas alternativas e estimar o volume de gás gerado nos digestores de lodo baseados em experiências práticas:

- 0,50 a 0,75  $m^3$  de biogás/ $kgSV$  produzido;
- 0,75 a 1,12  $m^3$  de biogás/ $kgSV$  reduzido;
- 0,03 a 0,04  $m^3/per\ capita$  por dia.

Felca (2016) realizou experimentos práticos com digestores anaeróbios de lodo e obteve uma faixa de produção de biogás de 0,005 a 0,024  $kg\ biogás / kg$  de matéria orgânica.

Moni Silva (2016) obteve uma produção de metano de 10,99  $ml\ CH_4 / gSTV$  através de experimentos práticos com digestores de lodo utilizando lodo de secagem.

Maragkaki *et al.* (2017) estudaram o efeito da co-digestão de lodo de esgoto, com pequenas quantidades de subprodutos agroindustriais e resíduos de urbanos em escala laboratorial. Os resultados mostraram que a produção de biogás aumentou de 14% para 674% com a co-digestão.

Ratanatamskul *et al.* (2014) desenvolveram um digestor anaeróbio de fase única para co-digestão de resíduos alimentares e lodo de esgoto para a produção de biogás. Os resultados indicaram que a maior taxa de produção de biogás foi obtida com o menor tempo de retenção hidráulica, de 19 dias. Entretanto, o biogás com maior teor de metano foi obtido o tempo de retenção hidráulica (TRH) de 27 dias, quando a redução de sólidos totais foi de 70%.

Em ETEs de médio e grande porte, é comum a utilização de dois digestores em série, o primeiro opera como um reator de mistura, responsável pela estabilização acelerada da matéria orgânica, enquanto no segundo há a separação de fases sólida e líquida. (ANDREOLI *et al.*, 2014).

### **3.4 Geração de energia em ETEs**

O aproveitamento energético do biogás em estações de tratamento de esgoto pode auxiliar no aumento de eficiência do próprio tratamento como também aumentar o custo-benefício deste tratamento, tornando-o economicamente mais atrativo. Santos (2000), ao estudar melhorias para o tratamento anaeróbio de lodo em Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETARs), sugeriu a utilização do biogás gerado no processo para produção de calor e eletricidade, tanto para otimizar o próprio processo anaeróbio, quanto para consumo local de energia elétrica, ou ainda, para exportação para a rede elétrica local.

Apesar de no Brasil o número de ETEs que fazem a recuperação energética do biogás ainda ser pequeno, em países como a Alemanha, segundo IN (2015), mais de 800 ETEs produzem 900GWh de energia elétrica e 1800 GWh de calor através do biogás. Na Itália, Fabbri *et al.* (2013) e Carrosio (2013) observaram que o número de ETEs com recuperação energética de biogás subiu de 10 para 900 em poucos anos.

No cenário nacional podemos destacar a ETE Ribeirão Preto, a primeira a utilizar energeticamente o biogás através de motores de cogeração a ciclo Otto e a ETE Arrudas, em Belo Horizonte, que utiliza microturbinas para conversão energética do biogás, ambas inauguradas em 2011. A ETE Ribeirão Preto possui potência instalada de 1,5 MW, gerando 16.725 kWh/dia, o que supre 60% do consumo energético da planta. Já a ETE Arrudas possui 2,4 MW de potência instalada, suprimindo 90% da sua demanda interna e aproveitando o calor dos gases de exaustão das microturbinas para a secagem térmica do lodo. (MOREIRA e VALENTE, 2015).

#### **3.4.1 Processamento do biogás**

O biogás pode ser classificado em três categorias de acordo com o nível de pré-tratamento a que é submetido antes de sua utilização final. São elas (WORLD BANK /ESMAP):

- Combustível de baixo teor: a utilização de biogás como combustível de baixo teor requer processamento mínimo como remoção da umidade;

- Combustível de médio teor: a utilização de biogás como combustível de médio teor requer, além de unidades de remoção de umidade, unidades de remoção de matéria particulada e compostos gasosos como enxofre e silício. Também requer unidade de compressão.
- Combustível de alto teor: a utilização de biogás como combustível de alto teor envolve um pré-tratamento mais elaborado com separação de dióxido de carbono, sulfato de hidrogênio e possíveis compostos orgânicos voláteis remanescentes.

Segundo Conestoga-Rovers e Associates (1996), o combustível de baixo e médio teor produzido a partir do biogás tem poder calorífico de 16,8 MJ/m<sup>3</sup>, enquanto que o combustível de alto valor de poder calorífico de 37,3 MJ/m<sup>3</sup>.

O pré-tratamento do biogás é necessário para assegurar a eficiência de sua utilização como fonte de energia. Para a produção de energia elétrica e energia térmica, a remoção de impurezas como umidade, siloxanos e, principalmente, H<sub>2</sub>S, já é suficiente. Já para a produção do biometano é necessária a aplicação de um processo de purificação muito mais exigente, incluindo a remoção de CO<sub>2</sub>. De forma geral, o pré-tratamento do biogás consiste nas seguintes etapas de processamento, que são empregadas conforme o nível de qualidade do combustível exigido pela tecnologia a ser aplicada na conversão de energia (WORLD BANK /ESMAP; BRASIL, 2015a):

- Remoção de umidade

A etapa primária de tratamento do biogás é a remoção de vapor d'água. Esta etapa é importante para reduzir a natureza corrosiva do biogás e consequentemente, reduzir os custos de manutenção dos equipamentos empregados no processo de conversão de energia.

As técnicas de redução de umidade mais usuais são: emprego de separadores de umidade, filtros coalescentes, esfriamento direto, compressão seguida de esfriamento, absorção e adsorção.

Os separadores de umidade utilizam o princípio de decantação, o biogás é colocado a girar em um cilindro onde sua velocidade é reduzida de modo que o vapor d'água se condense em forma de gotículas em suas paredes, onde são coletadas. Os filtros coalescentes são utilizados para coletar as gotículas menores que são foram captadas

pelos separadores e consistem em telas de arame pelas quais o biogás é forçado a passar.

A técnica de esfriamento utiliza trocadores de calor para remover a umidade do biogás, enquanto a compressão auxilia sua desidratação, mas aumenta sua temperatura.

No processo de absorção, a remoção de umidade é feita por meio de reações físicas e químicas do biogás com um líquido absorvente que possui alta afinidade com água. O biogás é introduzido em uma coluna com líquido absorvente ou o líquido é borrifado na passagem do biogás.

No processo de adsorção, a remoção de umidade é feita utilizando um material sólido granulado que adere a água à medida que o biogás flui sobre ele.

- Remoção de particulado

As técnicas de remoção da umidade geralmente também são eficientes para remoção da matéria particulada fina, já que estas partículas ficam aderidas a água. Porém, filtros particulados também podem ser usados para este fim, mas requerem manutenção/substituição com certa frequência.

- Remoção de compostos gasosos

Os compostos gasosos normalmente presentes no biogás que causam prejuízo aos equipamentos de conversão de energia são: compostos de enxofre, compostos orgânicos não-metano (NMOCs) e compostos orgânicos voláteis (VOCs).

Para remoção VOCs, normalmente, é utilizado o carbono granulado ativado (GAC) e para remoção de sulfato de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), a limalha de ferro. Também podem ser utilizados solventes seletivos para remover gases específicos do biogás.

- Extração de dióxido de carbono

O dióxido de carbono quando combinado à água se torna bastante corrosivo. Alguns métodos de remoção utilizam técnicas de adsorção, solventes, baixas temperaturas, alta pressão e membranas seletoras. Todas estas técnicas são caras e sua implantação depende do retorno previsto para a aplicação final do biogás. Por exemplo para a produção do biometano, a remoção de CO<sub>2</sub> é fundamental para atingir o índice de

Wobbe, um importante parâmetro de qualidade que permite sua injeção na rede de gás natural e seu uso como combustível veicular.

### 3.4.2 Aplicações do biogás

Existem diversas aplicações energéticas para biogás, que para serem implantadas, dependem do teor combustível do biogás processado. Alguns estudos para aplicação do biogás já foram realizados no Brasil como, Guardabassi e Pires (2006) que avaliaram a implantação de um sistema de cogeração de energia elétrica através do biogás produzido pelo do tratamento do esgoto, combinado ao gás natural em condomínio residencial na cidade de São Paulo, Godoy Junior (2006) que propôs um sistema de baixo custo para a implantação da cogeração utilizando gás natural de baixa pressão e biogás produzido em uma estação de tratamento de esgoto e Martins *et al.* (2006) que avaliaram a geração de eletricidade por meio da utilização do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto da região metropolitana de São Paulo, com intuito de suprir a demanda a interna de energia.

Meneses-Jácome *et al.* (2016) realizaram uma revisão do estado da arte das tecnologias de recuperação energética de efluentes agro-industriais utilizadas na América Latina. Os autores concluíram que o uso do biogás para produção de eletricidade e biometano é significativamente baixo na região quando comparado a outras fontes de energia renováveis, apesar dos benefícios ambientais e financeiros que estas alternativas promovem. Ressaltaram a necessidade de implantação de políticas públicas de incentivo ao uso destas tecnologias.

Skovsgaard e Jacobsen (2017) analisaram os benefícios do uso do biogás em escala comercial na Dinamarca. Os autores sustentam que a produção em escala de biogás eleva a viabilidade econômica da injeção deste na rede de gás natural, mas que para manter os preços, a produção do biogás deveria utilizar a combinação de vários substratos.

A Figura 3.6 mostra as principais aplicações do biogás produzido pela digestão anaeróbia.

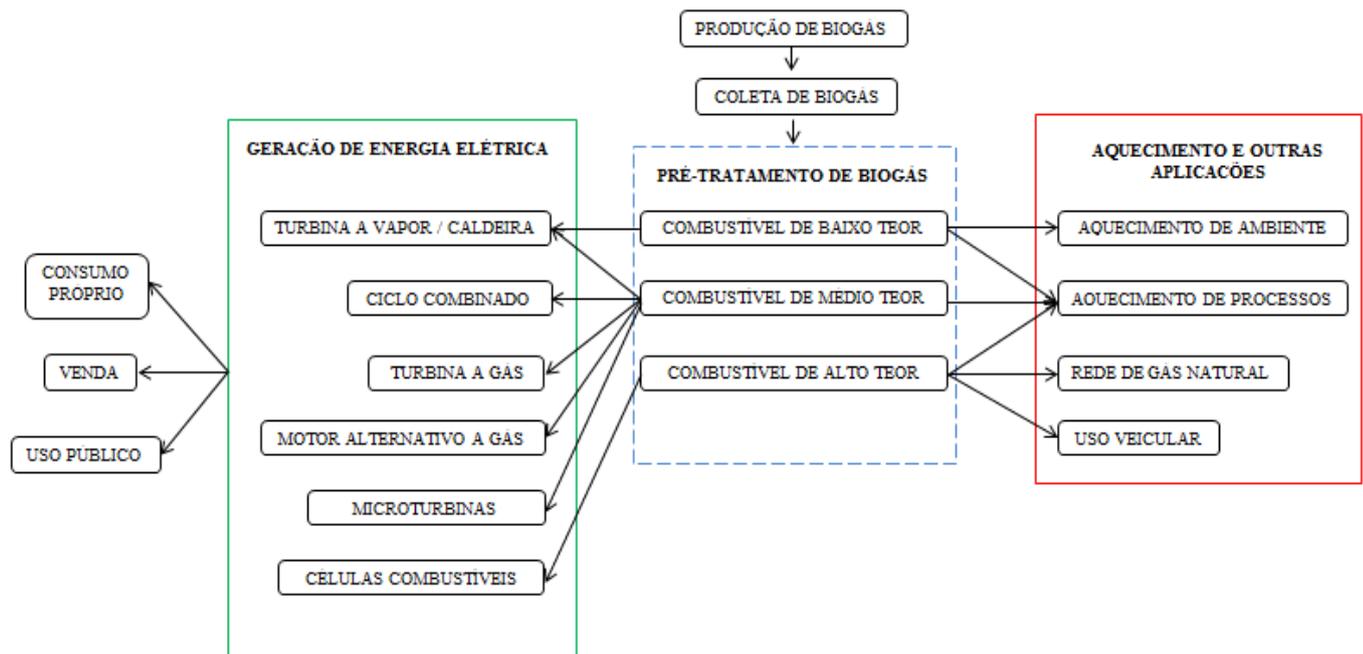


Figura 3.6 – Principais aplicações do biogás

Fonte: Adaptado e traduzido de World Bank/ESMAP

De acordo com a categoria alcançada após o pré-tratamento, o biogás pode ser utilizado como fonte de energia para diversas aplicações, conforme detalhado a seguir (WORLD BANK /ESMAP).

- Aquecimento

A energia proveniente do biogás pode ser utilizada para fins de aquecimento, seja para otimizar o próprio processo de digestão anaeróbia dos esgotos, ou em outros processos industriais que utilizem fornalhas, secadoras ou estufas. França (2002) estudou a utilização do biogás oriundo do tratamento de esgoto via reator UASB no tratamento térmico do lodo remanescente e concluiu que houve aumento da biodegradabilidade do mesmo.

- Caldeiras / Turbina a vapor

O biogás pode ser utilizado para aquecer água em uma caldeira e gerar vapor para acionar uma turbina a vapor. A instalação a vapor é composta, basicamente, por bomba, caldeira, turbina e condensador, conforme ilustra Figura 3.7. Na maioria das instalações, o condensador é um circuito separado de água com torre de resfriamento.

O vapor condensado retorna para a caldeira através de uma bomba e o ciclo se completa.

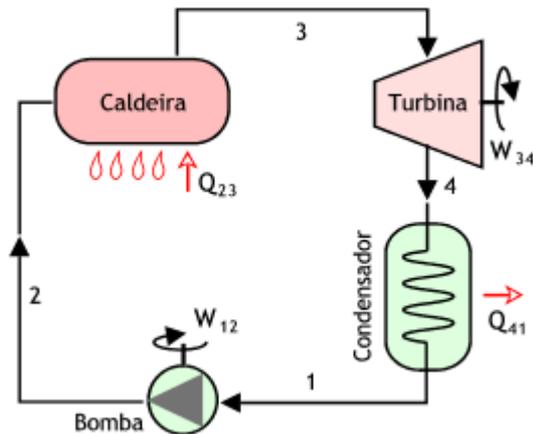


Figura 3.7 – Fluxograma simplificado do ciclo a vapor

Fonte: Adaptado de Souza (1980)

O ciclo Rankine é o ciclo termodinâmico utilizado nas máquinas a vapor, representado na Figura 3.8. Na etapa 1-2 a bomba comprime isentropicamente a água. Na etapa 2-3 a água é aquecida na caldeira até atingir a temperatura de vaporização. Na etapa 3-4 é realizada a expansão adiabática reversível, com produção de trabalho na turbina. O ciclo se encerra na etapa 4-1 através da transferência de calor para fonte fria a pressão constante.

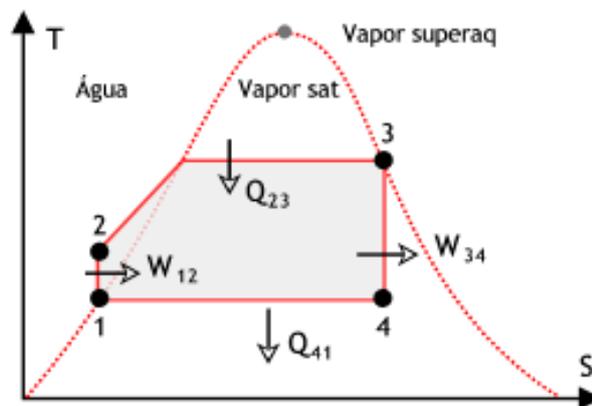


Figura 3.8 – Fluxograma Ciclo Rankine simples

Fonte: Adaptado de Souza (1980)

- Turbinas a gás

O biogás também pode ser utilizado para acionar diretamente uma turbina a gás. A conversão de energia via ciclo a gás inclui um compressor de ar, uma câmara de combustão e uma turbina, conforme ilustra a Figura 3.9. O ar comprimido é misturado ao combustível na câmara de combustão, onde é queimado. Os gases resultantes da queima se expandem, acionando a turbina que por sua vez, aciona o gerador elétrico.

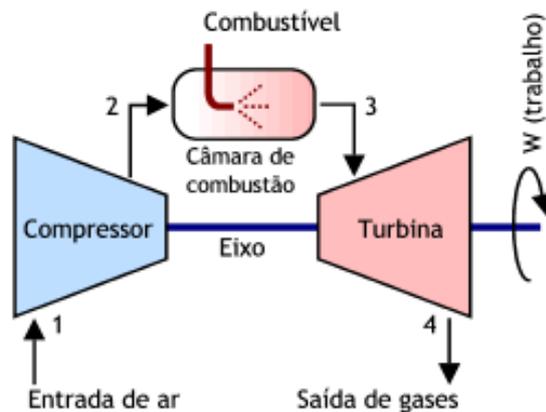


Figura 3.9 – Fluxograma simplificado da turbina a gás

Fonte: Adaptado de Souza (1980)

O Ciclo Brayton, representado na Figura 3.10, é o ciclo padrão para a turbinas a gás. Na etapa 1-2 o ar é comprimido de forma adiabática por um compressor. Na etapa 2-3, o ar se expande à pressão constante na câmara de combustão devido ao fornecimento de calor pelo processo de combustão. Na etapa 3-4, o ar aquecido pela combustão movimenta uma turbina num processo teoricamente adiabático. O ciclo é completado na etapa 4-1 por um processo de resfriamento isobárico.

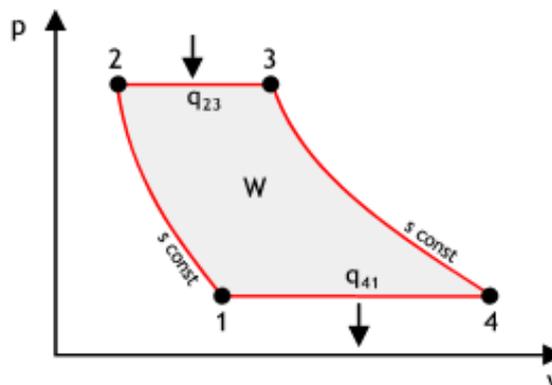


Figura 3.10 – Fluxograma Ciclo Brayton

Fonte: Adaptado de Souza (1980)

- Ciclo combinado

Os sistemas de ciclo combinado utilizam uma combinação de turbinas a vapor e turbinas a gás. O calor proveniente dos gases de exaustão gerados na turbina a gás é recuperado, e utilizado na caldeira para gerar vapor e acionar a turbina a vapor, conforme ilustra a Figura 3.11. Esse procedimento pode aumentar significativamente a eficiência na conversão de energia do conjunto.

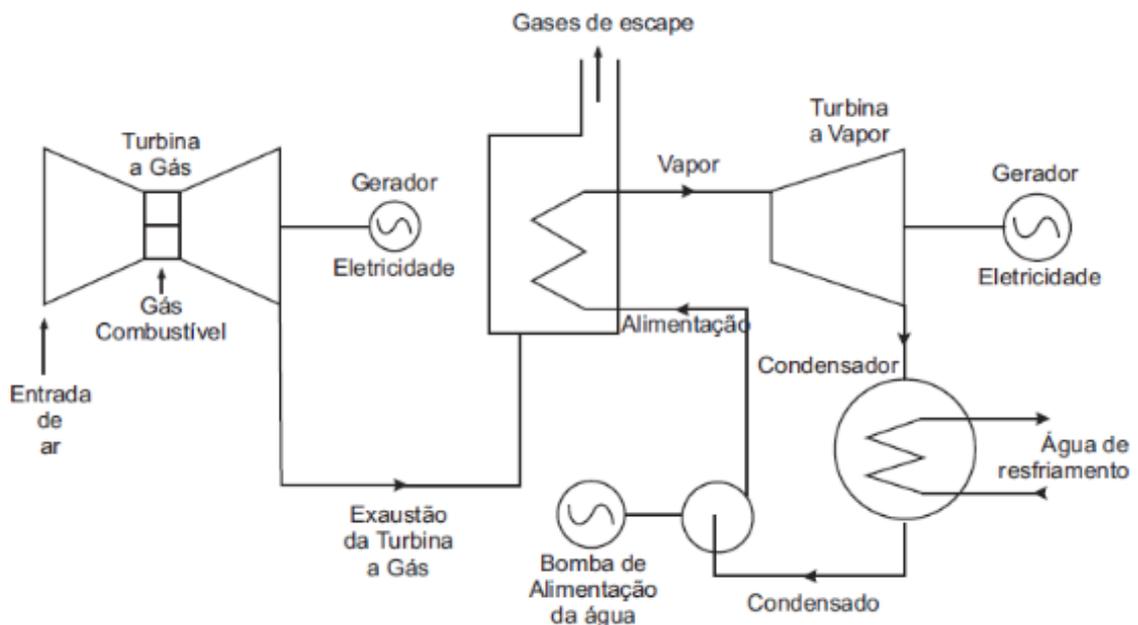


Figura 3.11 – Fluxograma Ciclo Combinado

Fonte: Adaptado de Souza (1980)

Brizi (2002) avaliou alternativas de aplicação de um sistema de cogeração de energia por meio de biogás e gás natural em uma miniestação de tratamento de esgoto, e concluiu que os sistemas apresentaram eficiência acima de 60%.

- Microturbinas

O nome microturbina é usado para designar as turbinas a gás de menor porte, em geral, com potência de até 1 MW. São mais compactas e apresentam menor custo que a turbinas de grande porte.

Basrawi *et al.* (2012) estudaram o dimensionamento de microturbinas de cogeração de acordo com o tamanho da estação de tratamento de esgoto, em diferentes condições de temperatura ambiente, carga e eficiência. Foram propostas três combinações de tamanho de microturbinas 30 kW, 65 kW e 200 kW. Os resultados mostraram que as

microturbinas têm o mesmo consumo com carga total quando o biogás tem a maior eficiência. Porém quando a temperatura ambiente diminui a eficiência na produção do biogás também diminui e a operação com carga parcial é mais frequente. Basrawi *et al.* (2015) avaliam que a combinação de três tipos de microturbinas (30 kW, 65 kW e 200 kW) atinge maior eficiência na produção de energia, porém apresenta maior custo de investimento. Todas as configurações apresentaram valor presente líquido (VPL) positivo, sendo que, quanto maior a potência utilizada, maior o será VPL.

- Motores alternativos a gás

Os motores alternativos a gás utilizam gases de combustão para acionamento de pistões, convertendo energia térmica em energia mecânica através de ciclos termodinâmicos de expansão, compressão e mudança de temperatura. Os ciclos termodinâmicos envolvidos são ciclo Otto, ilustrado na Figura 3.12 e o ciclo Diesel, apresentado na Figura 3.13.

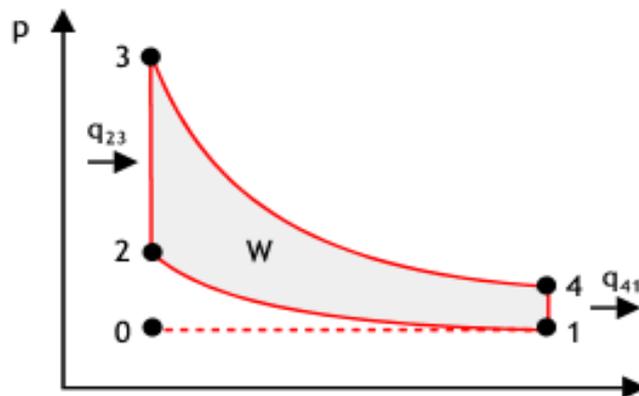


Figura 3.12 – Ciclo Otto

Fonte: Adaptado de Souza (1980)

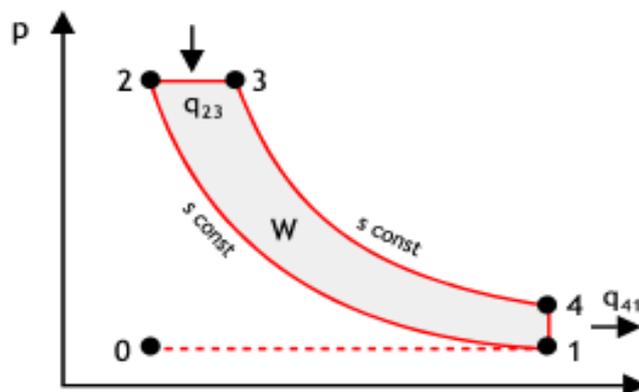


Figura 3.13 – Ciclo Diesel

Fonte: Adaptado de Souza (1980)

No ciclo Otto a ignição é feita por centelha, na etapa 1-2 há uma compressão adiabática, na etapa 2-3 há adição isométrica de calor, na etapa 3-4 ocorre uma expansão adiabática e o ciclo se encerra na etapa 4-1 com rejeição isométrica de calor.

No ciclo Diesel a ignição é feita por compressão, e este se difere do ciclo Otto na etapa 2-3 quando o calor é adicionado à pressão constante, enquanto no ciclo Otto o calor é fornecido a volume constante.

A principal vantagem dos motores alternativos a gás em relação às outras tecnologias de conversão de energia é ausência de trocadores de calor no circuito do fluido de trabalho, como a caldeira e condensador de uma instalação a vapor, por exemplo. Além disso, todas as peças podem trabalhar a temperaturas bem abaixo da máxima temperatura cíclica, o que permite o uso de temperaturas cíclicas bastante altas e torna possível obter alta eficiência no processo. Os motores também apresentam menor custo de instalação e manutenção e partida mais rápida que outras tecnologias. (RAHDE, 2006)

- Motor Stirling

O motor Stirling é um motor a pistão a ar quente, que utiliza o Ciclo de Stirling, uma versão alterada do ciclo de Carnot, onde os dois processos isentrópicos apresentados no ciclo de Carnot são substituídos por dois processos isocóricos. A Figura 3.14 mostra o fluxograma simplificado do Ciclo Stirling: na etapa 1 ocorre uma expansão isotérmica, onde uma fonte de calor externa aquece o gás que se expande a temperatura constante; na etapa 2 o calor é retirado do gás de forma que o volume se mantenha constante; na etapa 3 o gás é refrigerado ocorrendo uma compressão isotérmica e ao final do ciclo, na etapa 4, o gás é aquecido até a temperatura inicial.

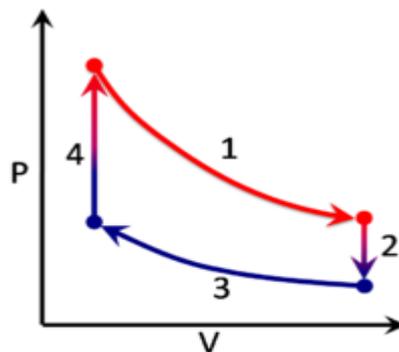


Figura 3.14 – Ciclo Stirling

Fonte: Adaptado de Souza (1980)

A principal vantagem desse motor é que, como a combustão é contínua, a queima do combustível é mais eficiente e completa e, portanto, ele seria menos poluente. Porém, como desvantagens existem a dificuldade de dar partida no motor e de manter a temperatura constante durante o recebimento e entrega do calor, além da irregularidade na velocidade do motor e problemas com estanqueidade em relação do gás. (SOUZA, 1980)

- Células combustíveis

A célula combustível é uma tecnologia relativamente nova que converte a energia a partir da reação eletroquímica do hidrogênio presente no biogás e o oxigênio do ar. O subproduto desta conversão é a água. É uma tecnologia que apresenta alto custo e requer um alto nível de purificação do biogás.

- Introdução na rede de gás natural

O processamento do biogás em combustível de alto teor, por vezes chamado de biometano, permite que este seja injetado na rede de gás natural e comercializado pelas distribuidoras de gás. A resolução 8/2015 da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) autorizou e regulamentou a venda do biometano para uso veicular, em instalações comerciais e residenciais e para geração de energia, e a Resolução 685/2017 estabeleceu as especificações que o biometano oriundo de aterros sanitários precisa atender para ser destinado a estas aplicações. Esses critérios visam garantir a injeção do combustível sem danos à rede ou ao seu poder calorífico, portanto, o biometano deve possuir percentual mínimo de 96,5% de metano e de 0,5% de oxigênio.

Bidart *et al.* (2014) compararam o potencial energético do biogás produzido a partir da biodigestão do lodo em ETEs através da geração de eletricidade a partir da combustão direta e da produção de biometano para injeção na rede de gás natural no Chile. Os resultados mostraram que a geração de eletricidade é mais economicamente competitiva que a produção do biometano. Segundo os autores, a produção de biometano seria de 19 MMNm<sup>3</sup>/ano a um custo de € 43MM/BTU enquanto a produção de eletricidade seria de 75 GWh/ano com um custo de € 21,5/kWh.

Rotunno *et al.* (2017) analisaram o uso do biogás como substituto do gás natural na Itália. Os resultados mostraram que há alta eficiência nos processos de injeção de

biogás na rede de gás natural e na produção de biometano para abastecimento de veículos, com custo de produção de € 0,54/m<sup>3</sup> e € 0,73/m<sup>3</sup>, respectivamente.

- Uso Veicular

Para uso como combustível veicular o biogás deve passar por todas as etapas de purificação para evitar danos ao motor devido a impurezas e para aumentar seu poder calorífico. Também requer compressão para garantir a eficiência na combustão. O uso de biometano como combustível ainda é incipiente, mesmo em países europeus, apesar do grande potencial de mitigação dos GEEs que ele pode promover. Na Suécia as normas de qualidade para a injeção de biometano são de 1999, e especificam um teor de metano de no mínimo 96%, além de um teor de enxofre abaixo de 23 mg/m<sup>3</sup>, sendo que cerca de 10% do biometano é utilizado como combustível. Na Suíça mais de 1.250 veículos são movidos a biometano / gás natural, que consomem a maior parte do biogás tratado disponível no país. Na Alemanha, o biometano é fornecido em cerca de 35% dos postos de abastecimento de gás natural. Para promover a difusão do biometano como combustível, é necessário considerar a rentabilidade de toda sua cadeia de produção, desde a geração do biogás, passando pelo seu tratamento até a sua distribuição em redes de gás e postos de abastecimento. (BRASIL, 2016)

Vários autores estudaram as diversas alternativas de utilização do biogás como fonte de energia em várias partes do mundo. Arnò *et al.* (2017) investigaram a viabilidade técnica e econômica da digestão anaeróbia em áreas de baixa densidade de produção de resíduos. Os autores propuseram uma metodologia para a análise energética, econômica e ambiental de processos de digestão anaeróbia úmidos e secos envolvendo a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) e lodo de esgoto como matéria-prima para produção de biogás ou biometano, com geração combinada de calor e eletricidade três áreas na Itália. Os resultados mostraram que, com os atuais subsídios do governo italiano, o processo úmido e a produção de biometano é, em geral, são as melhores alternativas para instalações grandes com mais de 500 kW. Já para zonas de baixa produção de resíduos, menos de 4 t/km<sup>2</sup> por ano, o processo seco associado a um sistema de cogeração são as melhores opções. Em termos de emissão de GEE, a produção de biometano é a melhor opção em todos os cenários.

Mohammed *et al.* (2016) avaliaram a viabilidade econômica da utilização do biogás para cozimento e produção de eletricidade em Ghana. Os resultados mostraram que uma planta de

9000 m<sup>3</sup> obteve valor presente líquido (VPL) positivo de 23% e a opção de uso do biogás para cozimento apresenta menor tempo de retorno, cinco anos.

Santos *et al.* (2016b) demonstram a viabilidade econômica da geração de energia a partir do biogás produzido em ETEs do Brasil para cidades com população superior a 300.000 habitantes e ressaltam que o país tem potencial de produzir cerca de 1 TWh até 2040.

Além dos benefícios econômicos e ambientais, a exploração do biogás também gera benefícios sociais. Guenther-Lübbers *et al.* (2016) estudaram os efeitos socioeconômicos da produção de biogás nas áreas rurais da Alemanha. Os autores ressaltam os benefícios da produção do biogás principalmente na oferta de emprego e no incentivo ao uso de fontes de energia renováveis.

### 3.4.3 Geração de energia elétrica

A potência elétrica efetivamente disponível dependerá da eficiência do processo de conversão de energia, que por sua vez, depende da tecnologia empregada. A escolha da tecnologia mais adequada para o sistema se dá em função da estimativa do volume de biogás gerado no processo anaeróbio e do tipo de tratamento ao qual este biogás será submetido. Conestoga-Rovers e Associates (1996) resumiram as condições e rendimentos das principais tecnologias de conversão de energia do biogás em eletricidade, conforme apresentado na Tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Condições e rendimentos das tecnologias de conversão de energia

<b>Tecnologia</b>	<b>Variação típica de fluxo</b>	<b>Potência gerada</b>	<b>Eficiência na conversão de energia</b>
Microturbinas	< 0,05 m <sup>3</sup> /s	< 100 kW	25 a 30%
Motores alternativos	0,07 a 2,36 m <sup>3</sup> /s	0,5 a 12 MW	32 a 40%
Turbinas a gás	1,89 a 9,44 m <sup>3</sup> /s	3 a 18 MW	26 a 32%
Ciclo a vapor	2,83 a 11,80 m <sup>3</sup> /s	10 a 50 MW	34 a 29%
Ciclo Combinado	2,36 a 11,80 m <sup>3</sup> /s	>10 MW	38 a 45%

Fonte: Adaptado de Conestoga-Rovers e Associates (1996)

Segundo Johansson *et al.* (1993), os custos operacionais para produção de biogás em plantas que utilizam reatores UASB de médio porte, variam em torno de US\$ 0,03/m<sup>3</sup> e US\$ 0,05/m<sup>3</sup>, já para plantas de grande porte, estes custos giram em torno de US\$ 0,02/m<sup>3</sup>.

Lee *et al.* (2017) apresentaram um método de projeto otimizado para maximizar a sustentabilidade de uma estação de tratamento de esgotos através de um sistema combinado

de produção de calor e eletricidade. O sistema proposto foi baseado na análise térmica, ambiental e econômica, considerando os efeitos das diferenças de temperatura nos trocadores de calor, diferentes valores de rendimentos dos componentes e a relação de pressão do compressor e da turbina a gás. Os resultados mostraram que o custo total e os impactos ambientais do sistema proposto são menores que os sistemas convencionais em 16,9% e 5,3%, respectivamente. A energia gerada pelo sistema otimizado pode cobrir 47% da demanda de eletricidade da ETE, além de 100% da demanda de calor do sistema.

Bougrier (2006) verificou a viabilidade da implantação do tratamento térmico e digestão anaeróbia do lodo em duas estações de tratamento de esgoto e concluiu que os custos de instalação destes sistemas são pagos pelo aumento da produção do biogás proporcionado e pela diminuição do volume final de lodo gerado.

Coelho *et al.* (2006) demonstraram a geração de eletricidade a partir do biogás proveniente do tratamento anaeróbio de esgotos, por meio de motores alternativos. Os autores destacaram que há variação na produção de biogás quando a alimentação do biodigestor não for constante, o que pode ocasionar paradas para manutenção dos equipamentos.

Costa (2006) comparou a viabilidade técnico-econômica e ambiental da geração de energia elétrica por meio da recuperação do biogás oriundo do tratamento anaeróbio na ETE de Barueri em São Paulo, utilizando as tecnologias de microturbinas e motores alternativos. Os resultados mostraram uma redução de cerca de 20% no consumo de energia elétrica da ETE.

Lamas (2007) verificou a viabilidade de implantação de uma mini-estação de esgoto autossuficiente, onde o biogás produzido é utilizado para geração de energia elétrica por meio de motores alternativos, o lodo é usado como biofertilizante e o efluente é utilizado para irrigação e fertilização das áreas verdes próximas a estação. Os resultados demonstraram que a proposta apresenta um tempo de retorno de investimento um terço menor que o de uma estação convencional.

Godoy Júnior *et al.* (2004) efetuaram uma análise técnico-econômica de uma miniestação de tratamento de esgoto e reuso de água, associando um sistema de cogeração a biogás ao tratamento anaeróbio de esgoto. Apresentaram custos de investimento, operação e manutenção de estações de tratamento de esgoto e concluíram ser economicamente viável em muitos casos.

## **4. Metodologia**

Para efetuar a estimativa de produção de biogás e viabilidade econômica da implantação o sistema de recuperação energética nas ETEs dos municípios sobre responsabilidade da COPASA em Minas Gerais, foram realizadas as seguintes etapas:

- 1) Levantamento, por meio do SNIS, das informações relativas saneamento básico nos municípios do estado de Minas Gerais como número de habitantes atendidos, volume de esgotos tratados e gastos com energia pela COPASA.
- 2) Cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no tratamento anaeróbio via UASB, considerando determinação da produção de biogás e metano através de quatro metodologias diferentes: (i) Método do balanço de massa de DQO e do potencial de recuperação de metano, segundo Lobato (2011); (ii) Método IPCC (2006); (iii) Método UNFCCC (2013) e (iv) Método CETESB (2006).
- 3) Discussão dos resultados gerados por cada metodologia empregada no cálculo da produção de biogás e metano nos municípios analisados.
- 4) Cálculo da produção de biogás e metano através da biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB.
- 5) Análise da viabilidade econômica da implantação do sistema de recuperação energética do metano no tratamento de esgotos e lodo nos municípios analisados.
- 6) Estimativa do potencial de redução de emissão de GEE no estado de Minas Gerais.

### **4.1 Levantamento das informações relativas ao saneamento básico no município do estado de Minas Gerais.**

Os dados dos municípios coletados no relatório do SNIS (2017), como número de habitantes atendidos, volume de esgotos tratados e gastos com energia pela COPASA, foram agrupados de acordo com o tamanho de suas respectivas populações, classificados em:

- Municípios com população menor que 50.000 habitantes;
- Municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes;
- Municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes;
- Municípios com população maior que 250.000 habitantes;

## 4.2 Cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no tratamento anaeróbio

De forma geral, o potencial energético disponível para conversão do biogás em energia elétrica pode ser determinado pela equação (4.1).

$$P_d = Q_{CH_4} \times PC_{CH_4} \quad (4.1)$$

Onde:

$P_d$ : potencial energético disponível (MJ);

$Q_{CH_4}$ : produção volumétrica de metano por dia ( $m^3/dia$ );

$PC_{CH_4}$ : poder calorífico do metano, 35,9 ( $MJ/m^3$ ).

A potência elétrica efetivamente disponível dependerá da eficiência da conversão de energia, e pode ser calcula pela equação (4.2).

$$P_e = \frac{Q_{CH_4} \times PC_{CH_4} \times \eta}{86.400} \times 1000 \quad (4.2)$$

Onde:

$P_e$ : potência elétrica efetiva gerada (kW);

$\eta$ : rendimento da conversão elétrica

A energia elétrica produzida depende do regime de operação da planta e pode ser determinado pela equação (4.3).

$$E = P_e \times h \times d \quad (4.3)$$

Onde:

$E$ : energia produzida (kWh);

$P_e$ : potência elétrica efetiva (kW);

$h$ : número de horas de operação por dia; considerado 22 horas.

$d$ : número de dias em operação por ano ou mês; considerado 30 dias.

A produção de biogás nas ETEs foi determinada por intermédio das quatro metodologias descritas a seguir.

#### 4.2.1 Método do balanço de massa de DQO e do potencial de recuperação de metano, segundo Lobato (2011)

O método de Lobato (2011) estabelece uma metodologia de cálculo da produção e metano através das rotas e conversão de DQO, considerando as perdas de metano dissolvidos no efluente e na fase gasosa nos reatores UASB. Os cálculos seguem os seguintes passos:

i) Cálculo da vazão média de esgoto afluente

$$V_{afi} = Pop \times C_{PC} \quad (4.4)$$

Onde:

$V_{afi}$ : vazão média de esgoto afluente (m<sup>3</sup>/dia);

Pop: número de habitantes (hab);

$C_{PC}$ : contribuição *per capita* de esgoto (m<sup>3</sup>/hab.dia).

ii) Cálculo da DQO removida

$$DQO_{removida} = Pop \times C_{PCDQO} \times E_{DQO} \quad (4.5)$$

Onde:

$DQO_{removida}$ : DQO removida do sistema por dia (kgDQO/dia);

Pop: número de habitantes (hab);

$C_{PCDQO}$ : contribuição per capita de DQO por dia (kgDQO/hab.dia).

$E_{DQO}$ : eficiência da remoção de DQO (%).

Será utilizado o valor de 0,1 kg/hab.dia para o parâmetro contribuição per capita de DQO ( $C_{PCDQO}$ ) e 65% para eficiência de remoção de DQO ( $E_{DQO}$ ), dentro da faixa sugerida por Von Sperling e Chrenicharo (2005).

iii) Cálculo da DQO convertida em lodo

$$DQO_{lodo} = DQO_{removida} \times Y_{DQO} \quad (4.6)$$

$$Y_{DQO} = Y \times K_{DQO-SVT} \quad (4.7)$$

Onde:

$DQO_{lodo}$ : fração de DQO convertida em lodo por dia (kg DQO<sub>lodo</sub>/dia);

$DQO_{removida}$ : DQO removida do sistema por dia (kg DQO/dia);

$Y_{DQO}$ : coeficiente de produção de sólidos (kgDQO<sub>lodo</sub>/kgDQO<sub>removida</sub>);

$Y$ : produção de lodo em termos de Sólidos Voláteis Totais (SVT) (kg SVT/kg DQO<sub>removida</sub>).

$K_{DQO-SVT}$ : fator de conversão (1 kg SVT = 1,42 kg DQO<sub>lodo</sub>)

iv) Cálculo da carga de sulfato convertida em sulfeto

$$CO_{SO4\ convertido} = V_{afl} \times C_{SO4} \times E_{SO4} \quad (4.8)$$

Onde:

$CO_{SO4\ convertido}$ : carga de sulfato convertida em sulfeto (kgSO<sub>4</sub>/dia);

$C_{SO4}$ : concentração média de SO<sub>4</sub> afluyente (kgSO<sub>4</sub>/m<sup>3</sup>);

$E_{SO4}$ : eficiência da remoção de sulfato (%);

Para o parâmetro de concentração média de SO<sub>4</sub> afluyente ( $C_{SO4}$ ) será utilizado o valor de 0,06 kgSO<sub>4</sub>/m<sup>3</sup>, dentro da faixa sugerida por Singh e Viraghavan (1998); Metcalf e Eddy (2003); Gloria et al. (2008). Para eficiência da remoção de sulfato ( $E_{SO4}$ ) será utilizado o valor de 75%, conforme Souza (2010).

v) Cálculo da DQO usada na redução de sulfato

$$DQO_{SO4} = CO_{SO4\ convertido} \times K_{DQO-SO4} \quad (4.9)$$

Onde:

$DQO_{SO4}$ : DQO usada pelas bactérias redutoras de sulfato (BRS) na redução de sulfato (kg DQO<sub>SO4</sub>/dia);

$K_{DQO-SO4}$ : DQO consumida na redução do sulfato (0,667 kg DQO<sub>SO4</sub>/kg SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>);

vi) Cálculo da DQO convertida em metano

$$DQO_{CH4} = DQO_{removida} - DQO_{lodo} - DQO_{SO4} \quad (4.10)$$

$$Q_{CH4} = \frac{DQO_{CH4} \times R \times (273 + T)}{P \times K_{DQO} \times 1.000} \quad (4.11)$$

Onde:

$DQO_{CH4}$ : DQO convertida em metano (kg DQO<sub>CH4</sub>/dia);

$Q_{CH_4}$ : produção volumétrica teórica de metano ( $m^3/dia$ );

R: constante dos gases (0,08206 atm/mol.K);

T: temperatura de operação do reator ( $^{\circ}C$ );

P: pressão atmosférica (1 atm);

$K_{DQO}$ : DQO de um mol de  $CH_4$  (0,064 kg  $DQO_{CH_4}/mol$ );

Para o parâmetro temperatura de operação do reator (T) foi utilizado  $25^{\circ}C$  conforme Von Sperling e Chernicharo (2005).

vii) Cálculo das perdas de metano

$$Q_{W-CH_4} = Q_{CH_4} \times P_W \quad (4.12)$$

$$Q_{O-CH_4} = Q_{CH_4} \times P_O \quad (4.13)$$

$$Q_{L-CH_4} = V_{afl} \times \rho_L \times f_{CH_4} \times \left( \frac{R \times (273 + T)}{P \times K_{DQO}} \right) \quad (4.14)$$

Onde:

$Q_{W-CH_4}$ : perda de metano como gás residual no reator ( $m^3/dia$ );

$P_W$ : percentual de metano em estado gasoso perdido como gás residual no reator (%);

$Q_{O-CH_4}$ : outras perdas de metano no estado gasoso como vazamentos ( $m^3/dia$ );

$P_O$ : percentual de metano em estado gasoso considerado como outras perdas, como vazamentos (%);

$Q_{L-CH_4}$ : perda de metano em estado líquido dissolvido no efluente tratado ( $m^3/dia$ );

$\rho_L$ : concentração de metano dissolvido no efluente tratado ( $kg/m^3$ );

$f_{CH_4}$ : fator de conversão do metano em DQO (4  $kgDQO/kgCH_4$ );

Para os parâmetros  $P_W$  e  $P_O$  foi utilizado o valor de 5% e para  $\rho_L$ , o valor de 2%, conforme Souza e Chernicharo (2011b).

viii) Cálculo da produção líquida de metano disponível para reaproveitamento energético

$$Q_{\text{liquido-CH}_4} = Q_{\text{CH}_4} - Q_{\text{W-CH}_4} - Q_{\text{O-CH}_4} - Q_{\text{L-CH}_4} \quad (4.15)$$

Onde:

$Q_{\text{liquido-CH}_4}$ : produção líquida de metano disponível para reaproveitamento energético ( $\text{m}^3/\text{dia}$ );

ix) Cálculo da energia potencial disponível

$$PE_{\text{disponivel-CH}_4} = Q_{\text{N-liquido-CH}_4} \times PC_{\text{CH}_4} \quad (4.16)$$

Onde:

$PE_{\text{disponivel-CH}_4}$ : energia potencial disponível para reaproveitamento energético ( $\text{MJ}/\text{dia}$ );

$Q_{\text{N-liquido-CH}_4}$ : produção de metano normalizada ( $\text{Nm}^3/\text{dia}$ );

$PC_{\text{CH}_4}$ : poder calorífico do metano ( $35,9 \text{ MJ}/\text{Nm}^3$ )

Para converter a produção real de metano para o padrão normal ( $T=0^\circ\text{C}$  ou  $273\text{K}$  e  $P=1\text{atm}$ ) basta aplicar a equação (4.17).

$$Q_{\text{N-liquido-CH}_4} = \left( \frac{Q_{\text{liquido-CH}_4} \times P_{\text{local}}}{T_{\text{local}}} \right) \times 273 \quad (4.17)$$

Onde:

$P_{\text{local}}$ : pressão local (atm);

$T_{\text{local}}$ : temperatura local (K);

#### 4.2.2 Método IPCC (2006)

O IPCC (2006) calcula a produção de metano a partir da digestão anaeróbia de esgoto doméstico através das seguintes etapas:

i) Estimativa do conteúdo total de matéria orgânica

$$TOW = Pop \times C_{\text{PCDQO}} \times 0,001 \times I \times 365 \quad (4.18)$$

Onde:

TOW: total de matéria orgânica ( $\text{kgDQO}/\text{ano}$ );

Pop: população (hab);

$C_{\text{PCDQO}}$ : contribuição per capita de DQO ( $\text{gDQO}/\text{hab.dia}$ );

I: fator de correção para contribuição industrial nas redes coletoras (1,25 quando há contribuição);

Foi utilizado o valor de 0,1 kg/hab.dia para o parâmetro contribuição *per capita* de DQO (QPC<sub>DQO</sub>), conforme Von Sperling e Chermicharo (2005).

ii) Obtenção dos fatores de emissão (EF<sub>j</sub>) para sistema de tratamento

$$EF_j = P \times B_0 \times MCF_j \quad (4.19)$$

Onde:

EF<sub>j</sub>: fatores de emissão (gCH<sub>4</sub>/gDQO);

B<sub>0</sub>: capacidade máxima de produção de CH<sub>4</sub> (0,25 gCH<sub>4</sub>/gDQO);

MCF<sub>j</sub>: fator de correção para o CH<sub>4</sub> de acordo com a via de tratamento e/ou destinação final;

j: sistemas de tratamento e/ou destinação final;

Para o fator de correção para o CH<sub>4</sub> (MCF<sub>j</sub>) foi utilizado o valor de 0,8 relativo a utilização de UASB, conforme IPCC (2006).

iii) Estimativa das emissões, subtraindo a quantidade de CH<sub>4</sub> recuperado e destruído por combustão.

$$Emissões_{CH_4} = \left[ \sum_{i,j} (U_i \times T_{i,j} \times EF_j) \right] \times (TOW - MO) - Rec \quad (4.20)$$

Onde:

Emissões<sub>CH<sub>4</sub></sub>: emissões de CH<sub>4</sub> durante o ano (kgCH<sub>4</sub>/ano);

MO: matéria orgânica convertida em lodo (kgDQO/ano);

U<sub>i</sub>: fração da população para cada grupo i;

T<sub>i,j</sub>: grau de utilização da via de tratamento e/ou eliminação j para cada grupo i;

i: grupos de acordo com a renda: rural, urbano de alta renda, urbano de baixa renda;

Rec: CH<sub>4</sub> recuperado (kgCH<sub>4</sub>/ano);

#### 4.2.3 Método UNFCCC (2013)

A Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, 2013) utiliza uma metodologia para avaliação da linha de base de emissões de CO<sub>2</sub> nos projetos de

recuperação de metano em estações de tratamento de esgotos baseada no método IPCC (2006), por meio das equações (4.21) e (4.22).

$$BE_{WW,treatment,y} = \left[ \sum_{i,j} (Q_{WW,i} \times COD_{inflow,i,j} \times E_{DQO} \times MCF_{WW,treatment,y}) \right] \times B_{o,WW} \times UF_{BL} \times GWP_{CH_4} \quad (4.21)$$

Onde:

$BE_{WW,treatment,y}$ : emissões de metano pelo tratamento de esgoto no ano y (tCO<sub>2eq</sub>);

$Q_{WW,i,j}$ : volume de esgoto tratado (m<sup>3</sup>/ano);

$COD_{inflow,i,j}$ : DQO afluyente (t/m<sup>3</sup>/ano)

$E_{DQO}$ : eficiência de remoção da DQO;

$MCF_{WW,treatment,BL,i}$ : fator de emissão de metano conforme IPCC (2006);

$B_{o,WW}$ : capacidade de produção do metano de esgoto conforme IPCC (2006);

$UF_{BL}$ : fator de correção para incertezas (0,89);

$GWP_{CH_4}$ : potencial de aquecimento global do metano

$$E_{CH_4} = \frac{CH_4_{emissions}}{\rho_{CH_4}} \quad (4.22)$$

Onde:

$E_{CH_4}$ : emissões de CH<sub>4</sub> (m<sup>3</sup>CH<sub>4</sub>/dia);

$CH_4_{emissions}$ : emissão de CH<sub>4</sub> (kgCH<sub>4</sub>/dia);

$\rho_{CH_4}$ : densidade do metano (0,717 kg/m<sup>3</sup>);

Os cálculos serão feitos para produção diária de metano para fins de comparação com os outros métodos apresentados.

Para o parâmetro ( $COD_{inflow,i,j}$ ) foi utilizado o valor de 0,06m<sup>3</sup>/dia, conforme Von Sperling (2014); para ( $\eta_{COD,BL,i}$ ) o valor de 65%, de acordo com Von Sperling e Chhermicharo (2005) e para ( $MCF_{WW,treatment,BL,i}$ ) e ( $B_{o,WW}$ ), os valores de 0,8 e 0,25 kgCH<sub>4</sub>/kgDQO<sub>rem</sub>, respectivamente, segundo IPCC(2006).

#### 4.2.4 Método CETESB (2006)

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2006) desenvolveu um programa de computador para auxiliar na análise da viabilidade do uso do biogás gerado em ETES, conforme equação (4.23) a seguir:

$$Q_i = \frac{30 \times P b_i \times f D B O_5 \times M F P M \times E f}{V E} \quad (4.23)$$

Onde:

$Q_i$ : vazão de metano ( $m^3CH_4/mês$ );

$P b_i$ : produção de biogás (0,001 kgbiogás/kgMt);

$f D B O_5$ : fator de emissão de DBO típico de metano (kgDBO<sub>5</sub>/unidade);

$M F P M$ : capacidade máxima de produção de CH<sub>4</sub> (0,25 gCH<sub>4</sub>/gDQO);

$E f$ : eficiência o tratamento (%);

$V E$ : massa específica do metano (0,67 kgCH<sub>4</sub>/m<sup>3</sup>);

Para o parâmetro ( $f D B O_5$ ) será utilizado o valor e 50 g/hab.dia conforme Von Sperling (2005) e para ( $E f$ ) o valor de 67% conforme Von Sperling (2014).

#### 4.2.5 Discussão dos resultados gerados por cada metodologia empregada no cálculo da produção de biogás e metano nos municípios analisados

Os resultados de produção de biogás e metano e, conseqüente potencial de geração de energia elétrica, gerados por cada metodologia descrita no item 4.2 foram confrontados, de forma a verificar possíveis convergências ou divergências, e identificar qual ou quais metodologias são mais adequadas para a análise da viabilidade de exploração do potencial energético do biogás produzido em ETEs.

### 4.3 **Cálculo da produção de biogás e metano através da biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB**

Para o cálculo da produção de biogás pelos biodigestores de lodo foi utilizado o método desenvolvido pelo CETESB (2006), baseado na estimativa de matéria total gerada pela população, conforme equação (4.24).

$$Q_i = 30 \times \frac{\sum P b_i \times C o n c_i \times Q t_i \times M t}{V E} \quad (4.24)$$

Onde:

$Q_i$ : vazão de metano ( $m^3CH_4/mês$ );

$P b_i$ : produção de biogás (kgbiogás/kgMt);

$C o n c_i$ : concentração do metano no biogás (%);

$Q t_i$ : quantidade de unidades geradoras de efluente;

$M t$ : matéria total enviada por habitante por dia (kg/dia);

VE: massa específica do metano ( $0,67 \text{ kgCH}_4/\text{m}^3$ );

Para os parâmetros de produção de biogás ( $P_b$ ) e concentração de metano ( $\text{Conc}_i$ ) foram utilizados os valores encontrados no experimento de Felca (2016),  $0,007 \text{ kg biogás / kg de matéria orgânica}$  e  $49,98\%$ , respectivamente. Também foram efetuados cálculos utilizando o valor de produção de metano encontrado por Moni Silva (2016) de  $0,006 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kgST}$ . Para o parâmetro de contribuição de matéria total foi o utilizado o valor de  $0,015 \text{ kg/hab.dia}$ , dentro da faixa sugerida por Andreoli (2014).

#### **4.4 Análise da viabilidade econômica da implantação do sistema de recuperação energética do metano produzido no tratamento de esgotos e na digestão anaeróbia do lodo nos municípios analisados**

Para efetuar a análise de viabilidade econômica da recuperação energética do metano gerado pelos reatores UASB e digestores de lodo foi considerada a topologia e instalação conforme fluxograma mostrada na Figura 4.1.

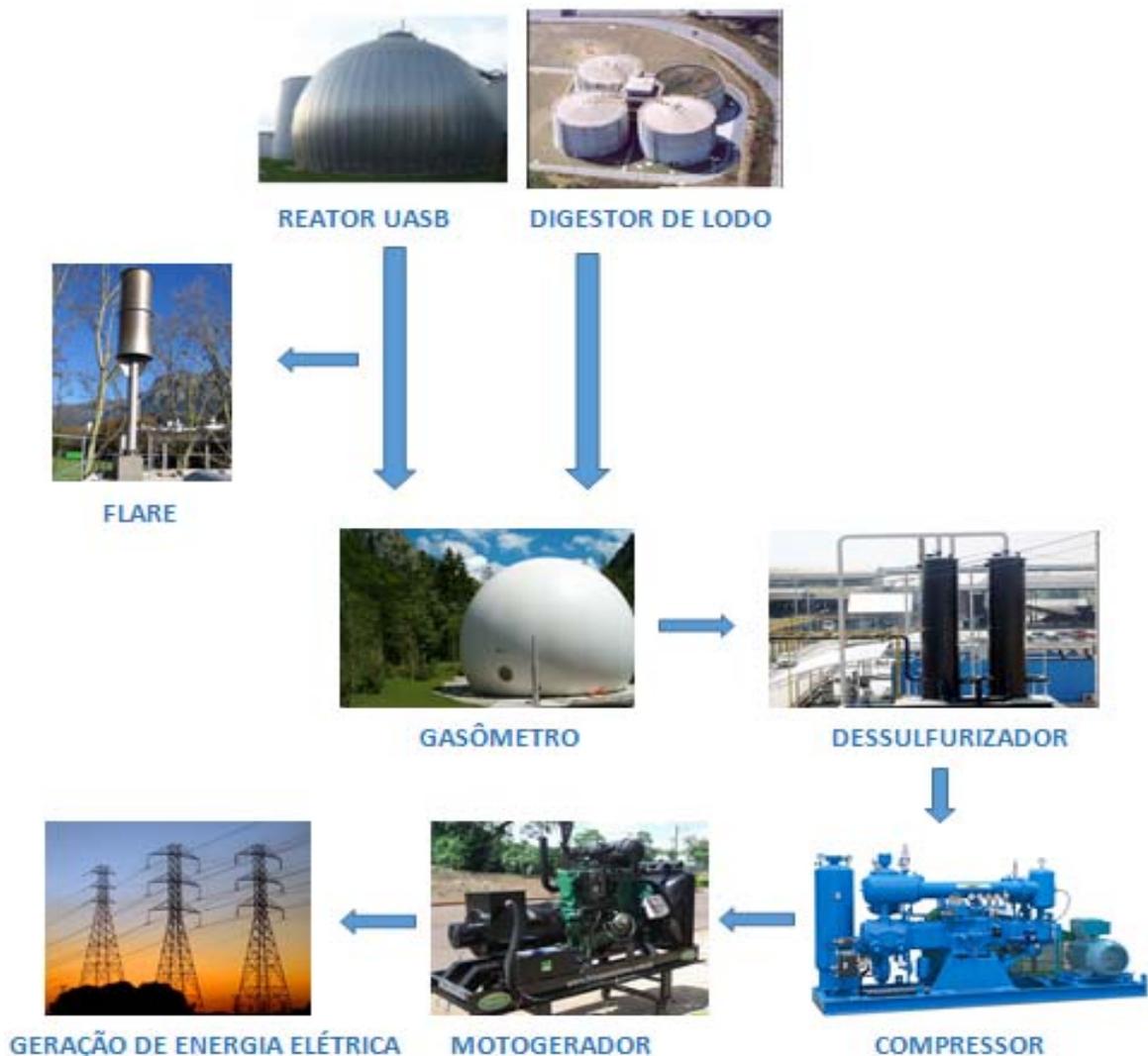


Figura 4.1 – Fluxograma da recuperação energética do biogás

Fonte: Adaptado de Brasil (2015a); Brasil (2015c); Brasil (2016)

Foi considerado que haverá um financiamento do projeto com amortização de 20 anos de acordo com a Instrução Normativa nº 39 (MCID, 2012) do “Programa Saneamento para Todos” para obras de saneamento. Também foi considerado a razão da dívida, ou seja, a relação do montante de dinheiro que se deve a cada mês, em comparação com a quantia de dinheiro que se recebe, de 95%. Isto se deveu ao fato de que em operações com o setor público, o valor de contrapartida mínima é de 5% do valor do investimento. A taxa de juros considerada foi de 9% a.a, conforme apresentado em Caixa (2016). A taxa de desconto considerada foi de 8% a.a., valor considerado no Plano Nacional de Energia 2030 para o cálculo do custo médio de geração elétrica em longo prazo (EPE, 2010).

Para a verificação da viabilidade do projeto foram efetuados os cálculos do valor presente líquido (VPL), da taxa interna de retorno (TIR) e do *payback* (PB) conforme metodologias apresentadas a seguir.

#### 4.4.1 Cálculo do VPL

O VPL é a diferença entre o valor investido e o valor resgatado ao fim do investimento, trazidos ao valor presente. Se VPL for positivo, então o valor investido será recuperado e haverá um ganho. Se VPL for zero significa que aplicar ou não fará diferença. Se VPL for negativo significa que o investidor estará resgatando um valor menor que o valor investido, então não se deve aplicar neste investimento.

O VPL é dado pela equação (4.25) (CASAROTTO FILHO *et al.*, 1994):

$$VPL = FC_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + i_{desc})^t} \quad (4.25)$$

Onde:

$FC_t$ : fluxo de caixa no ano t (R\$);

$i_{desc}$ : taxa de desconto (%);

t: ano considerado no fluxo de caixa;

n: vida útil do projeto (anos)

O fluxo de caixa consiste na diferença entre as despesas e receitas do projeto em cada ano considerado. O custo de investimento do projeto é considerado como o fluxo de caixa no ano 0 ( $FC_0$ ) que corresponde à soma dos custos dos equipamentos conforme equação (4.26).

$$CI_{total} = CI_{gerador} + CI_{gasômetro} + CI_{compressor} + CI_{dessulfurizador} + CI_{biodigestor} \quad (4.26)$$

Onde:

$CI_{total}$ : custo de investimento total (R\$);

$CI_{gerador}$ : custo de investimento do gerador (R\$);

$CI_{gasômetro}$ : custo de investimento do gasômetro (R\$);

$CI_{compressor}$ : custo de investimento do compressor (R\$);

$CI_{dessulfurizador}$ : custo de investimento do dessulfurizador (R\$);

$CI_{biodigestor}$ : custo de investimento do biodigestor de lodo (R\$);

O gerador considerado foi do tipo motogerador com ciclo Otto com custo de US\$ 510/kW, o custo do gasômetro considerado foi de US\$ 60/m<sup>3</sup> e o custo do compressor igual a US\$ 565/m<sup>3</sup>/h, conforme Santos *et al.* (2016a). O custo do dessulfurizador considerado foi de R\$ 0,01/m<sup>3</sup> conforme Barros *et al.* (2014). O custo do biodigestor de lodo foi calculado conforme faixa de custo apresentada por Dillon (2015) de U\$ 1.000/m<sup>3</sup> para cidades de 25.000 habitantes e U\$ 250/m<sup>3</sup> para cidades de 200.000 habitantes. O custo do queimador, ou “*flare*” em inglês, não foi considerado nos cálculos, pois as ETEs que utilizam tratamento anaeróbio já o possuem instalado, como exigência da legislação. Não foram considerados os custos de projeto, instalação e montagem que devem ser calculados de forma individual para cada empreendimento. Nos cálculos dos fluxos de caixas foi considerado um valor igual a 2% do custo de investimento total para os custos de operação e manutenção.

O benefício resultou o custo evitado de energia elétrica dada pela equação (4.27).

$$CE = E \times TE \quad (4.27)$$

Onde:

CE: custo evitado de energia elétrica (R\$), referente ao benefício do investimento;

E: energia produzida pela planta de recuperação de metano (kWh);

TE: tarifa de energia elétrica paga pela ETE (R\$/kWh);

A tarifa de energia elétrica paga pela ETE será considerada de acordo com os dados de despesas de energia elétrica de cada município apresentados no SNIS (2016), considerando a variação média anual praticada pela CEMIG.

O custo evitado de energia elétrica foi considerado dentro do âmbito das Resoluções Normativas 482/2012 (ANEEL, 2012) e 687/2015 (ANEEL, 2015) que estabelecem as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e definem o sistema de compensação de energia elétrica a ser utilizado nestas instalações. A RN 687/2015 (ANEEL, 2015) fez alterações no texto na RN 482/2012 (ANEEL, 2012), dentre elas os parágrafos III e VII do artigo 2º, que estabelecem o sistema de compensação de energia e permitem que o excedente gerado em uma unidade possa ser compensado em outra unidade de mesma titularidade:

“III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração

distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa;

VIII – autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada (ANEEL, 2015).”

A despesa foi considerada como a parcela do financiamento paga a instituição financeira dada pela equação (4.28):

$$P_{fin} = \frac{RD \times CI_{total} \times i}{1 - \frac{1}{(1+i)^{ni}}} \quad (4.28)$$

Onde:

$P_{fin}$ : valor da parcela do financiamento paga anualmente a instituição financeira (R\$);

RD: razão da dívida (%);

$CI_{total}$ : custo de investimento total (R\$);

i: taxa anual de juros (%);

ni: prazo da dívida (anos).

#### 4.4.2 Cálculo da TIR

A TIR é a taxa que relaciona o valor investido com o valor resgatado ao fim do investimento, ou seja, é a taxa necessária para que o VPL seja igual a zero, conforme expressão (4.29) (CASAROTTO FILHO et al, 1994):

$$VPL = 0 = FC_0 + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (4.29)$$

Onde:

$FC_t$ : fluxo de caixa no ano t (R\$);

$FC_0$ : fluxo de caixa no ano 0 = custo total de investimento

TIR: taxa interna de retorno (%)

t: ano considerado no fluxo de caixa;

n: vida útil do projeto (anos)

Portanto, se  $TIR > i_{desc}$ , o investimento é economicamente atraente, se  $TIR < i_{desc}$  investimento não é economicamente atraente.

#### 4.4.3 Cálculo do Payback

O payback é o tempo decorrido entre o investimento inicial e o momento no qual o lucro líquido acumulado se iguala ao valor desse investimento e pode ser calculado conforme expressão (4.30) (CASAROTTO FILHO et al, 1994):

$$PB = T \text{ quando } \sum_{t=0}^T FC_t = CI_{total} \quad (4.30)$$

Onde:

PB: payback (anos);

FC<sub>t</sub>: fluxo de caixa anual (R\$);

CI<sub>total</sub>: custo de investimento total (R\$);

T: tempo de recuperação do investimento inicial (anos).

### **4.5 Estimativa do potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) no estado de Minas Gerais**

A fim de se comparar as emissões de diferentes gases de efeito estufa, o IPCC criou o conceito de Potencial de Aquecimento Global, usualmente referido pela sigla em inglês, GWP (*Global Warming Potential*), no qual as emissões de GEEs são contabilizadas utilizando uma medida de equivalência baseada na quantidade de CO<sub>2</sub> que teria o mesmo potencial de aquecimento global que o gás em questão, a CO<sub>2</sub>eq. O metano, por exemplo, tem um GWP igual a 28, ou seja, a emissão de 1 tonelada de metano corresponde a emissão de 28 toneladas de CO<sub>2</sub>eq. (IPCC, 2014).

No Brasil, a Lei n° 12.187/2009 (BRASIL, 2009) estabeleceu a Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC) com intuito de definir um compromisso nacional para adoção de práticas para redução das emissões de gases de efeito estufa entre 36,1% e 38,9% em relação às emissões projetadas até 2020, o que de acordo com o Decreto n° 7.390/2010 (BRASIL, 2010b) que regulamentou a lei, corresponderia a uma faixa de redução de 1,168 GtCO<sub>2</sub>eq a 1,259 GtCO<sub>2</sub>eq, já que a projeção das emissões para 2020 foi estimada em 3,236 GtCO<sub>2</sub>eq, sendo 868 milhões tCO<sub>2</sub>eq só para o setor de energia. (MCTI, 2014). Em 2015, o Brasil também assinou o Acordo de Paris, um pacto aprovado pelos 195 países integrantes da

Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) para redução global das emissões de GEEs, em que apresentou Intenções Voluntárias de redução de emissões semelhantes aos valores de redução assumidos na Política Nacional sobre a Mudança do Clima.

Em 2015, na 21ª Conferência das Partes (COP21) da UNFCCC, em Paris, foi aprovado foi aprovado pelos 195 países um acordo para reduzir emissões de GEE no contexto do desenvolvimento sustentável. Pelo acordo, os países signatários se comprometeram a reduzir as emissões de GEE de acordo com as respectivas *Intended Nationally Determined Contribution*, INDC (BRASIL, 2015b). A INDC apresentada pelo Brasil na COP21 foi relativa aos níveis de emissão de 2005, sendo que em 2025, o percentual de redução deverá ser de 37% e em 2030, de 43% (BRASIL, 2015b). Em setembro de 2016, com a aprovação no Senado, o Brasil ratificou seu compromisso no Acordo de Paris, e as metas brasileiras tornaram-se compromissos oficiais, que passaram a ser chamadas apenas de NDC. Para atingir as metas estabelecidas, o país se comprometeu a aumentar a participação da bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, restaurar e reflorestar 12 milhões de hectares de florestas, bem como atingir um percentual de 45% de participação das energias renováveis na matriz energética em 2030.

Neste contexto, o volume de metano recuperado no sistema de aproveitamento energético do biogás produzido nas ETEs pode ser contabilizado como um potencial de redução dos GEEs, já que sem a implantação do sistema esse montante de metano seria liberado diretamente para atmosfera.

Além disso, com a geração de energia a partir do biogás, as ETEs deixarão de utilizar parte da energia elétrica advinda da concessionária, e desta maneira também irão evitar emissões de CO<sub>2</sub> associados à geração de energia elétrica no Sistema Nacional Interligado (SIN), que conforme o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI, 2017), foram de 0,0817 tCO<sub>2</sub>eq/MWh em 2016.

Desta forma, as emissões de GEE evitadas no projeto serão contabilizadas considerando o potencial de metano recuperado para geração de energia nas ETEs e o montante de emissões evitadas de CO<sub>2</sub> relativas à energia elétrica gerada no SIN que será poupada com a geração de eletricidade a partir do biogás nas ETEs do estado de Minas Gerais, conforme equação (4.31).

$$GEE_{evitadas} = (CH_4Rec \times 28) + (E_{gerada} \times 0,0817) \quad (4.31)$$

Onde:

$GEE_{evitadas}$ : emissões de GEE evitadas (tCO<sub>2</sub>eq/ano);

$CH_4Rec$ : total de metano recuperado com a implantação dos sistemas (tCH<sub>4</sub>/ano);

$E_{gerada}$ : total de energia elétrica gerada nas ETES (MWh/ano);

## 5. Resultados e Discussões

### 5.1 Levantamento das informações relativas ao saneamento básico no município do estado de Minas Gerais

Os dados dos municípios coletados no relatório do SNIS (BRASIL, 2017) foram agrupados de acordo com o tamanho de suas respectivas populações.

#### a) Municípios com população menor que 50.000 habitantes

Tabela 5.1– Dados do saneamento básico dos municípios com população menor que 50.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Volume de esgoto coletado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Volume de esgoto tratado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Consumo de energia elétrica no tratamento de água e esgoto (1.000 kWh/ano)</b>	<b>Gasto total com a energia elétrica no tratamento de água e esgoto (R\$/ano)</b>
Águas Vermelhas	3.646	105,68	105,68	470,06	286.125,97
Além Paraíba	20.372	1.026,95	0,00	661,35	397.437,11
Almenara	28.862	1.123,04	1.123,04	1.178,26	683.358,90
Araçuaí	12.846	517,65	517,65	1.257,37	654.834,43
Arceburgo	8.284	348,62	0,00	376,93	198.572,46
Ataléia	3.306	123,87	31,73	230,53	140.474,67
Barbacena	37.117	1.072,03	559,09	2.810,13	1.474.737,69
Bom Despacho	41.370	1.683,61	1.567,12	2.700,80	1.402.458,62
Bom Reposo	5.435	193,91	193,91	331,82	174.083,59
Bonfim	2.236	118,61	0,00	604,75	18.123,55
Borda da Mata	12.356	408,45	400,05	514,32	252.020,88
Botelhos	7.931	324,75	0,00	662,74	306.885,87
Brasília de Minas	15.536	512,33	512,33	955,13	617.909,78
Brumadinho	15.780	815,81	289,09	2.647,01	402.341,38
Bueno Brandão	5.388	190,02	190,02	341,10	175.725,27
Buenópolis	3.979	145,51	145,51	167,25	152.024,65
Buritís	4.780	192,97	0,00	408,76	271.610,90
Cabo Verde	7.011	252,38	0,00	293,52	191.148,32
Caldas	5.353	226,83	0,00	298,08	143.542,14
Camanducaia	11.676	580,48	0,00	575,94	492.942,30
Cambuquira	8.443	92,90	0,00	562,43	525.572,18
Campanha	12.246	401,40	0,00	455,80	285.548,03
Campina Verde	12.949	565,24	565,24	798,49	385.403,15
Campo Florido	5.610	242,46	0,00	223,32	154.400,39
Capelinha	18.865	656,19	0,00	3.133,93	1.613.191,04
Capetinga	458	16,43	16,43	191,26	116.987,96
Capim Branco	708	33,36	19,70	1.205,85	337.135,60

Tabela 5.1– Dados do saneamento básico dos municípios com população menor que 50.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Volume de esgoto coletado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Volume de esgoto tratado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Consumo de energia elétrica no tratamento de água e esgoto (1.000 kWh/ano)</b>	<b>Gasto total com a energia elétrica no tratamento de água e esgoto (R\$/ano)</b>
Capitão Enéas	3.354	90,43	89,42	440,79	325.460,25
Carbonita	5.077	158,86	129,83	374,01	234.630,15
Carlos Chagas	9.520	353,99	353,99	370,50	183.709,26
Carmo da Cachoeira	7.805	263,14	0,00	372,51	218.535,40
Carmo do Paranaíba	22.950	977,39	0,00	2.250,45	1.160.679,98
Carmo do Rio Claro	13.089	562,36	0,00	890,09	411.618,56
Carneirinho	6.086	264,12	264,12	321,10	197.625,90
Carvalhos	1.548	63,79	0,00	108,25	69.041,72
Conceição da Barra de Minas	1.526	47,12	47,12	176,74	110.445,45
Cataguases	45.657	2.027,38	0,00	4.118,28	1.864.684,24
Catuti	658	19,91	19,88	291,31	9.495,38
Caxambu	18.806	732,55	732,55	2.066,70	1.133.983,53
Centralina	2.057	79,96	78,02	383,08	245.250,94
Claro dos Poções	1.905	61,02	61,02	223,19	143.634,94
Cláudio	20.686	715,91	715,91	899,20	485.494,03
Conceição do Mato Dentro	8.608	423,87	315,71	1.048,28	515.011,40
Conceição do Pará	1.685	81,08	0,00	148,17	89.278,07
Congonhal	8.136	276,83	0,00	172,55	97.446,86
Congonhas	33.859	1.317,31	0,00	1.600,89	942.415,09
Coração de Jesus	4.254	157,00	157,00	526,63	358.002,79
Cordisburgo	2.611	95,44	79,26	421,00	245.275,68
Corinto	13.317	526,31	512,78	876,91	451.746,92
Coronel Murta	3.245	120,71	120,35	208,44	135.698,72
Cristália	818	27,71	27,71	120,08	66.102,42
Cruzília	12.126	407,20	0,00	1.017,08	526.811,17
Desterro do Melo	1.186	45,10	45,10	163,39	106.876,79
Diamantina	26.399	1.032,78	0,00	1.972,07	1.277.083,60
Divino	8.326	305,47	0,00	638,07	348.470,25
Divisópolis	2.615	60,11	60,11	419,16	272.377,00
Dores do Indaiá	10.717	434,08	434,08	879,31	410.452,01
Engenheiro Navarro	2.502	82,37	82,37	215,40	136.692,63
Esmeraldas	8.422	319,15	319,15	6.216,01	1.546.818,27

Tabela 5.1– Dados do saneamento básico dos municípios com população menor que 50.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Volume de esgoto coletado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Volume de esgoto tratado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Consumo de energia elétrica no tratamento de água e esgoto (1.000 kWh/ano)</b>	<b>Gasto total com a energia elétrica no tratamento de água e esgoto (R\$/ano)</b>
Estrela do Indaiá	1.335	4,95	0,00	218,21	119.497,38
Estrela do Sul	2.847	114,77	0,00	121,28	66.185,49
Extrema	22.186	1.104,32	511,58	2.315,69	1.160.798,47
Fama	772	48,78	0,00	113,63	69.090,14
Francisco Dumont	735	23,22	23,02	215,62	139.500,51
Fronteira	12.118	468,89	0,00	632,59	353.953,00
Frutal	43.704	2.022,95	2.022,95	3.177,48	1.695.013,73
Funilândia	1.088	49,53	26,75	494,27	159.595,81
Glauceilândia	618	21,80	21,23	72,65	50.229,38
Gonçalves	810	46,45	46,45	11,42	8.494,22
Grão Mogol	2.730	90,54	90,54	550,90	289.575,95
Guaraciaba	2.790	78,49	0,00	185,50	115.232,90
Guarda-Mor	3.251	147,64	139,35	205,85	140.285,18
Guaxupé	43.328	1.882,96	0,00	2.231,57	1.024.921,60
Ibiaí	1.947	60,50	60,50	142,70	91.663,09
Icaraí de Minas	1.111	36,81	36,81	124,63	87.739,11
Igarapé	17.483	778,27	0,00	4.775,20	1.313.947,18
Indaiabira	856	26,70	26,70	54,38	41.561,34
Inhapim	6.260	252,02	0,00	329,01	206.548,43
Ipuiúna	5.622	206,12	0,00	188,54	118.815,88
Itabirinha	5.407	186,94	0,00	201,22	120.034,15
Itacarambi	4.176	138,21	138,21	301,04	211.546,55
Itamarandiba	15.197	463,58	0,00	1.689,10	916.808,68
Itaobim	7.030	274,05	274,05	707,76	365.117,11
Itapeçerica	11.885	409,33	409,33	914,29	474.141,95
Itapeva	4.413	185,48	0,00	364,04	183.728,26
Iturama	30.708	1.222,54	1.222,54	1.941,28	897.821,67
Jaboticatubas	8.098	220,97	52,10	1.027,00	416.857,37
Jacinto	4.510	165,84	0,00	249,14	163.186,54
Jaíba	4.695	174,55	174,55	486,94	298.981,38
Janaúba	15.997	579,83	579,83	851,25	571.678,78
Januária	7.951	328,51	328,51	1.607,40	834.633,47
Jequitinhonha	11.822	397,95	397,95	353,91	220.150,24
Joáima	7.721	269,70	215,01	231,05	119.139,07
João Pinheiro	30.268	1.215,54	1.179,67	1.781,88	866.529,17
Juatuba	7.478	386,13	120,01	3.595,72	795.402,87
Juramento	1.621	51,45	51,45	336,63	226.618,74
Juvenília	82	1,89	0,00	27,35	23.962,06

Tabela 5.1– Dados do saneamento básico dos municípios com população menor que 50.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Volume de esgoto coletado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Volume de esgoto tratado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Consumo de energia elétrica no tratamento de água e esgoto (1.000 kWh/ano)</b>	<b>Gasto total com a energia elétrica no tratamento de água e esgoto (R\$/ano)</b>
Lagoa dos Patos	1.740	53,97	53,97	225,09	141.201,34
Lagoa Santa	22.924	1.298,26	1.298,26	6.919,38	3.126.979,02
Leandro Ferreira	1.764	77,58	0,00	260,72	182.127,19
Limeira do Oeste	3.972	156,12	156,12	211,92	130.022,76
Lontra	686	17,70	15,45	228,43	153.658,61
Malacacheta	8.720	266,72	195,23	89,76	64.708,20
Manga	223	4,61	3,08	274,64	202.228,85
Martinho Campos	5.424	230,87	0,00	843,14	471.862,38
Mata Verde	6.809	168,19	168,19	366,95	235.694,16
Mateus Leme	11.642	568,30	0,00	3.526,46	1.242.078,70
Matozinhos	21.397	853,49	594,35	3.833,02	1.711.421,26
Medina	12.563	393,65	0,00	363,76	219.092,04
Minas Novas	5.717	165,40	130,61	602,81	294.190,56
Mirabela	3.384	105,65	105,65	405,68	215.519,90
Montalvânia	273	10,21	0,00	446,11	288.965,28
Monte Azul	205	3,65	2,98	499,35	287.920,87
Monte Sião	16.912	784,05	784,05	1.208,60	687.729,42
Morada Nova de Minas	2.145	40,69	40,69	298,07	206.601,97
Mutum	6.809	270,73	0,00	507,01	277.720,26
Nanuque	26.432	1.003,42	11,66	1.649,80	759.177,69
Natércia	2.155	92,48	0,00	116,23	84.596,13
Nova Lima	16.483	896,00	896,00	8.292,20	4.297.106,56
Nova Módica	1.664	64,88	0,00	84,66	50.264,13
Nova Porteirinha	1.893	63,71	63,40	85,05	54.803,35
Novo Cruzeiro	6.383	182,71	0,00	518,48	272.756,12
Ouro Branco	31.636	1.249,24	840,09	2.315,56	1.007.084,63
Passabém	368	15,09	0,00	72,98	50.936,61
Pedra Azul	16.756	490,64	490,64	2.868,31	1.369.309,41
Pedralva	4.836	175,82	175,82	88,87	57.719,88
Pedro Leopoldo	31.482	1.303,46	130,64	6.288,41	2.464.699,57
Perdões	15.367	590,85	0,00	1.222,07	586.286,91
Pirapetinga	7.329	308,63	0,00	407,35	230.047,46
Porteirinha	6.439	282,24	264,77	682,35	441.821,79
Poté	5.471	165,08	0,00	263,57	176.868,74
Prados	5.863	172,03	0,00	270,53	169.505,70
Presidente Bernardes	1.429	51,48	0,00	28,36	12.411,62

Tabela 5.1– Dados do saneamento básico dos municípios com população menor que 50.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Volume de esgoto coletado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Volume de esgoto tratado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Consumo de energia elétrica no tratamento de água e esgoto (1.000 kWh/ano)</b>	<b>Gasto total com a energia elétrica no tratamento de água e esgoto (R\$/ano)</b>
Prudente de Morais	3.153	105,75	0,00	1.226,98	473.697,03
Raposos	11.395	433,56	0,00	1.712,80	495.140,52
Resplendor	8.366	445,46	343,05	762,59	433.298,97
Riacho dos Machados	2.449	82,58	81,88	277,41	168.197,38
Rio Casca	8.060	298,31	0,00	641,41	353.816,28
Rio Pardo de Minas	3.046	93,75	93,75	504,69	306.719,27
Salinas	23.209	851,32	851,32	1.331,85	677.608,46
Santa Maria do Suaçuí	6.445	220,35	0,00	559,95	312.659,86
Santana da Vargem	5.266	175,06	175,06	197,49	121.382,62
Santana do Paraíso	29.269	1.060,13	0,00	980,64	818.118,46
Santa Rita de Caldas	4.384	188,00	0,00	203,61	99.024,90
Santa Rita do Sapucaí	32.332	1.276,74	1.276,74	1.616,08	814.933,56
Santo Antônio do Monte	21.844	864,46	828,92	1.942,33	1.059.300,15
Santo Antônio do Retiro	1.378	47,62	47,62	68,23	50.372,57
Santos Dumont	25.842	946,73	0,00	1.853,90	881.232,60
São Francisco	15.807	541,81	541,81	1.155,81	538.390,89
São Gonçalo do Abaeté	3.239	121,85	0,00	82,89	52.257,84
São Gotardo	27.568	1.103,00	18,14	1.619,92	943.191,55
São João da Ponte	1.064	36,91	36,70	308,45	198.879,16
São João del Rei	9.229	347,59	347,59	803,26	400.684,86
São João do Manhuaçu	4.378	123,77	0,00	211,55	130.976,30
São João do Paraíso	5.305	168,17	167,68	773,97	454.197,50
São Joaquim de Bicas	7.823	491,29	43,88	2.734,92	987.412,44
São José da Lapa	10.926	493,15	493,15	2.380,84	1.140.600,06

Tabela 5.1– Dados do saneamento básico dos municípios com população menor que 50.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Volume de esgoto coletado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Volume de esgoto tratado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Consumo de energia elétrica no tratamento de água e esgoto (1.000 kWh/ano)</b>	<b>Gasto total com a energia elétrica no tratamento de água e esgoto (R\$/ano)</b>
São José do Jacuri	1.616	60,42	0,00	72,31	46.370,62
São Roque de Minas	3.634	175,87	175,87	150,99	93.491,14
São Sebastião do Maranhão	1.922	64,46	0,00	87,79	58.415,64
São Tiago	5.267	183,67	178,20	535,19	285.849,44
Sapucai-Mirim	3.383	127,40	0,00	16,06	16.613,08
Sarzedo	23.633	910,44	66,67	3.620,72	1.020.784,70
Serra Azul de Minas	1.129	40,88	0,00	90,41	52.584,72
Serra da Saudade	439	21,49	0,00	43,74	21.371,51
Serra dos Aimorés	2.652	86,73	86,73	622,82	267.044,53
Serro	7.520	276,59	276,59	979,70	465.344,05
Taiobeiras	8.961	263,81	263,81	1.064,88	530.177,82
Taquaraçu de Minas	820	38,75	0,00	442,64	145.309,00
Tiradentes	3.903	246,45	0,00	496,76	269.690,53
Três Marias	20.364	760,16	754,12	2.337,10	1.075.152,14
Turmalina	9.849	328,74	328,74	1.694,29	883.659,99
União de Minas	2.345	92,43	92,43	119,69	72.495,93
Várzea da Palma	6.861	236,62	235,98	1.433,77	760.709,65
Varzelândia	1.273	50,23	41,11	528,57	333.719,15
Vazante	14.356	616,84	596,37	858,11	408.880,71

Fonte: SNIS (BRASIL, 2017)

b) Municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes

Tabela 5.2– Dados do saneamento básico dos municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Volume de esgoto coletado (1.000 m³/ano)</b>	<b>Volume de esgoto tratado (1.000 m³/ano)</b>	<b>Consumo de energia elétrica no tratamento de água e esgoto (1.000 kWh/ano)</b>	<b>Gasto total com a energia elétrica no tratamento de água e esgoto (R\$/ano)</b>
Alfenas	65.754	3.054,44	3.054,44	5.784,92	2.739.896,78
Araxá	95.042	4.049,69	4.049,69	5.897,49	3.039.357,86
Caratinga	50.715	2.000,76	0,00	2.113,68	1.234.308,67
Conselheiro Lafaiete	96.847	3.674,60	1.453,10	7.303,92	3.431.740,91
Coronel Fabriciano	80.816	3.112,11	0,00	5.233,19	2.905.048,52
Curvelo	55.603	2.080,42	1.926,53	4.420,86	2.209.887,00
Ibirité	115.604	3.768,64	559,87	14.750,61	4.349.805,20
Itajubá	78.096	3.617,32	3.213,04	4.251,47	2.147.329,19
Lavras	83.895	3.552,28	3.552,28	8.292,94	3.752.463,12
Nova Serrana	71.894	2.395,68	2.395,68	6.378,40	3.202.270,24
Paracatu	63.656	2.402,45	2.325,96	7.896,94	3.663.202,41
Patos de Minas	131.829	6.014,01	0,00	7.909,74	3.877.086,94
Pouso Alegre	123.766	5.036,23	5.036,23	6.466,66	3.248.780,70
Sabará	87.815	3.200,78	0,00	11.281,19	4.551.164,21
Santa Luzia	145.145	5.007,59	3.176,13	17.843,37	6.406.913,44
São Sebastião do Paraíso	58.108	2.534,41	0,00	4.447,23	2.145.367,25
Teófilo Otoni	85.623	3.526,47	2.823,49	3.319,85	1.979.144,53
Timóteo	71.781	2.853,84	0,00	6.692,36	3.590.664,25
Três Corações	60.017	2.498,14	241,50	4.130,43	2.160.444,84
Varginha	117.898	4.849,84	4.599,53	8.407,58	4.206.020,15
Vespasiano	83.316	2.508,90	2.508,90	9.594,75	5.070.901,85

Fonte: SNIS (BRASIL, 2017)

c) Municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes

Tabela 5.3– Dados do saneamento básico dos municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Volume de esgoto coletado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Volume de esgoto tratado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Consumo de energia elétrica no tratamento de água e esgoto (1.000 kWh/ano)</b>	<b>Gasto total com a energia elétrica no tratamento de água e esgoto (R\$/ano)</b>
Divinópolis	192.421	8.218,01	255,83	12.061,66	5.978.500,48
Ipatinga	234.008	8.658,89	8.658,89	19.130,57	8.853.891,39
Ribeirão das Neves	215.232	7.242,31	3.974,18	28.520,77	9.209.647,32

Fonte: SNIS (BRASIL, 2017)

d) Municípios com população maior que 250.000 habitantes

Tabela 5.4– Dados do saneamento básico dos municípios com população maior que 250.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Volume de esgoto coletado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Volume de esgoto tratado (1.000 m<sup>3</sup>/ano)</b>	<b>Consumo de energia elétrica no tratamento de água e esgoto (1.000 kWh/ano)</b>	<b>Gasto total com a energia elétrica no tratamento de água e esgoto (R\$/ano)</b>
Belo Horizonte	2.285.364	105.201,19	97.281,05	185.024,14	93.947.871,08
Betim	312.231	11.706,98	11.706,98	37.614,54	12.897.990,91
Contagem	519.469	20.368,74	19.018,02	55.524,70	20.411.288,07
Montes Claros	326.931	11.914,52	10.978,73	18.603,85	9.424.508,15

Fonte: SNIS (BRASIL, 2017)

## 5.2 Cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no tratamento anaeróbio de esgotos

Foram realizados os cálculos do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido nas ETEs dos municípios de Minas Gerais sob concessão da COPASA, considerando a determinação do volume de produção de biogás por meio das quatro metodologias descritas no item 4.2. Nos casos em que não há tratamento, mas somente coleta de esgoto, foram utilizados os dados de vazão real de esgoto coletado nos métodos que utilizam os dados de vazão real de esgoto tratado. Os resultados das metodologias para cada

município estão apresentados no ANEXO A - Resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no tratamento anaeróbio.

a) Municípios com população menor que 50.000 habitantes

A Figura 5.1 mostra os resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica para os municípios com menos de 50.000 habitantes, conforme metodologias de DQO Convertida de Lobato (2011), IPCC (2006), CETESB (2006) e UNFCCC (2013).

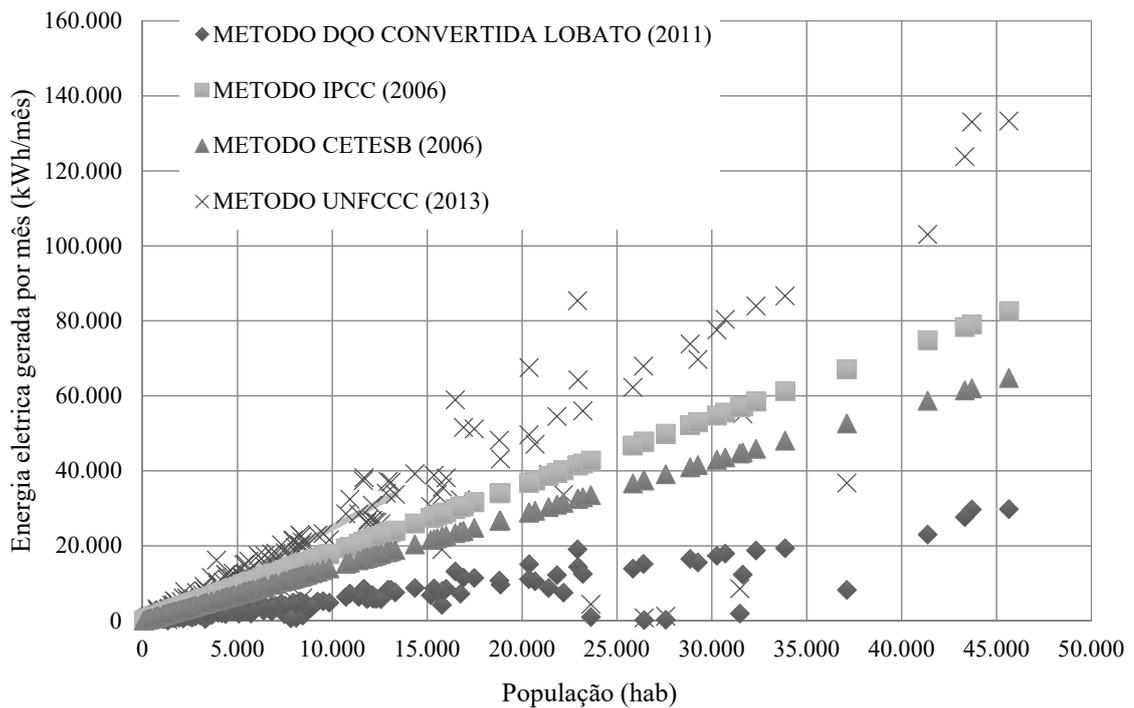


Figura 5.1 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com menos de 50.000 habitantes  
Fonte: Elaboração própria

É possível observar que existem pontos que não acompanham a tendência das curvas para as metodologias Lobato (2011) e UNFCCC (2013), isso se deve ao fato que estes dois métodos utilizam dados reais de vazão de esgoto tratado, em alguns casos divergentes dos dados teóricos, que são sempre proporcionais ao número de habitantes dos municípios. Desta maneira, alguns municípios apresentam resultados de potencial de produção de energia maiores ou menores que aqueles teoricamente esperados para seu tamanho.

b) Municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes

A Figura 5.2 mostra os resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica para os municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes, conforme metodologias de DQO Convertida de Lobato (2011), IPCC (2006), CETESB (2006) e UNFCCC (2013).

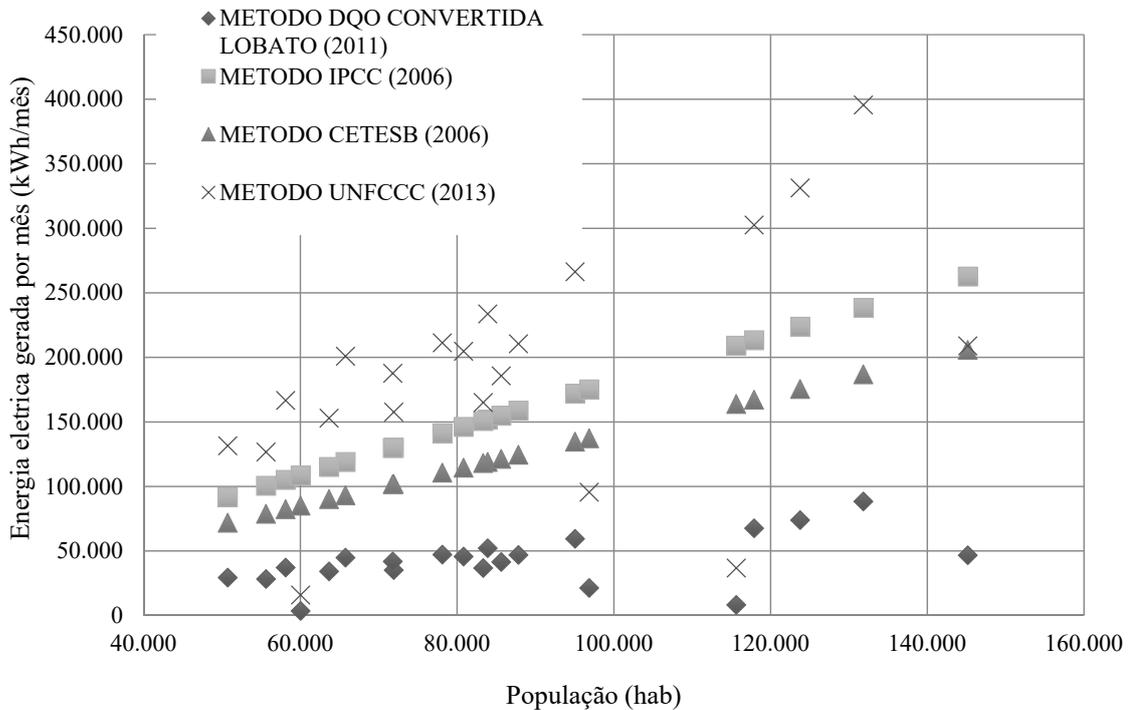


Figura 5.2 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com 50.000 a 150.000 habitantes  
Fonte: Elaboração própria

Neste caso, também é possível observar a existência de pontos fora da linha de tendência das curvas para as metodologias Lobato (2011) e UNFCCC (2013), devido ao fato destes dois métodos utilizarem dados reais de vazão de esgoto tratado, nem sempre proporcionais ao número de habitantes dos municípios. Desta maneira, alguns municípios apresentam resultados de potencial de produção de energia maiores e outros menores que aqueles teoricamente esperados para seu tamanho.

c) Municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes

A Figura 5.3 mostra os resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica para os municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes, conforme metodologias de DQO Convertida de Lobato (2011), IPCC (2006), CETESB (2006) e UNFCCC (2013).

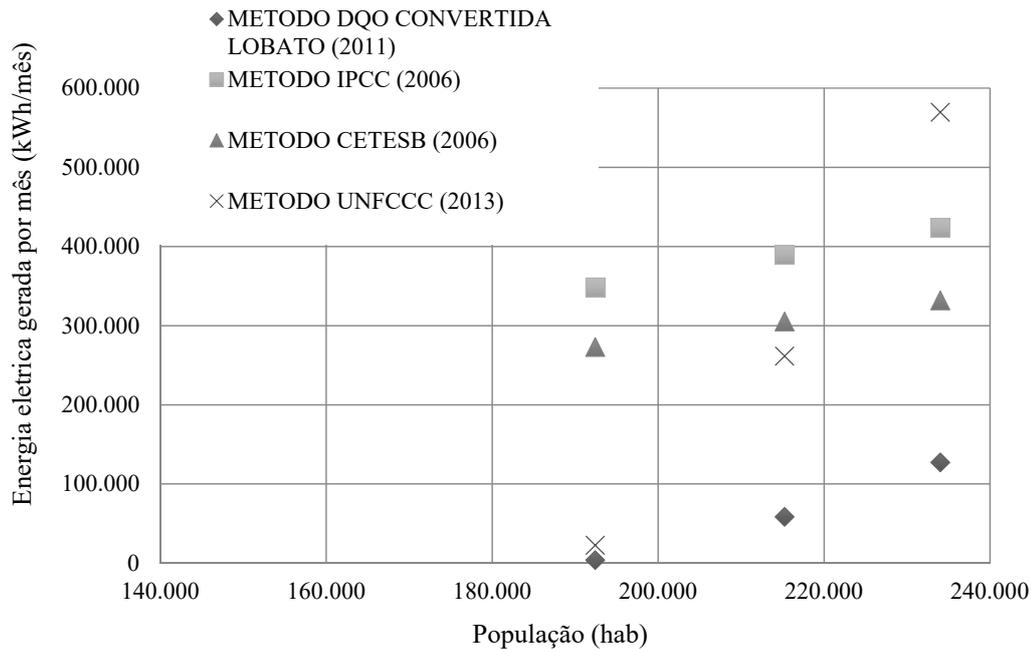


Figura 5.3 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com 150.000 a 250.000 habitantes  
Fonte: Elaboração própria

Nesta faixa de população, é possível observar que o método UNFCCC (2013) produziu resultados dispersos para a produção de energia elétrica. Nesse caso, a influência dos dados reais de vazão de esgoto tratado foi determinante para que a linha de tendência da curva referente a esta metodologia fosse discrepante das demais, já que os três municípios apresentam dados reais muito diferentes dos dados teóricos de vazão de esgotos: Divinópolis apresenta vazão real igual a 4% da vazão teórica de esgoto, Ipatinga 115% e Ribeirão das Neves 57%. Além disso, somente Ipatinga trata 100% do esgoto coletado, Divinópolis e Ribeirão das Neves trata 3% e 55% respectivamente, o que também resulta em valores diferentes de potencial de produção de energia elétrica daqueles calculados por metodologias que consideram apenas o número de habitantes.

d) Municípios com população superior a 250.000 habitantes

A Figura 5.4 mostra os resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica para os municípios com população superior a 250.000 habitantes, conforme metodologias de DQO Convertida de Lobato (2011), IPCC (2006), CETESB (2006) e UNFCCC (2013).

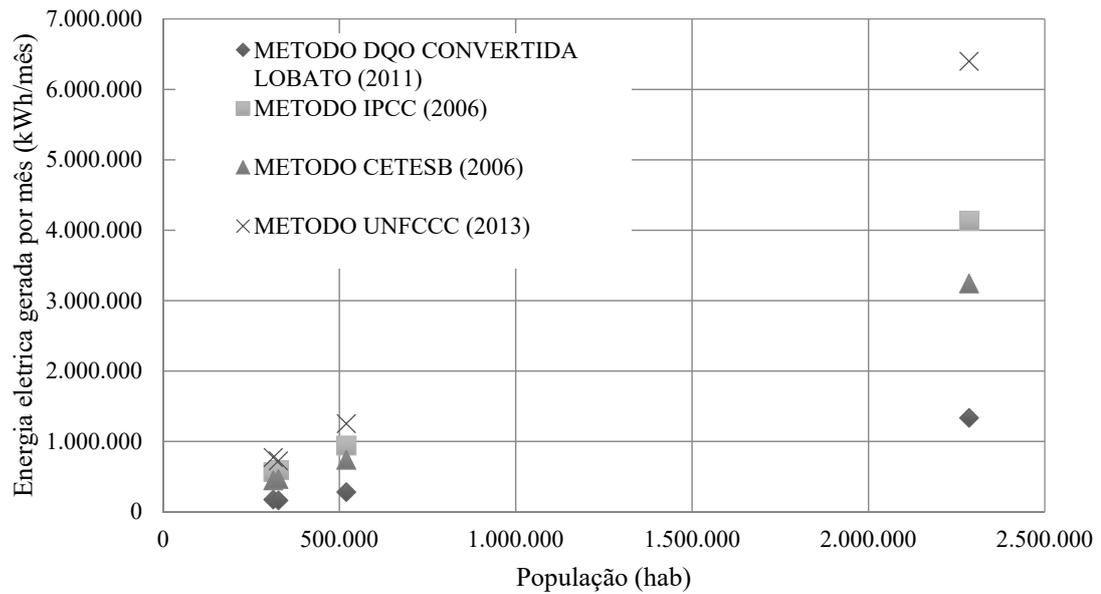


Figura 5.4 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com mais de 250.000 habitantes  
Fonte: Elaboração própria

Já nesta faixa de população, é possível observar que os resultados de todas as metodologias seguem uma linha de tendência. Isso pode ser justificado pela proximidade dos dados de vazão reais e teóricos de esgotos tratados: Montes Claros apresenta vazão real de esgoto tratado igual a 105% da vazão teórica produzida, Contagem 114%, Betim 117% e Belo Horizonte 133%. Além disso, estes municípios também tratam quase a totalidade do esgoto coletado: Montes Claros trata 92% do esgoto coletado, Contagem 93%, Betim 100% e Belo Horizonte 92%.

### 5.3 Discussão dos resultados gerados por cada metodologia empregada no cálculo da produção de biogás e metano nos municípios analisados

Os resultados apresentados no item 5.2 indicam algumas discrepâncias entre as metodologias empregadas, mas de forma geral, sugerem a mesma ordem de grandeza. É possível notar, pelas linhas de tendências apresentadas na Figura 5.5, que as metodologias são bastante convergentes para populações até 50.000 habitantes, seguem próximas até 150.000 habitantes, começam a divergir discretamente a partir de 150.000 habitantes e acima de 250.000 são bem divergentes.

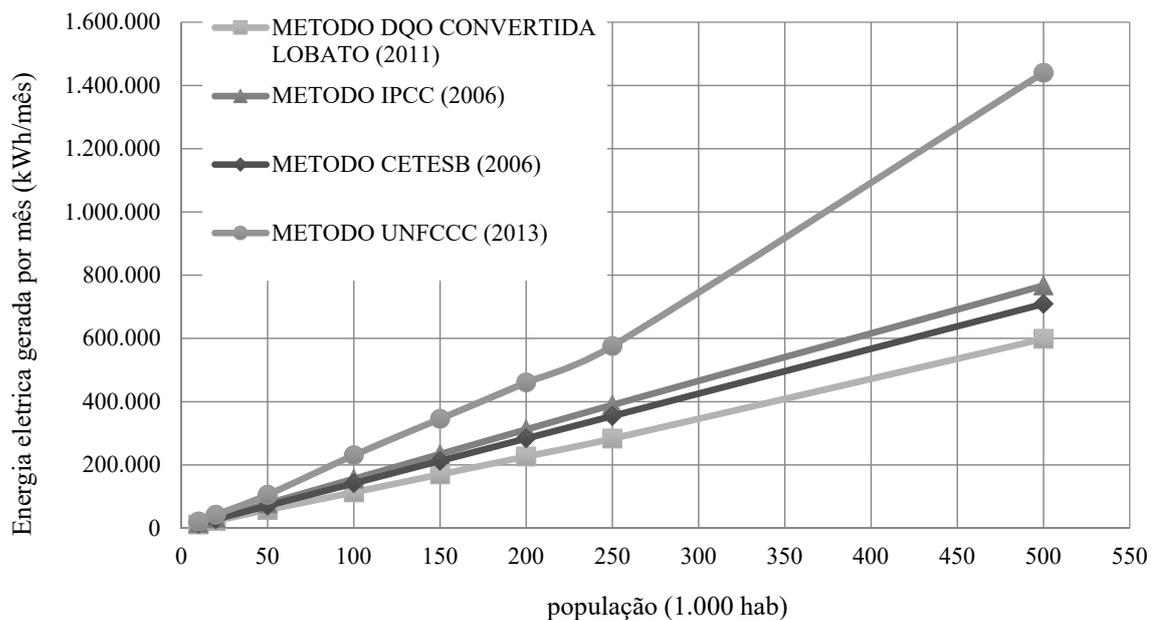


Figura 5.5 - Comparação entre as metodologias empregadas nos cálculos de potencial de produção de energia elétrica através do biogás proveniente do tratamento anaeróbico de esgotos.

Fonte: Elaboração própria

Estas divergências podem ser explicadas pelo emprego de diferentes parâmetros na composição dos cálculos em cada metodologia. O método UNFCCC (2013) considera o volume de esgoto tratado e a contribuição per capita de DQO. O método CETESB (2006) emprega o número de habitantes e a contribuição *per capita* de DBO<sub>5</sub>. O método IPCC (2006) considera o número de habitantes, a contribuição *per capita* de DQO e as perdas de metano convertido em lodo. Nota-se que os métodos UNFCCC (2013) e CETESB (2006) não consideram nenhuma perda de metano no processo de degradação anaeróbica da matéria orgânica.

Já o método de DQO Convertida de Lobato (2011), além de empregar nos cálculos a vazão de esgoto tratado e a concentração típica de DQO, é único método que leva em consideração todas as vias de formação do metano durante a biodigestão anaeróbica como as parcelas de metano que ficam dissolvidas no efluente ou escapam no gás residual, a parcela convertida em lodo e a parcela de metano consumida na redução do sulfato. Estas perdas são significativas e mostram que apenas um percentual de 20 a 39% da DQO convertida em metano são efetivamente recuperados na forma de biogás e podem ser convertidos em energia. Souza (2010) realizou experimentos com reatores UASB e obteve resultados bem próximos ao modelo de Lobato (2011), de 14 a 24% da DQO convertida em metano ficou dissolvida no efluente, 8 a 10% se converteu em lodo no reator, 4,5 a 5% foi consumida na redução do

sulfato, 16 a 18% no gás residual e apenas 24 a 30% da DQO convertida em metano foi de fato medida no biogás captado.

Nota-se pelos resultados obtidos, a influência dos dados reais de vazão de esgoto tratado nos resultados das metodologias Lobato (2011) e UNFCCC (2013), já que estes métodos além de apresentem alguns pontos fora das linhas de tendências das curvas, também resultaram em linhas de tendências com maior inclinação para as cidades com população superior a 250.000 habitantes. Isso se deve ao fato de que, além desses municípios tratarem, em média, 93% do esgoto coletado, a vazão real de esgoto tratado para as cidades com população superior a 250.000 ser maior que a vazão teórica, como Belo Horizonte que tem vazão real 33% maior que a vazão teórica calculada. Já para os municípios menores a relação entre a vazão de esgoto coletado e tratado é menor, em média, 79%.

Portanto, para realizar a análise de viabilidade de implantação do sistema de recuperação de metano nas ETEs é recomendável empregar o método de Lobato (2011), já que este fornece estimativas de produção de biogás mais próximas daquelas verificadas na prática, pois considera dados reais de volume de esgoto tratado e as perdas de metano no processo de digestão anaeróbia. Desta maneira, a produção de energia considerada na planta a ser analisada não será superestimada.

#### **5.4 Cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB**

Foram realizados os cálculos do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASBS para os municípios de Minas Gerais sobre concessão da COPASA, conforme metodologia de CETESB (2006) e dados experimentais de produção de metano de Felca (2016) e Moni Silva (2016). Os resultados para cada município estão apresentados no Anexo B - Resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB.

##### **a) Municípios com população menor que 50.000 habitantes**

A Figura 5.6 mostra os resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB para os municípios com população inferior a 50.000 habitantes.

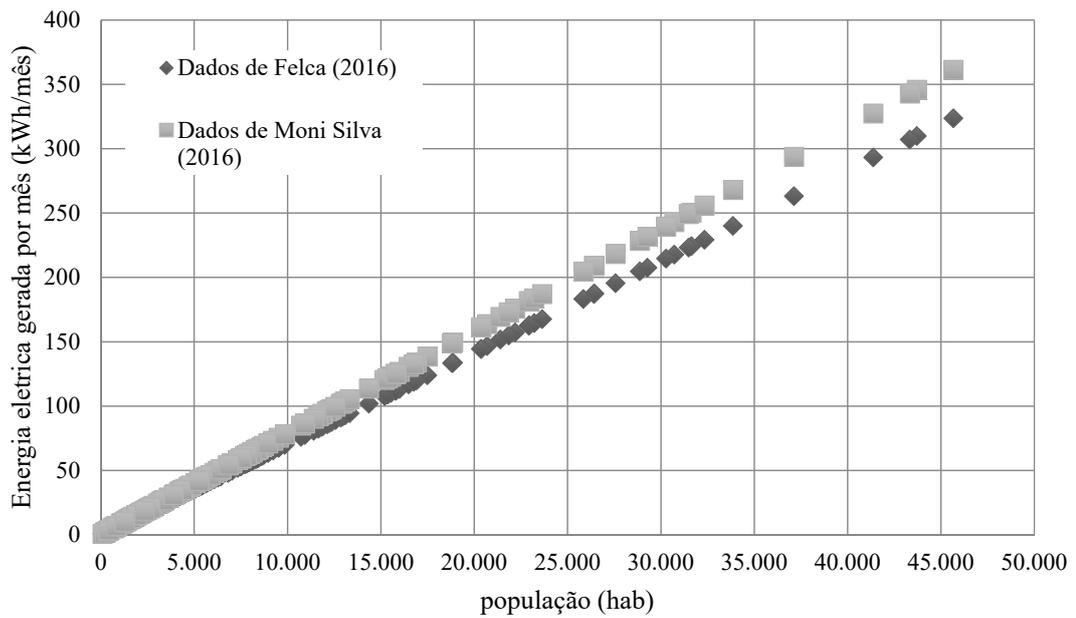


Figura 5.6 - Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com menos de 50.000 habitantes  
Fonte: Elaboração própria

b) Municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes

A Figura 5.7 mostra os resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB para os municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes.

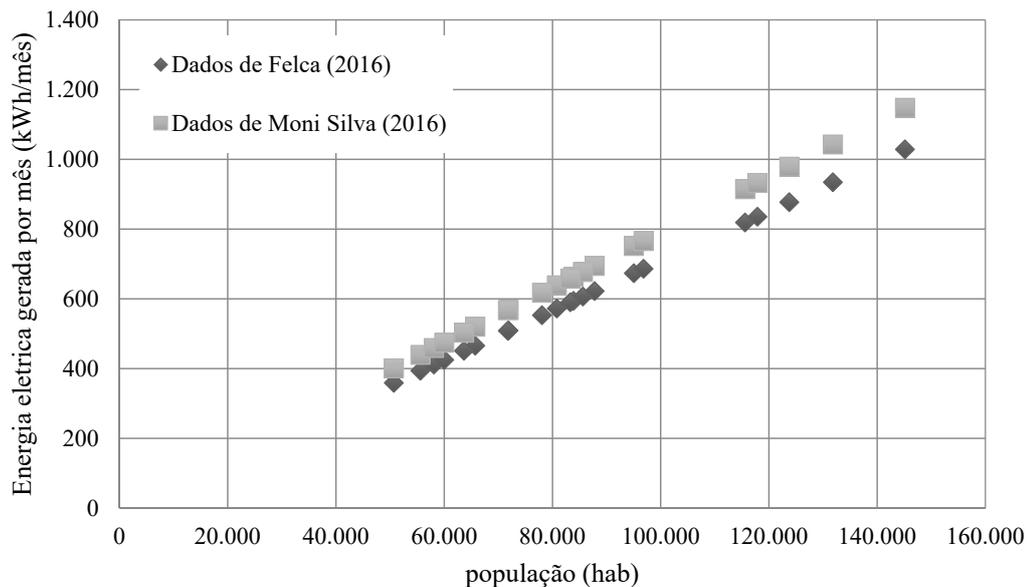


Figura 5.7 - Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com 50.000 a 150.000 habitantes  
Fonte: Elaboração própria

c) Municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes

A Figura 5.8 mostra os resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB para os municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes.

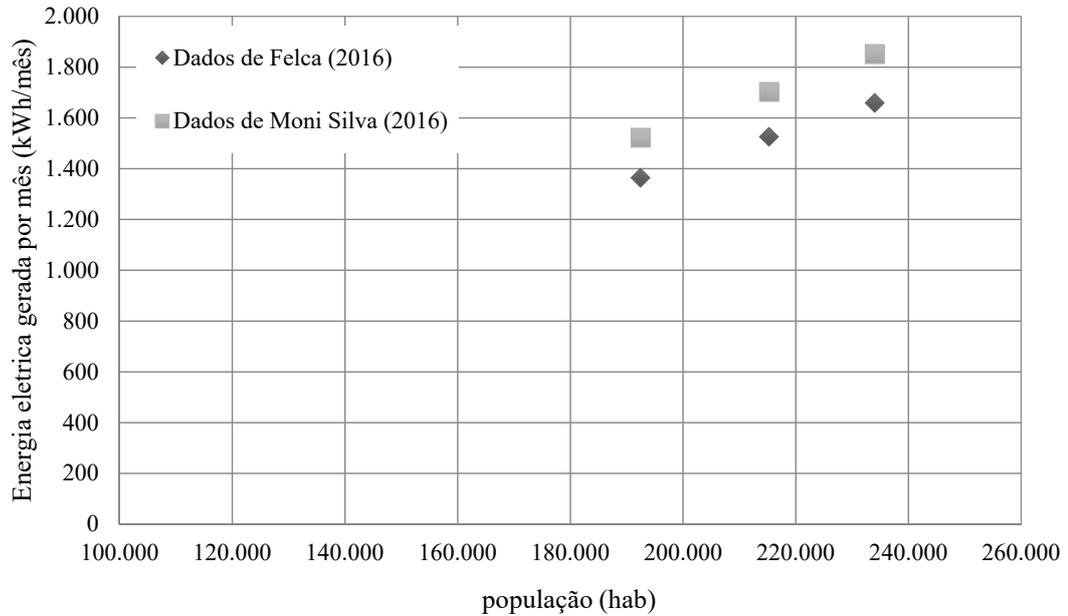


Figura 5.8 – Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com 150.000 a 250.000 habitantes

Fonte: Elaboração própria

d) Municípios com população com mais de 250.000 habitantes

A Figura 5.9 mostra os resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB para os municípios com população superior a 250.000 habitantes.

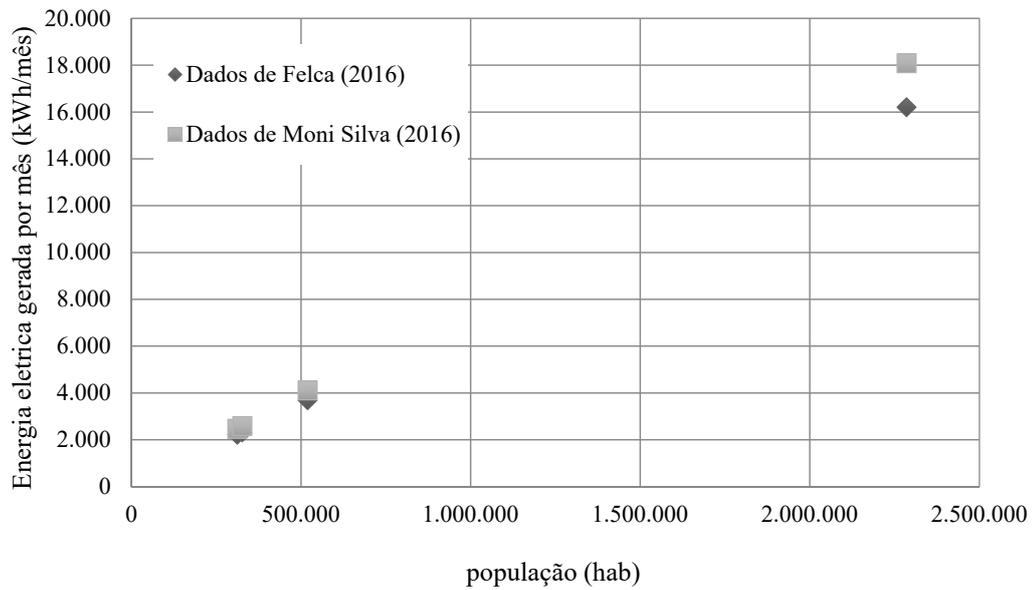


Figura 5.9 - Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com mais de 250.000 habitantes

Fonte: Elaboração própria

Os resultados apresentados nas figuras 5.6 a 5.9 mostram que os dados de produção de metano a partir da biodigestão anaeróbia do lodo remanescente do tratamento de esgoto doméstico via UASB medidos por Felca (2016) e Moni Silva (2016), por meio de experimentos práticos, resultam em valores similares de produção de energia elétrica, como pode ser observado nas linhas de tendência apresentadas na Figura 5.10.

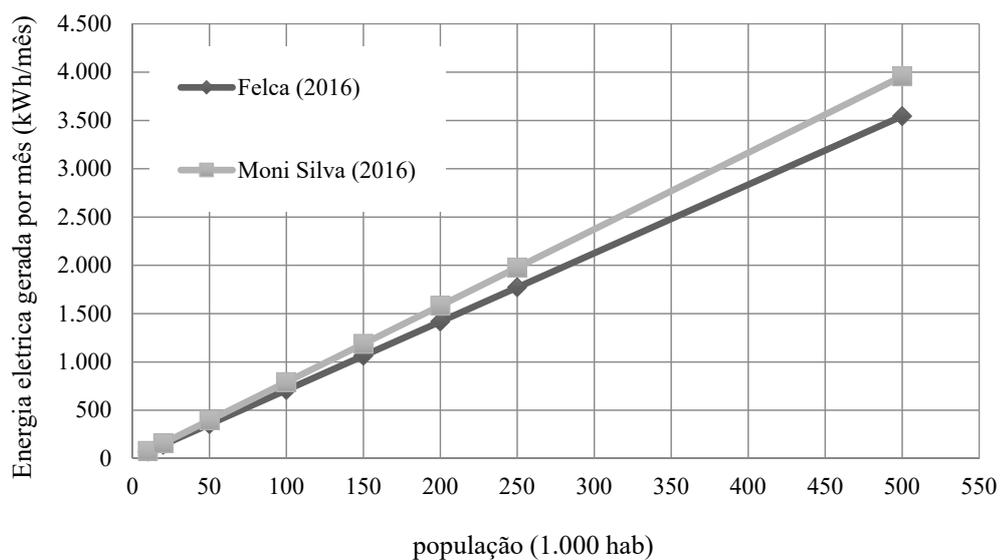


Figura 5.10 – Produção de energia elétrica através do biogás oriundo do lodo de esgotos com dados experimentais de Felca (2016) e Moni Silva (2016).

Fonte: Elaboração própria

## 5.5 Análise da viabilidade econômica da implantação do sistema de recuperação energética do metano produzido no tratamento de esgotos e digestão anaeróbia do lodo nos municípios analisados

Foram realizadas análises de viabilidade econômica da implantação do sistema de recuperação energética do metano produzido no tratamento de esgotos e na digestão anaeróbia do lodo oriundo de reatores UASB para os municípios de Minas Gerais sobre concessão da COPASA, bem como uma análise geral do ponto de vista do estado. Os resultados de *payback* nulo (iguais a 0) indicam que não houve retorno do investimento no município analisado. Os resultados para cada município estão apresentados no Anexo C – Resultados da análise da viabilidade econômica da implantação do sistema de recuperação energética do metano produzido no tratamento de esgotos e na digestão anaeróbia lodo nos municípios analisados.

### a) Municípios com população menor que 50.000 habitantes

A Figura 5.11, a Figura 5.12, a Figura 5.13, a Figura 5.14 e a Figura 5.15 mostram os resultados dos cálculos do custo de investimento total, do custo evitado de energia elétrica por mês (benefício), do VPL, da TIR e do *payback*, respectivamente, para os municípios com população inferior a 50.000 habitantes.

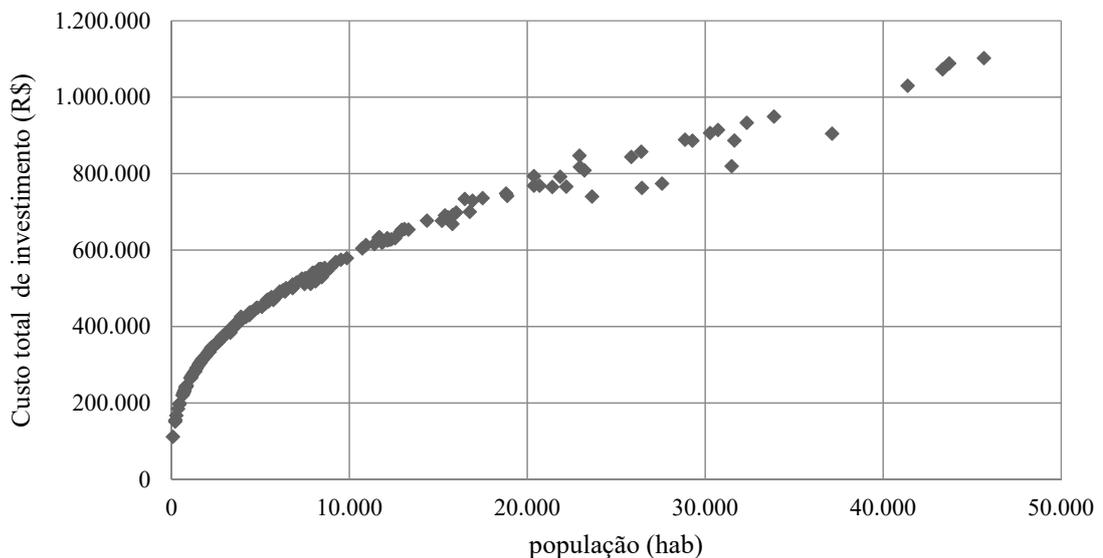


Figura 5.11 – Custo total de investimento para população menor que 50.000 habitantes  
Fonte: Elaboração própria

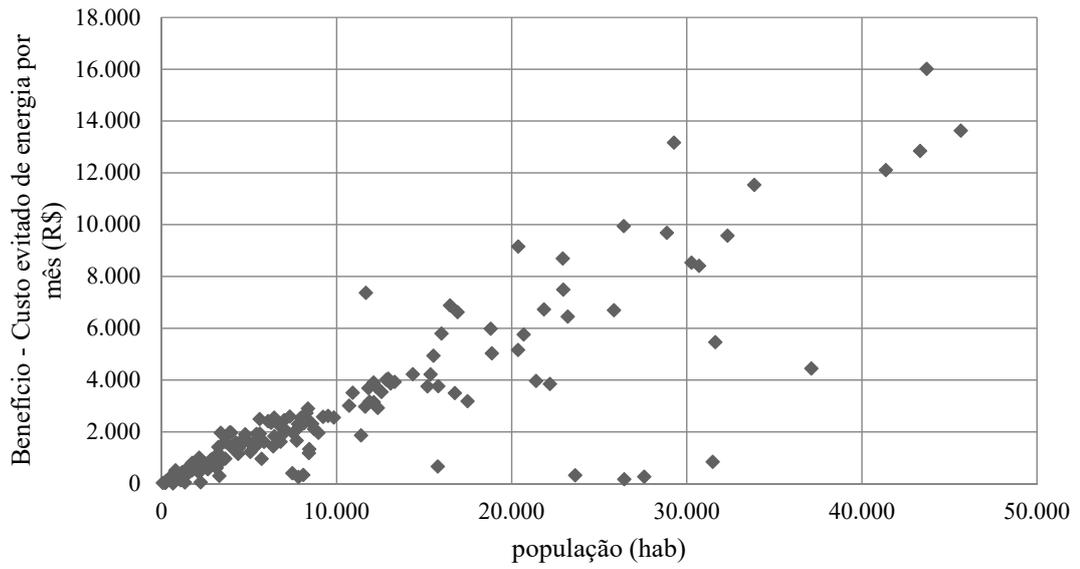


Figura 5.12 – Custo evitado de energia por mês (benefício) para população menor que 50.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

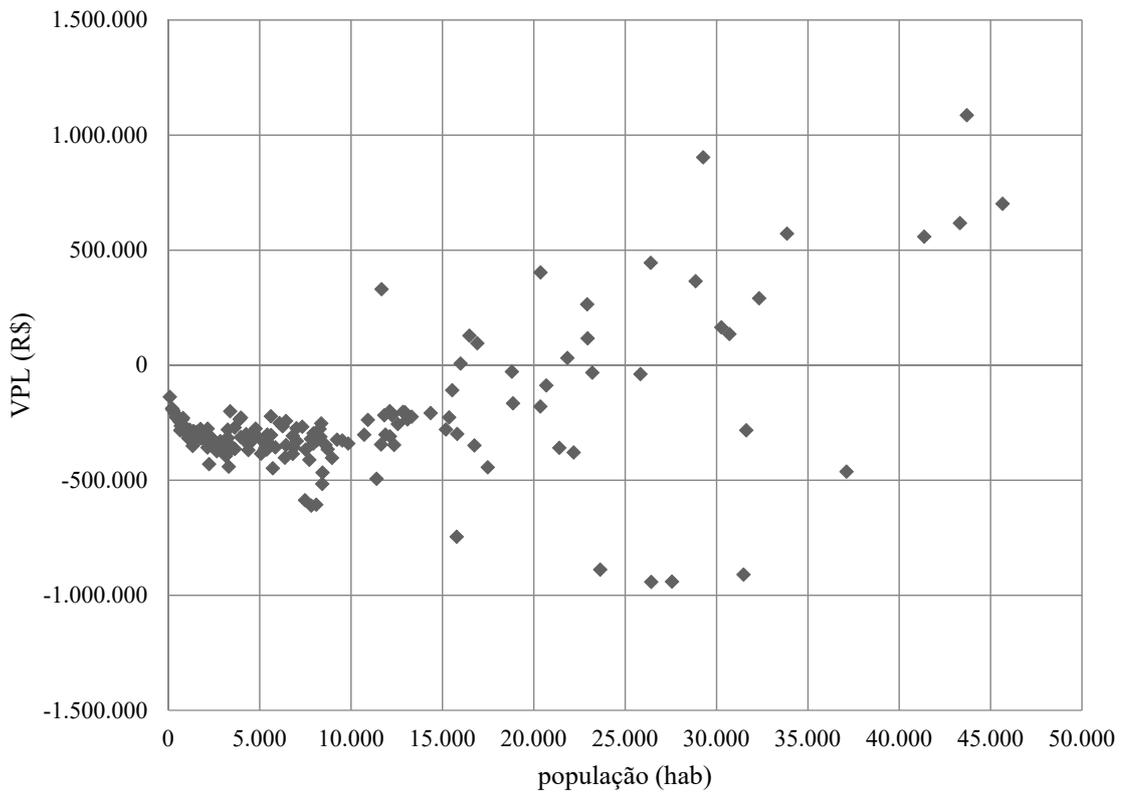


Figura 5.13 – VPL para população menor que 50.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

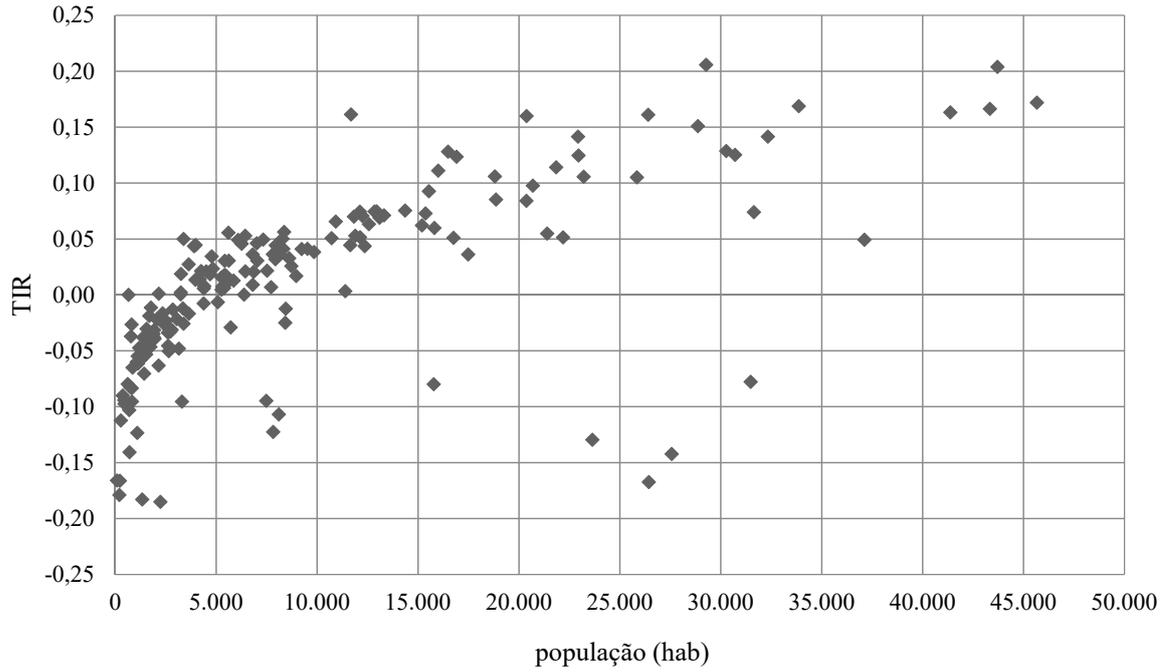


Figura 5.14 – TIR para população menor que 50.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

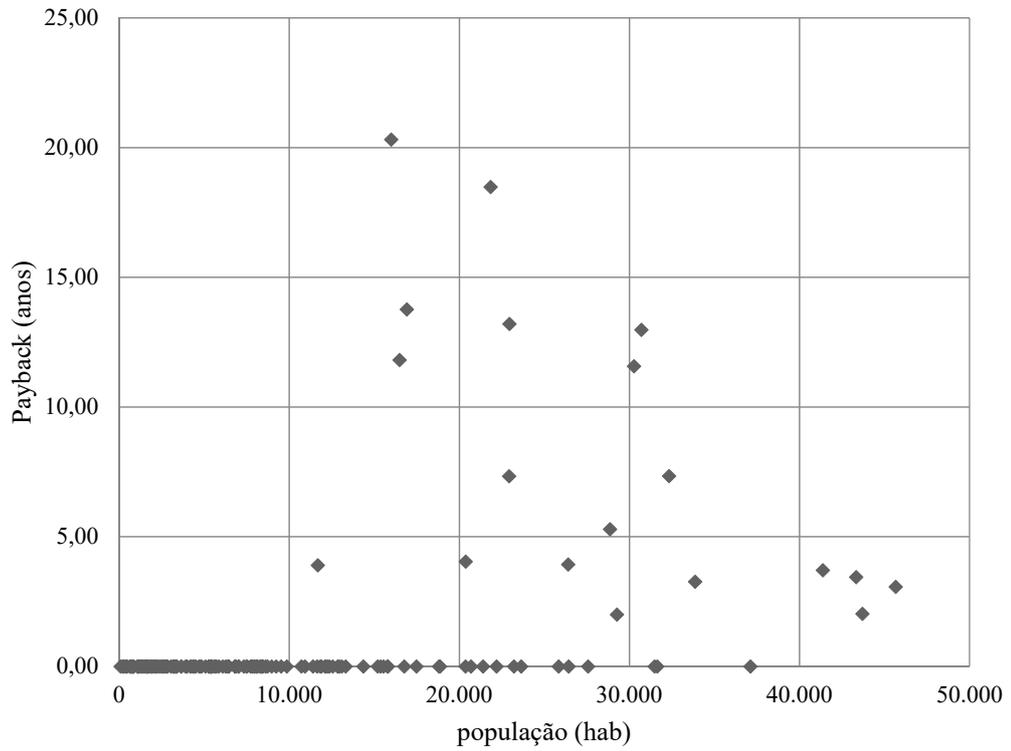


Figura 5.15 – Payback para população menor que 50.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

b) Municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes

A Figura 5.16, a Figura 5.17, a Figura 5.18, a Figura 5.19 e a Figura 5.20 mostram os resultados dos cálculos do custo de investimento total, do custo evitado de energia elétrica por mês (benefício), do VPL, da TIR e do *payback*, respectivamente, para os municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes.

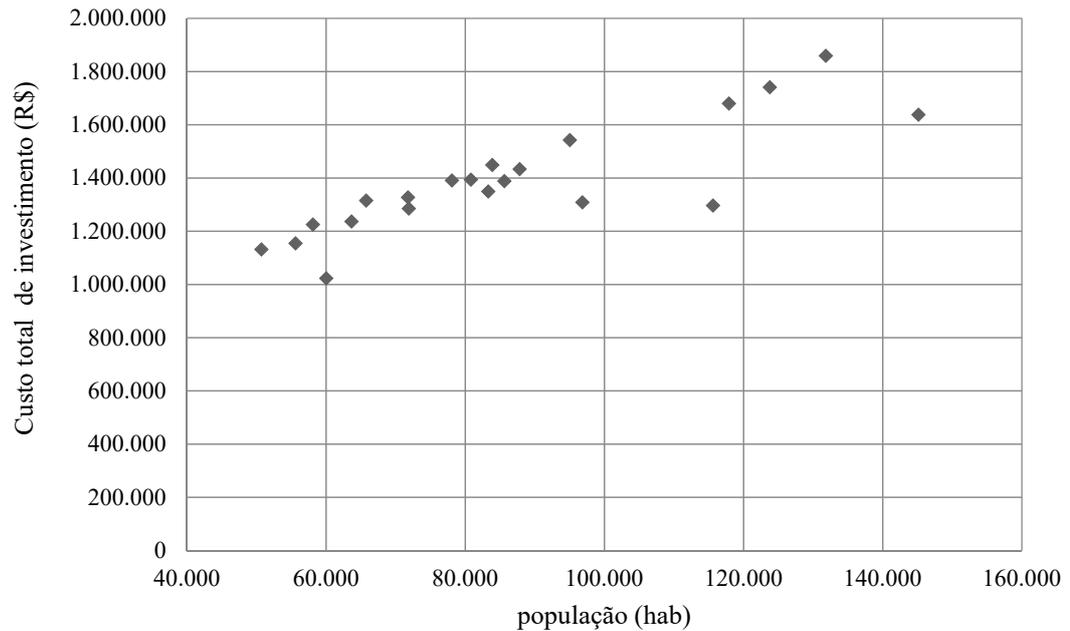


Figura 5.16 – Custo total de investimento para população entre 50.000 e 150.000 habitantes  
Fonte: Elaboração própria

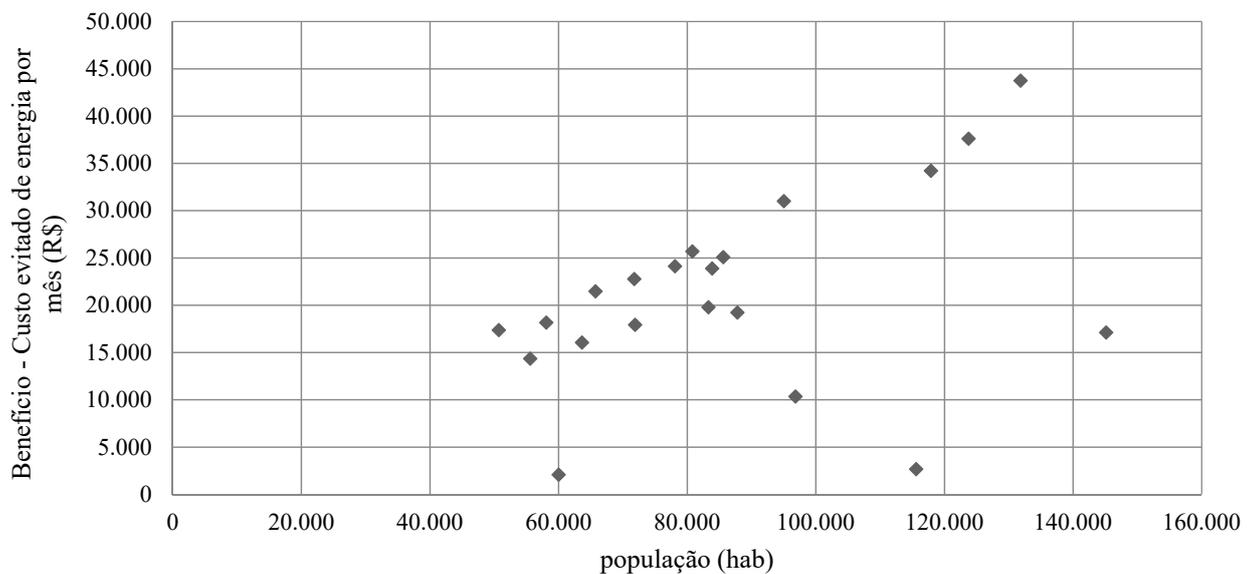


Figura 5.17 – Custo evitado de energia por mês (benefício) para população entre 50.000 e 150.000 habitantes  
Fonte: Elaboração própria

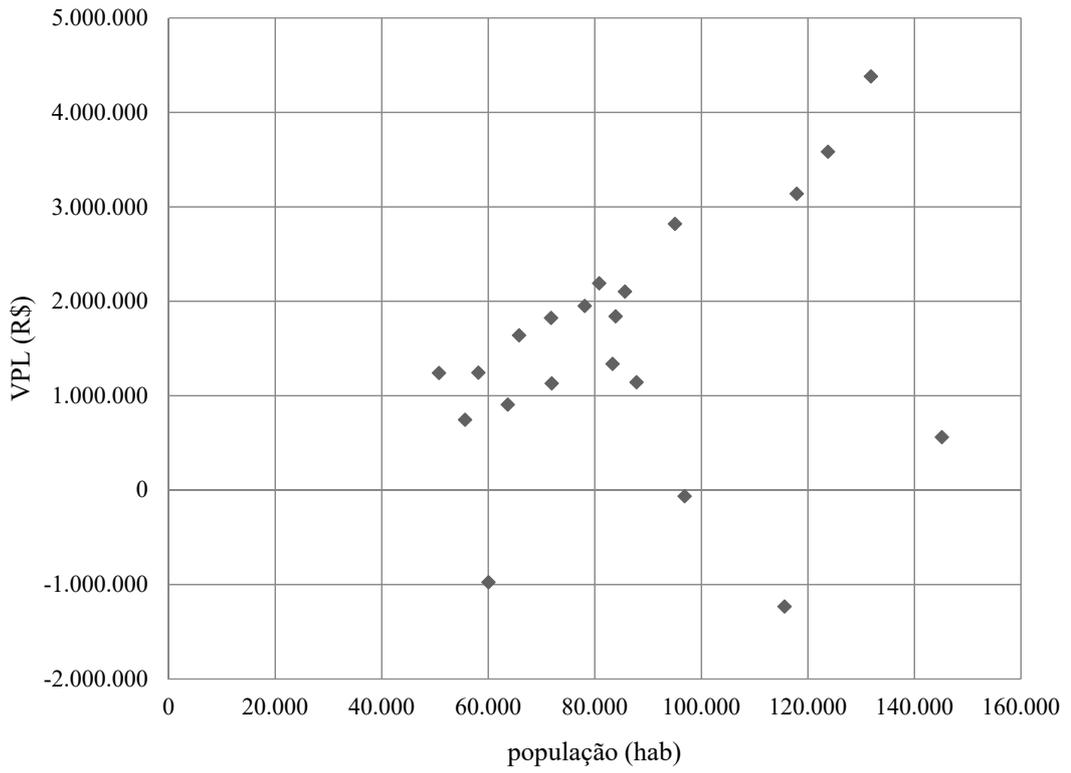


Figura 5.18 – VPL para população entre 50.000 e 150.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

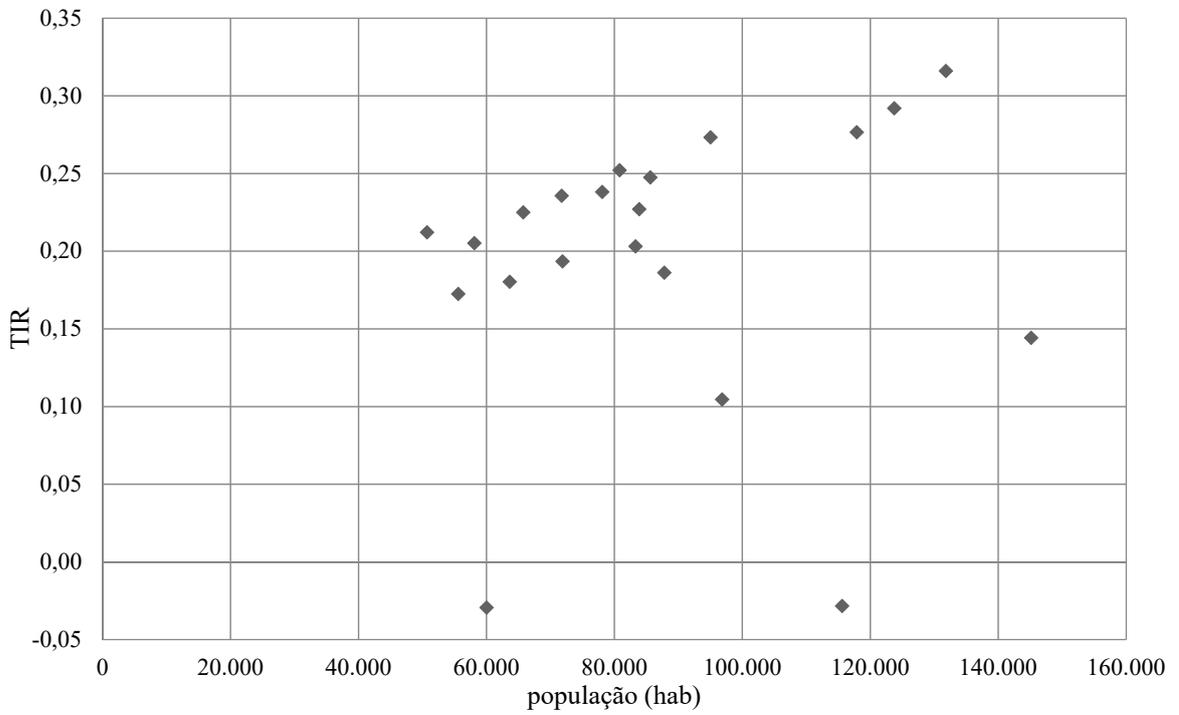


Figura 5.19 – TIR para população entre 50.000 e 150.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

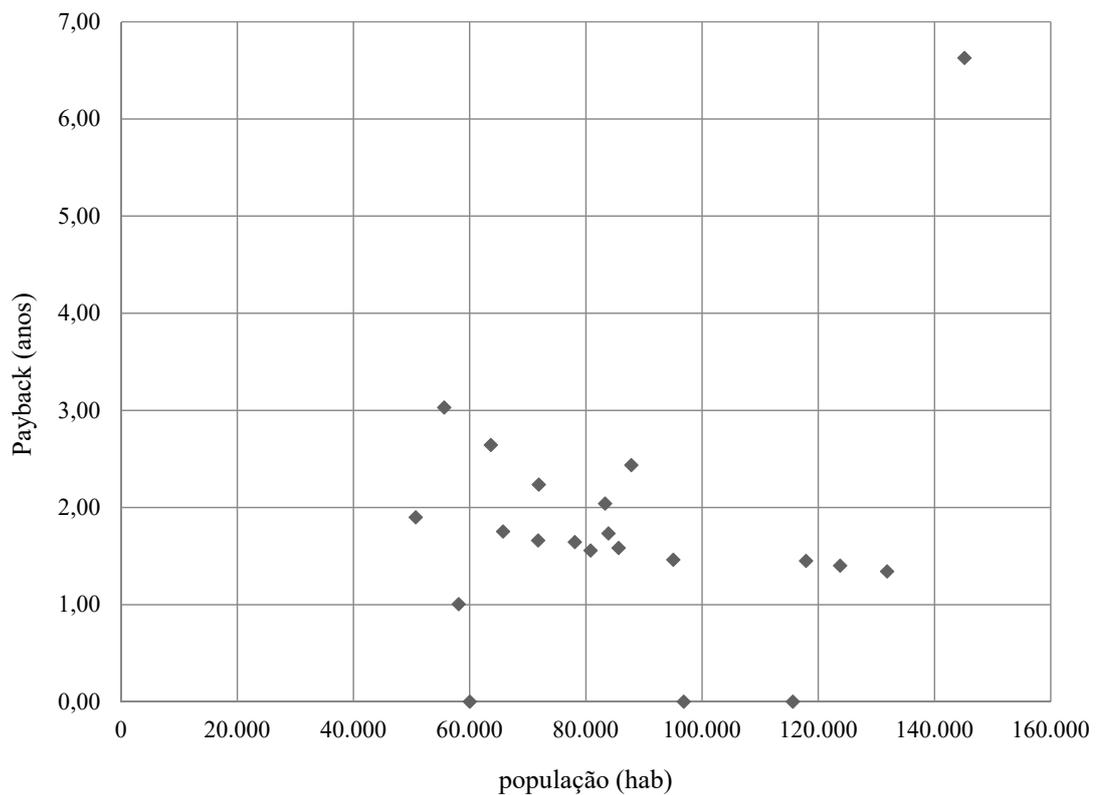


Figura 5.20 – Payback para população entre 50.000 e 150.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

c) Municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes

A Figura 5.21, a Figura 5.22, a Figura 5.23, a Figura 5.24 e a Figura 5.25 mostram os resultados dos cálculos do custo de investimento total, do custo evitado de energia elétrica por mês (benefício), do VPL, da TIR e do *payback*, respectivamente, para os municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes.

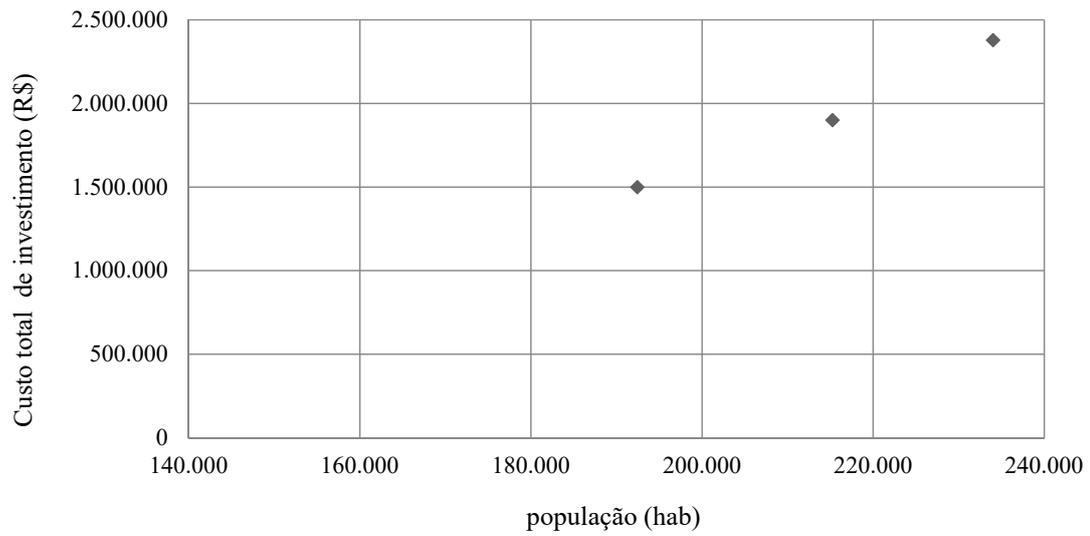


Figura 5.21 – Custo total de investimento para população entre 150.000 e 250.000 habitantes  
Fonte: Elaboração própria

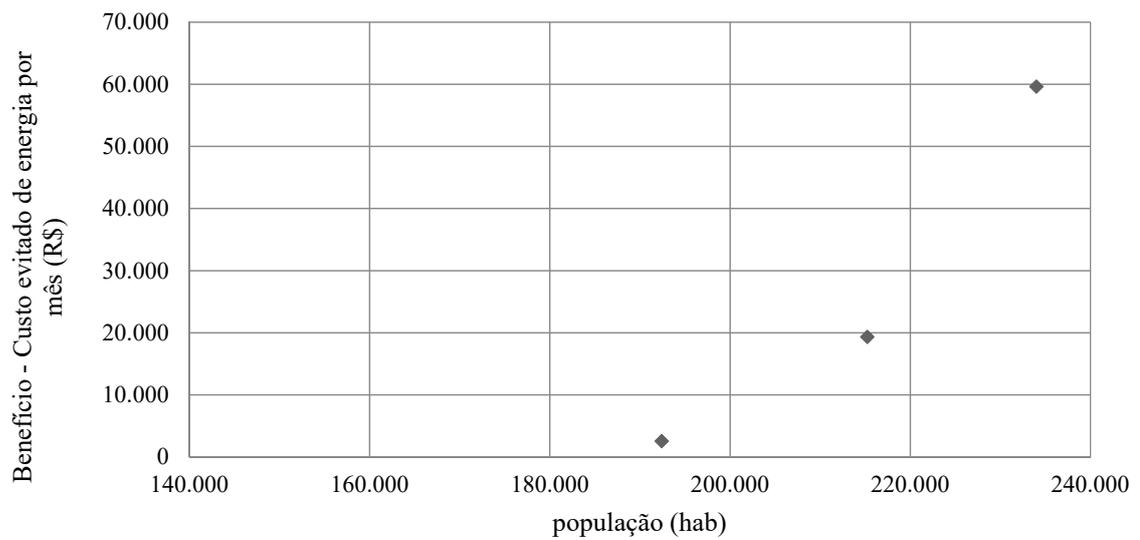


Figura 5.22 – Custo evitado de energia por mês (benefício) para população entre 150.000 e 250.000 habitantes  
Fonte: Elaboração própria

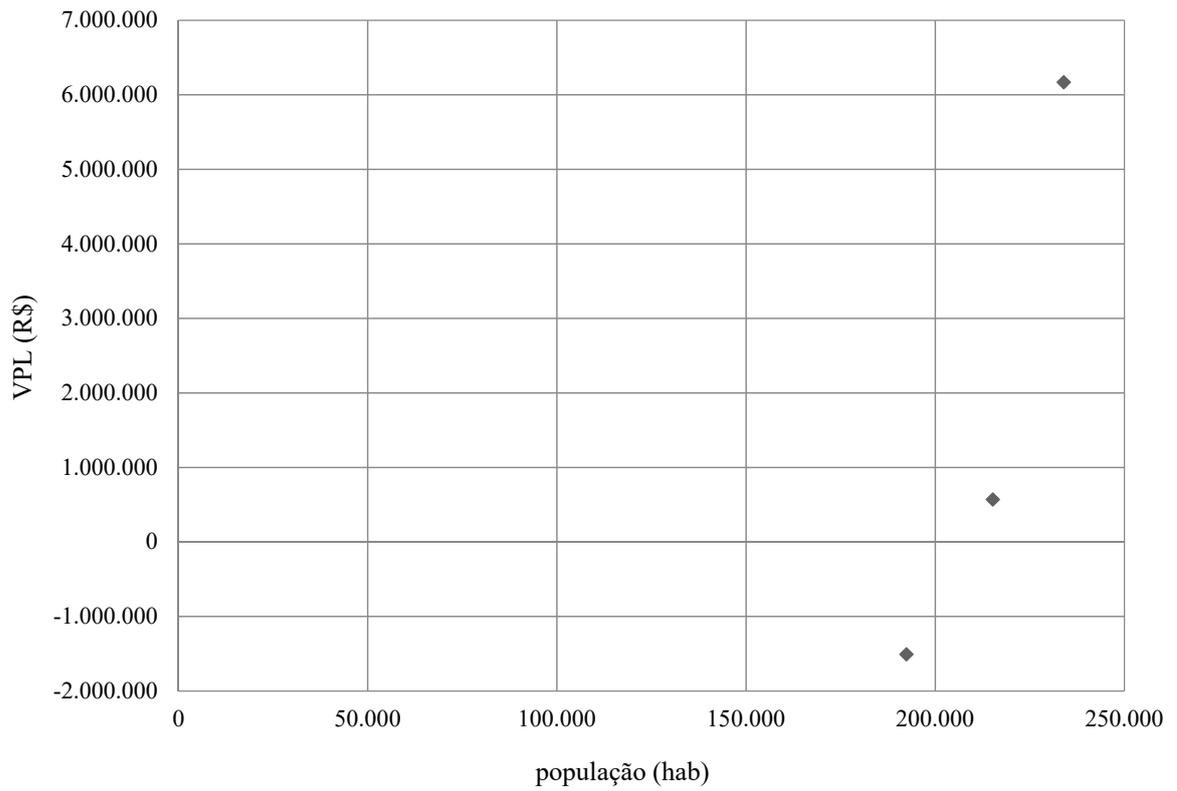


Figura 5.23 – VPL para população entre 150.000 e 250.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

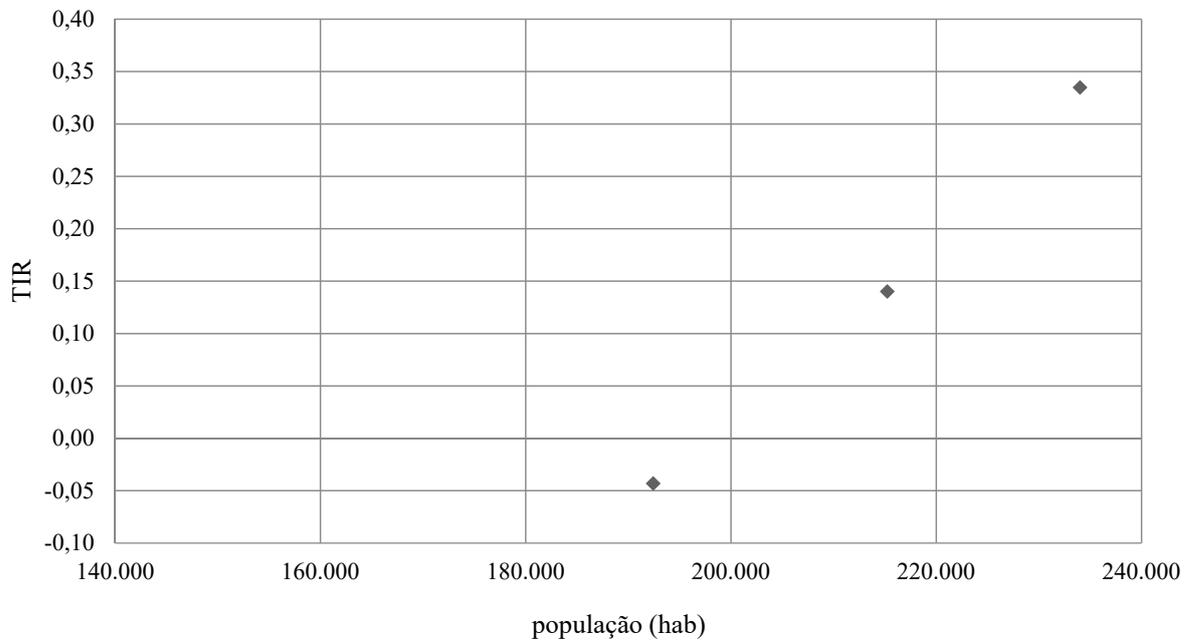


Figura 5.24 – TIR para população entre 150.000 e 250.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

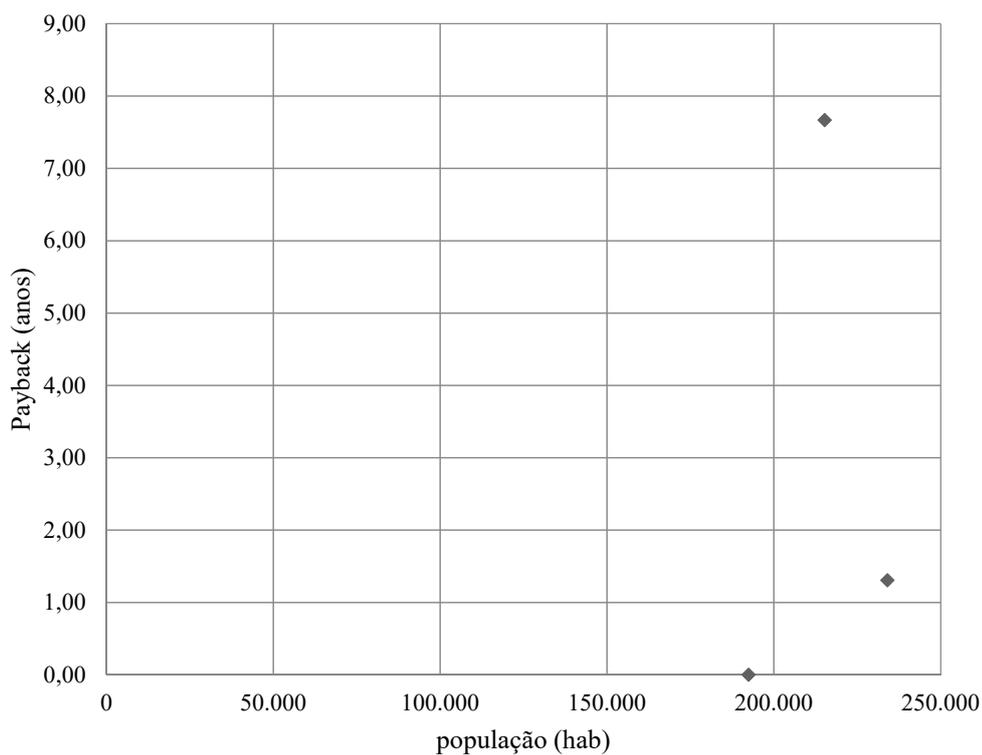


Figura 5.25 - Payback para população entre 150.000 e 250.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

d) Municípios com população com mais de 250.000 habitantes

A Figura 5.26, a Figura 5.27, a Figura 5.28, a Figura 5.29 e a Figura 5.30 mostram os resultados dos cálculos do custo de investimento total, do custo evitado de energia elétrica por mês (benefício), do VPL, da TIR e do *payback*, respectivamente, para os municípios com população superior a 250.000 habitantes.

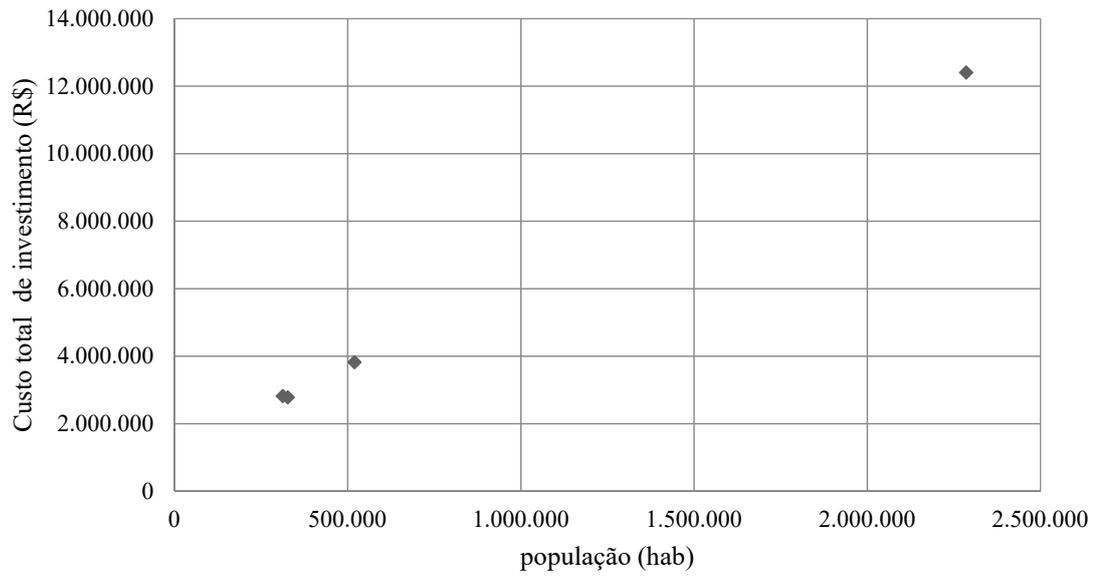


Figura 5.26 – Custo total de investimento para população superior a 250.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

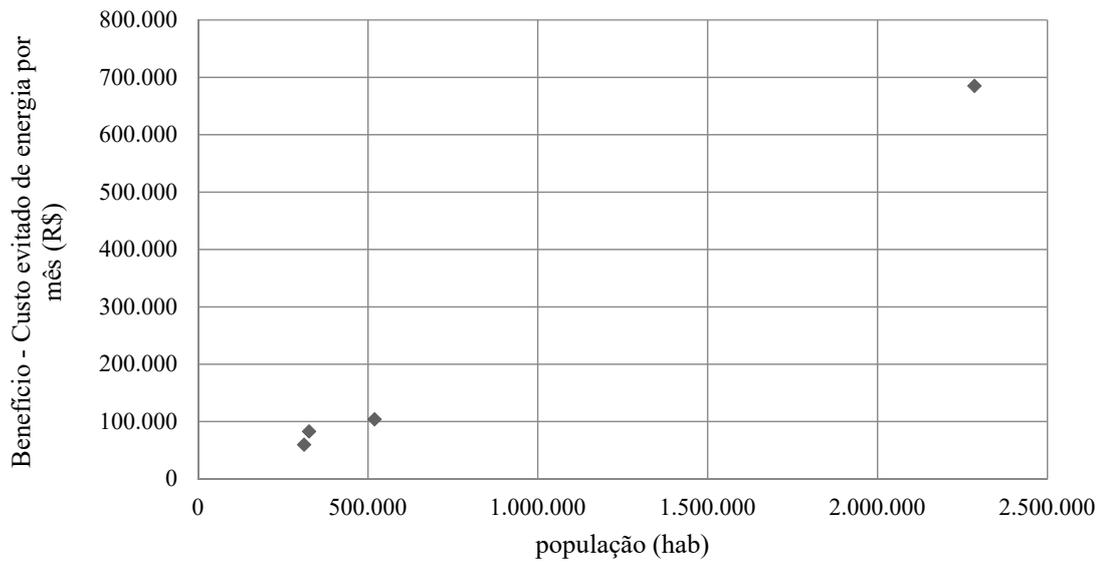


Figura 5.27 – Custo evitado de energia por mês (benefício) para população superior a 250.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

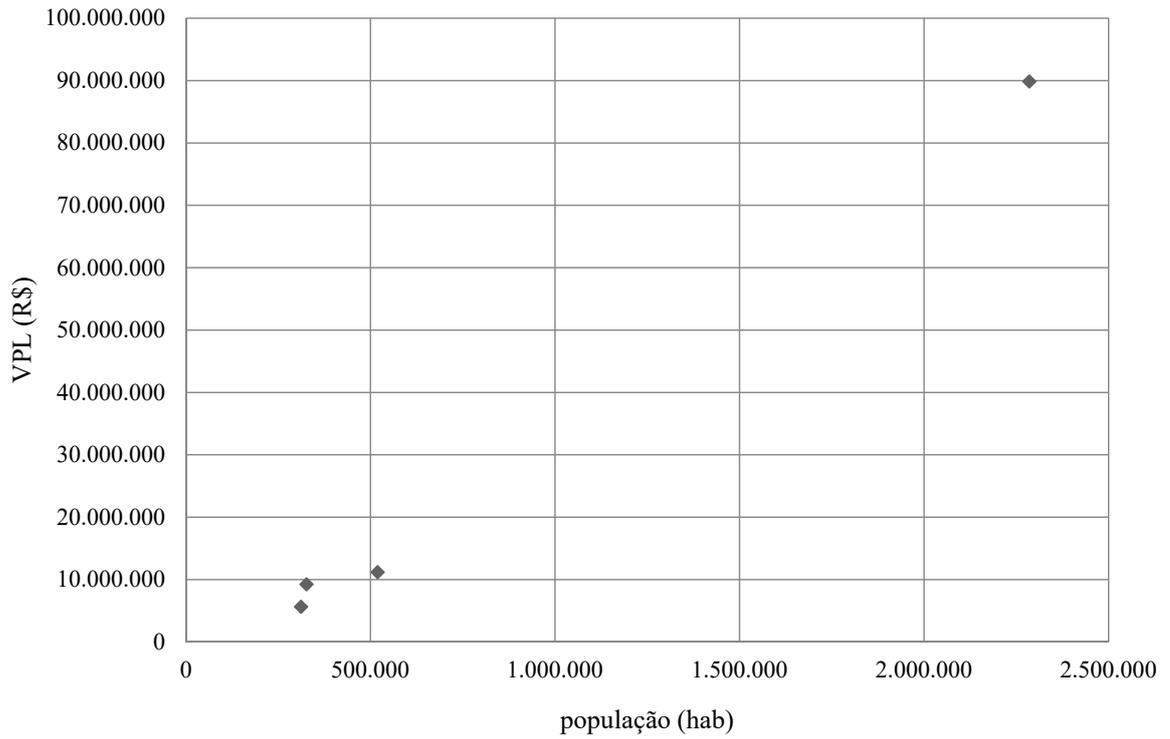


Figura 5.28 – VPL para população superior a 250.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

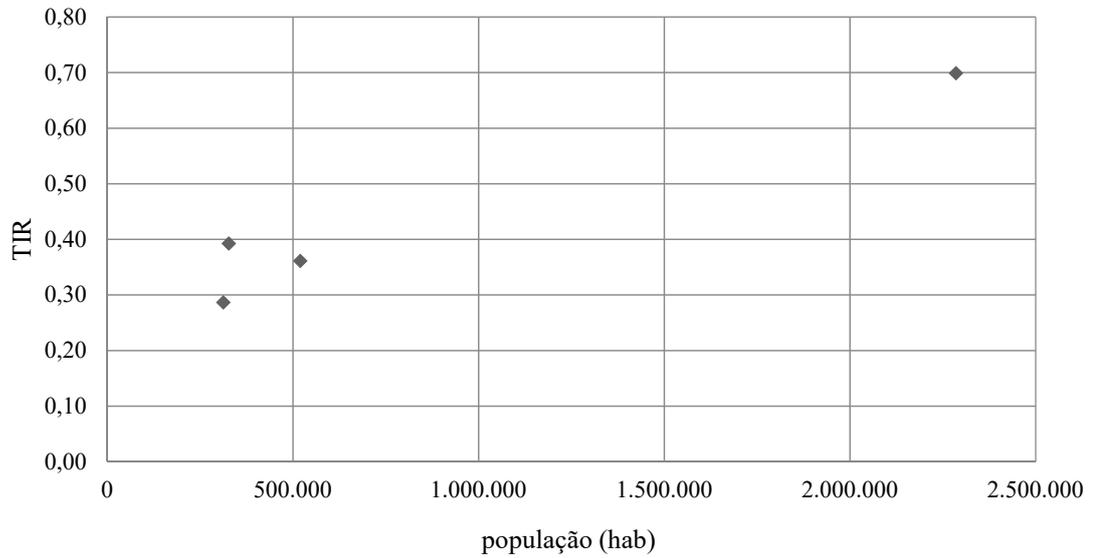


Figura 5.29 – TIR para população superior a 250.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

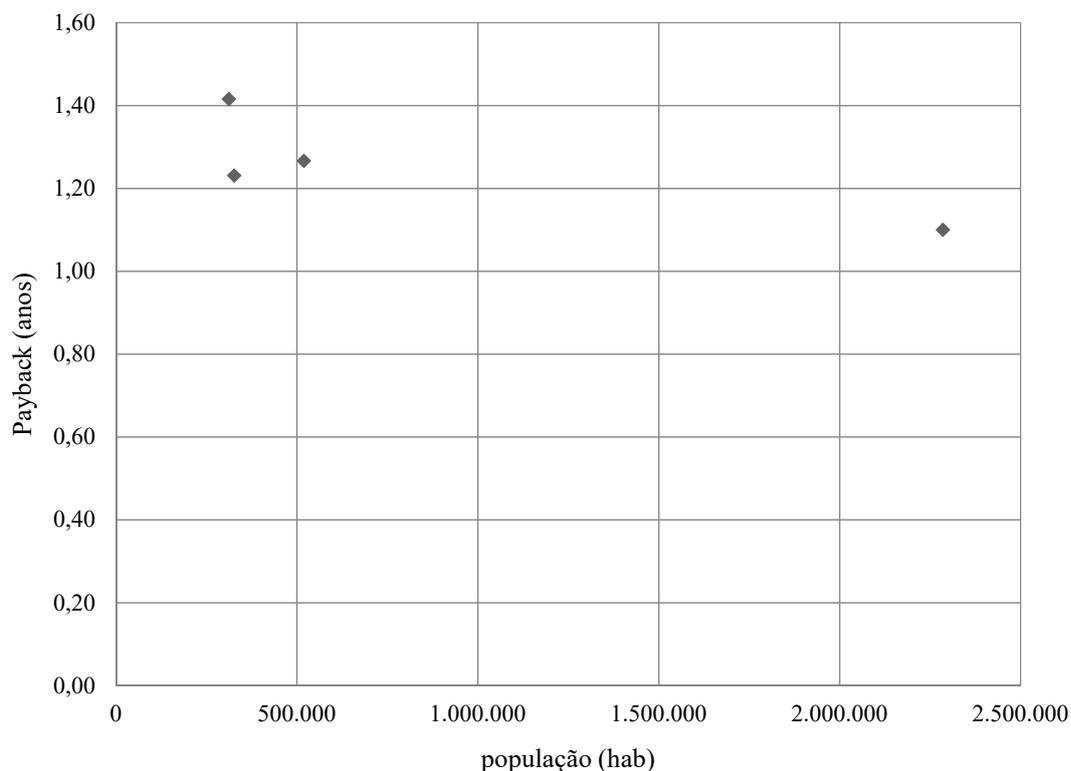


Figura 5.30 - *Payback* para população superior a 250.000 habitantes  
 Fonte: Elaboração própria

e) Discussão dos resultados de viabilidade econômica

Os resultados da análise de viabilidade indicam que, de uma forma geral, a geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no tratamento anaeróbico de esgotos e lodo de esgotos é viável para a maior parte dos municípios com mais de 50.000 habitantes, já que cerca de 86% dos municípios com população entre 50.000 e 150.000, 67% dos municípios com população entre 150.000 e 250.000 e 100% dos municípios com população superior a 250.000 apresentaram VPL positivo e TIR maior que a taxa de atratividade (8%). O valor médio de *payback* nos municípios em que o investimento se mostrou viável foi de 1,25 anos para as cidades com população acima de 250.000 habitantes, 4,49 anos as cidades com população entre 150.000 e 250.000, 2,08 anos para as cidades com população entre 50.000 e 150.000 habitantes e de 7,97 anos para as cidades com população inferior a 50.000 habitantes.

Nota-se que em alguns casos de cidades de porte médio como Divinópolis, por exemplo, a implantação do sistema de recuperação energética não foi viável, apesar do elevado número de habitantes, devido ao baixo volume de esgoto tratado, cerca de 3% do volume total do

esgoto coletado. Por outro lado, em algumas cidades de pequeno porte como Almenara, por exemplo, que tratam 100% do esgoto coletado, o projeto se mostrou economicamente viável, já que apresentou VPL positivo e TIR maior que a taxa de atratividade.

Esta diferença entre os volumes de esgoto coletado e tratado ressaltam a necessidade de investimentos que o estado de Minas Gerais ainda precisa realizar para atender as metas impostas pelo Plano Nacional de Saneamento Básico. Nesse sentido, a recuperação energética do biogás em ETEs pode tornar estes investimentos mais atrativos.

Além disso, sob a ótica das Resoluções 482/2012 (ANEEL, 2012) e 687/2015 (ANEEL, 2015), o excedente de energia elétrica gerado nos grandes centros urbanos pode ser usado para compensar o consumo energético em outros municípios e sedes administrativas, permitindo que os projetos de recuperação energética do biogás em municípios de pequeno porte se tornem viáveis.

f) Análise geral de viabilidade econômica do ponto de vista do estado de Minas Gerais

A Tabela 5.5 mostra os resultados dos parâmetros da análise econômica de forma geral, do ponto de vista estado de Minas Gerais.

Tabela 5.5 – Resultados da análise econômica do ponto de vista do estado de MG

Custo total do investimento	R\$ 146.861.976,43
Custo evitado de energia elétrica	R\$ 1.916.007,12
VPL	R\$ 108.878.514,81
TIR	18,12%
<i>Payback</i>	2,61 anos

Fonte: Elaboração própria

Os resultados indicam que, sob a ótica estadual, a implantação dos sistemas de recuperação de metano no tratamento anaeróbio dos esgotos e na biodigestão do lodo remanescente nos municípios de concessão da COPASA se mostra economicamente viável, apresentando VPL positivo, TIR maior que a taxa mínima de atratividade, TMA (8%) e *payback* de aproximadamente dois anos e sete meses. Estes números positivos reforçam a atratividade do projeto e podem orientar políticas públicas estaduais no sentido de incentivar a exploração do biogás nas estações de tratamento de esgotos em MG.

## 5.6 Estimativa do potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) no estado de Minas Gerais

As estimativas de volume de metano recuperado no aproveitamento energético do biogás nas ETEs do estado de Minas Gerais foram realizadas considerando a metodologia de Lobato (2011). Os resultados dos cálculos do potencial de emissões evitadas devido à recuperação do metano nas ETEs e a não utilização da energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN), bem como o potencial total de geração de eletricidade a partir do biogás nas ETEs do estado de Minas Gerais são apresentados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Estimativa do potencial de redução de emissão de gases de efeito estufa (GEE) no estado de Minas Gerais

Total de metano recuperado por ano	11.636.093,32 kgCH <sub>4</sub> /ano
Total de energia elétrica gerada por ano	47. 142,33 MWh/ano
Emissões de GEE evitadas devido à recuperação de metano	325.810,61 tCO <sub>2</sub> eq/ano
Emissões de GEE evitadas devido à não utilização da energia elétrica do SIN	3.851,53 tCO <sub>2</sub> eq/ano
Total de emissões de GEE evitadas por ano	329.662,14 tCO <sub>2</sub> eq/ano

Fonte: Elaboração própria

O potencial de emissões de GEE evitadas do projeto corresponde a 0,03% da meta de redução estabelecida pela Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC) em 2009, um montante significativo tendo em vista que os cálculos consideram apenas o volume de esgoto tratado no estado de Minas Gerias.

Já o potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás nas ETEs do estado de Minas Gerais de cerca de 47.140 MWh/ano é maior que o total de energia consumido por ano no tratamento de esgotos pela companhia de saneamento, que conforme o SNIS (BRASIL, 2017) é próximo de 45.000 MWh/ano, o que revela a importância desta tecnologia tanto para o crescimento do saneamento básico quanto para a diversificação da matriz elétrica nacional.

## 6. Conclusões

As condições de saneamento básico no Brasil evoluíram bastante nos últimos vinte anos, porém, o país ainda enfrenta graves problemas no setor, principalmente no tocante as disparidades regionais relativas à coleta e tratamento de esgotos. No estado de Minas Gerais os dados do Diagnóstico de Serviços Água e Esgoto – 2015 (BRASIL, 2017) indicam que ainda há um percentual grande de municípios, cerca de 30%, que não tratam o esgoto coletado. Além disso, segundo relatório do Sistema Estadual de Informações sobre Saneamento (FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO, 2014), o percentual da população mineira sem coleta de esgotos estava em torno de 25%, em 2011. Neste contexto, o estudo de alternativas tecnológicas que incentivem a implantação de sistemas de tratamento de esgoto se torna fundamental para que o estado atinja as metas estabelecidas no Plano Nacional de Saneamento Básico.

Este estudo permitiu a análise da viabilidade econômica da implantação de um sistema de geração de energia elétrica a partir da recuperação do biogás produzido pela digestão anaeróbia de esgotos e lodo de esgotos nas ETEs do estado de Minas Gerais pertencentes à COPASA. Os resultados indicaram que este sistema é viável na maioria das cidades acima de 50.000 habitantes, sendo que 86% dos municípios com população entre 50.000 e 150.000, 67% dos municípios com população entre 150.000 e 250.000 e 100% dos municípios com população superior a 250.000 apresentaram VPL positivo e TIR maior que a taxa de mínima atratividade (8%). Nota-se que o percentual de cidades com população entre 150.000 e 250.000 não foi igual a 100% pelo fato da cidade de Divinópolis tratar apenas 3% do esgoto coletado, caso todo o esgoto coletado da cidade fosse tratado, os resultados de viabilidade seriam positivos. O tempo de retorno do investimento (*payback*) médio nos municípios em que o investimento se mostrou viável foi de 1,25 anos para as cidades com população superior a 250.000 habitantes, 4,49 anos as cidades com população entre 150.000 e 250.000, 2,08 anos para as cidades com população entre 50.000 e 150.000 habitantes e de 7,97 anos para as cidades com população inferior a 50.000 habitantes.

Verificou-se também, que os municípios com população acima de 150.000 apresentam altos valores de VPL e TIR, tornando este investimento altamente atraente, enquanto apenas 11% dos municípios com população inferior a 50.000 apresentaram resultados de viabilidade econômica positivos. Porém, esta disparidade pode ser atenuada no contexto das Resoluções 482/2012 (ANEEL, 2012) e 687/2015 (ANEEL, 2015), no qual o montante de energia produzida que exceder a demanda interna de uma ETE de grande porte poderá ser

compensado em outras estações de tratamento de água ou esgoto, ou ainda em sedes administrativas, promovendo uma economia de recursos que pode ser investido nas ETEs de menor porte.

Além disso, tendo em vista a grande quantidade de municípios de pequeno porte que ainda não possuem tratamento de esgoto em Minas Gerais, cabe ressaltar que a economia promovida pelo custo evitado de energia elétrica em uma ETE com recuperação energética do biogás também poderá viabilizar a implantação de novas ETEs nestes municípios carentes de tratamento de esgotos.

A comparação de metodologias para determinação do volume de metano produzido via tratamento anaeróbio realizada neste estudo permitiu observar o impacto dos parâmetros considerados nos resultados dos cálculos. Grande parte das metodologias disponíveis utilizam somente dados da população para os cálculos de produção de biogás, o que na maioria dos casos resulta em uma vazão de esgoto divergente da vazão real verificada pelas companhias de saneamento. Também foi possível averiguar que muitas das metodologias não consideram as perdas de metano que ocorrem durante o processo de digestão anaeróbia como as parcelas que ficam dissolvidas no efluente ou escapam no gás residual, a parcela convertida em lodo e a parcela de metano consumida na redução do sulfato. Estas perdas são significativas e, desta maneira, a omissão destes valores levam a resultados superestimados de produção de metano. A metodologia desenvolvida por Lobato (2011), além de permitir o uso de dados reais de vazão de esgoto tratado, também considera todas as perdas de metano ocorridas no processo anaeróbio de degradação da matéria orgânica, e por esta razão, foi utilizada nos cálculos de viabilidade econômica.

Além das perdas de metano no processo anaeróbio, também foram considerados nos cálculos os dados reais de vazão de esgotos tratados apresentados no relatório de Diagnóstico de Serviços Água e Esgoto - 2015 (BRASIL, 2017) e, portanto, pode-se concluir que este estudo utilizou dados conservadores de produção de biogás para a análise econômica da implantação do sistema de recuperação energética nas ETEs do estado. Desta maneira, é possível inferir que se analisarmos a viabilidade econômica considerando o volume de esgotos coletados, vários municípios que não apresentaram viabilidade de implantação do sistema poderão se tornar viáveis. Se forem considerados ainda, o volume de esgotos que nem sequer é coletado, a abrangência de municípios onde a exploração energética do biogás é economicamente viável poderá ser ainda maior.

Neste estudo foi possível identificar um potencial de geração de eletricidade a partir do aproveitamento energético do biogás nas ETEs do estado de Minas Gerais de cerca de 47.140 MWh por ano, o que corresponde a praticamente o total de energia consumida no tratamento de esgotos pela companhia de saneamento por ano. Além disso, o projeto se mostrou viável economicamente do ponto de vista do estado, já que os resultados da análise econômica mostram um VPL positivo, TIR maior que a taxa de atratividade (8%) e *payback* de aproximadamente dois anos e sete meses. Estes resultados indicam a relevância desta tecnologia, tanto como uma forma de viabilizar projetos de saneamento básico no estado, como também uma maneira de diversificar a matriz elétrica nacional.

Por fim, também foi possível identificar um potencial de redução de emissões de GEEs próximo de 325.800 tCO<sub>2</sub>eq/ano com a implantação do sistema de recuperação energética de metano nas ETEs de Minas Gerais. Este potencial corresponde a 0,03% da meta de redução estabelecida pela Política Nacional sobre a Mudança do Clima (PNMC; BRASIL, 2009) em 2009, um montante significativo tendo em vista que foram considerados apenas os volumes de esgotos tratados no estado de Minas Gerais, caso todo o volume de esgoto gerado fosse coletado e tratado, e ainda houvesse políticas de incentivo a implantação desta tecnologia em todas as ETEs do país, esse potencial seria ainda maior.

## **7. Sugestões para trabalhos futuros**

Sugere-se como trabalhos futuros realizar:

- A análise de sensibilidade das variáveis no cálculo de viabilidade econômica, a fim de se analisar diferentes cenários para a produção e tarifas de energia elétrica.
- Análises mais detalhadas de produção de biogás para cada município, considerando dados de medições locais, como informações de redução efetiva de DQO e produção real de lodo fresco e seco, em função dos processos de tratamento.
- Análises de viabilidade com diferentes tecnologias de conversão de energia, de modo a identificar qual alternativa seria mais adequada para o perfil de cada município.
- Pesquisa nos municípios onde não há tratamento de esgotos, para verificação da existência de um Plano Municipal de Saneamento, e qual destinação ambientalmente adequada seria mais eficiente para estes municípios.

## Referências Bibliográficas

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9648 - Estudo e concepção de sistemas de esgoto sanitário**. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ANDREOLI, C. V., VON SPERLING, M., FERNANDES, F. **Lodo de esgotos: tratamento e disposição final**. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, vol 6., 2ª Ed., Editora UFMG, Belo Horizonte, 2014.

ALÉM SOBRINHO, P. **Estudo dos fatores que influem nos processos de lodos ativado – determinação de parâmetros de projeto para esgotos predominantemente domésticos**. Revista DAE n.135, dezembro de 1983, p.58-78.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012**. In: Resoluções, 2012. Disponível em <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em 24/03/2017.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução Normativa Nº 687, de 24 de Novembro de 2015**. In: Resoluções, 2015. Disponível em <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em 24/03/2017.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS - ANP. **Resolução Nº 8, de 30/01/2015 – DOU 02/02/2015**. Estabelece a especificação do Biometano contida no Regulamento Técnico ANP nº 1/2015, parte integrante desta Resolução. Disponível em <http://www.anp.gov.br>. Acesso em 24/08/2016.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Resolução Nº 685, de 29/06/2017 - DOU 30/6/2017**. Estabelece as regras para aprovação do controle da qualidade e a especificação do biometano oriundo de aterros sanitários e de estações de tratamento de esgoto destinado ao uso veicular e às instalações residenciais, industriais e comerciais a ser comercializado em todo o território nacional. Disponível em <http://www.anp.gov.br>. Acesso em 27/10/2017.

ARNÒ. P., FIORE, S., VERDA V. **Assessment of anaerobic co-digestion in areas with heterogeneous waste production densities**. Energy, v. 122, P. 221-236, 2017.

BARNETO, A. G., CARMONA, J. A., ALFONSO, J. E. M., BLANCO, J. D. **Kinetic models based in biomass components for the combustion and pyrolysis of sewage sludge and its compost**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. v. 86, p. 108-114.

BARROS, R. M. **Energia de Biogás da Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Orgânicos e de Aterros Sanitários**. O Futuro da Energia, v. 1, p. 1-9, 2016.

BARROS, M. R.; FILHO, G. L. T. SILVA, T.R. **The electric energy potential of landfill biogás in Brazil**. Journal of Cleaner Production 65, p. 150-164, 2014.

BASRAWI, M. F. B., YAMADA, T., NAKANISHI, K., KATSUMATA, H. **Analysis of the performances of biogas-fuelled micro gas turbine cogeneration systems (MGT-CGSs) in middle- and small-scale sewage treatment plants: Comparison of performances and optimization of MGTs with various electrical power outputs**. Energy v. 38, p. 291-304, 2012.

BASRAWI, F., IBRAHIM, H., YAMADA, Y. **Optimal Unit Sizing of Biogas-Fuelled Micro Gas Turbine Cogeneration Systems in a Sewage Treatment Plant.** *Energy Procedia* v. 75, p.1052 – 1058, 2015.

BELLI FILHO, P.; CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; COSTA, R. H. R.; SOARES, S. R.; PERDOMO, C. C. **Tecnologias para o tratamento de dejetos de suínos.** *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, p.166-170, 2001.

BERNAL, A. P., SANTOS, I. F., SILVA, A. P. M., BARROS, R. M., RIBEIRO, E. M. **Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO<sub>2</sub> emissions.** *Journal of Cleaner Production*, v. 151, p. 260-271, 2017.

BIDART, C., FRÖHLING, M., SCHULTMANN, F. **Electricity and substitute natural gas generation from the conversion of wastewater treatment plant sludge.** *Applied Energy*, v. 113, p. 404–413, 2014.

BOUGRIER, C.; CARRÈRE, H.; BATTIMELLI, A.; DELGENÈS, J.P. **Combination of thermal treatments and anaerobic digestion to reduce sewage sludge quality and improve biogas yield.** *Process safety and environmental protection.* Institution of chemical engineers. Narbonne: France, 2006. Part B, p. 280-284.

BRASIL. **Portaria Interministerial N° 571, de 5 de dezembro de 2013.** Aprova o Plano Nacional de Saneamento Básico (PNSB). Brasília, 2013a.

BRASIL. **Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB).** Brasília, 2013b. Disponível em [http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/AECCBF8E2/Plansab\\_Versao\\_Consehos\\_Nacionais\\_020520131.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/processos/AECCBF8E2/Plansab_Versao_Consehos_Nacionais_020520131.pdf)

BRASIL. **Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007.** Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, 2007. [citado em 2017, mai. 26]. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm)

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF, *Diário Oficial da União*, 3 de agosto de 2010. 2010a.

BRASIL. **Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010.** Regulamenta os arts. 6o, 11 e 12 da Lei no 12.187, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC, *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, DF.2010b.

BRASIL. **Decreto nº 7.404, de 23 de dezembro de 2010.** Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Brasília, DF, *Diário Oficial da União*, 2010c.

BRASIL. **Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009.** Institui a política nacional sobre mudança do clima – PNMC. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental – SNSA. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2015.** Brasília: SNSA/MCIDADES, 2017. 212 p.: il.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Probiogás. Guia técnico de aproveitamento energético de biogás em estações de tratamento de esgoto / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ).** Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015a.

BRASIL. **Intended Nationally Determined Contribution Towards Achieving the Objective of the United Nations Framework Convention on Climate Change.** 6p, 2015b. Disponível em UNITED NATIONS. Framework Convention on Climate Change: adoption of the Paris agreement - FCCC/CP/2015/L.9/Rev.1. UNFCCC. 12 de dezembro de 2015. [http://unfccc.int/files/bodies/awg/application/pdf/draft\\_paris\\_agreement\\_5dec15.pdf](http://unfccc.int/files/bodies/awg/application/pdf/draft_paris_agreement_5dec15.pdf). Acessado em 08 /12/ 2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Tecnologias de digestão anaeróbia com relevância para o Brasil: substratos, digestores e uso de biogás. / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ).** Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2015c.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Probiogás. Biometano como combustível veicular / Probiogás; organizadores, Ministério das Cidades, Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH (GIZ); autor, Uwe Becher.** - Brasília, DF: Ministério das Cidades, 2016.

BRIZI, F. **Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: comparison between natural gas and biogas.** São Paulo: Università degli Studi di Perugia and USP, 2002.

BUSATO, R. **Desempenho de um filtro anaeróbio de fluxo ascendente como tratamento de efluente de reator UASB - Estudo de caso da ETE de Imbituva.** 2004. 214 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

CAIXA. **Plano “Saneamento para Todos”.** Disponível em: <[http://www1.caixa.gov.br/gov/gov\\_social/municipal/assistencia\\_tecnica/produtos/financiamento/saneamento\\_para\\_todos/sai\\_ba\\_mais.asp](http://www1.caixa.gov.br/gov/gov_social/municipal/assistencia_tecnica/produtos/financiamento/saneamento_para_todos/sai_ba_mais.asp)>. Acessado em: 17/12/2016.

CARLSSON, M., LAGERKVIST, A., MORGAN-SAGASTUME, F. **Energy balance performance of municipal wastewater treatment systems considering sludge anaerobic biodegradability and biogas utilisation routes.** Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 4, p. 4680–4689, 2016.

CARROSIO, F. **Energy production from biogas in the Italian countryside: policies and organizational models.** Energy Policy 63, 3 e 9, 2013.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITTKE, B. H. **Análise de Investimentos.** São Paulo: Editora Atlas S/A, 1994.

CETESB.– COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Manual do Usuário do programa de computador Biogás, geração e uso energético, Efluente e Resíduo Rural.** Governo do Estado de São Paulo, Secretaria de Estado do Meio Ambiente. São Paulo, 2006

CHERNICHARO, C.A.L. **Pós-tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios.** Programa de Pesquisa em Saneamento Básico (PROSAB), Belo Horizonte, 2001.

CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores Anaeróbios.** Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, Vol 5., 2ª Ed., Editora UFMG, Belo Horizonte, 2007

CHOU, H. H.; HUANG, J. S. **Comparative granule characteristics and biokinetics of sucrose-fed and phenol-fed UASB reactors.** Chemosphere, v.59, n.1, p.107-116, 2005.

COELHO, S.T.; VELÁZQUEZ, S.M.S.G.; SILVA, O.C. **Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto.** In: Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural – AGRENER-GD, 6, 2006, Campinas. Políticas Públicas para a Energia: Desafios para o próximo quadriênio. Campinas: UNICAMP, 2006.

CONESTOGA-ROVERS & ASSOCIATES. **Guidance Document for Landfill Gas Management.** Waste Treatment Division, Hazardous Waste Branch. Environment Canada, Ottawa, 1996.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA. **Resolução N° 375, de 29 de agosto de 2006, DOU em 30/08/2006.** Define critérios e procedimentos, para o uso agrícola de lodos de esgoto gerados em estações de tratamento de esgoto sanitário e seus produtos derivados, e dá outras providências. Disponível em. <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res06/res37506.pdf>. Acesso em 26 de outubro de 2017.

COSTA, D.F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto.** 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

DILLON. L.B. **Anaerobic Digestion of Sewage Sludge.** Sustainable Sanitation and Water Management, 2015.

ERIKSSON, O., BISAILLON, M., HARALDSSON, M., SUNDBERG, J. **Enhancement of biogas production from food waste and sewage sludge - Environmental and economic life cycle performance.** Journal of Environmental Management, v. 175, p 33-39, 2016.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço energético nacional 2017: ano base 2016.** Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME/EPE, 2017.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2019.** Ministério de Minas e Energia. Brasília: MME/EPE, 2010.

FABBRI, C.L., et al. **Biogas, il settore \_strutturato e continua a crescere.** L'informatore Agrar. 11, 11 e 16, 2013

FELCA. A.T.A. **Análise do Potencial Energético Proveniente do Lodo de Esgoto Produzido pelas Estações de Tratamento do Sul de Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2016.

FERNÁNDEZ-ARÉVALO, T., LIZARRALDE, I., FDZ-POLANCO, F., PÉREZ-ELVIRA, S.I., GARRIDO, J.M., PUIG, S., POCH, M., GRAU, P., AYESA, E. **Quantitative assessment of energy and resource recovery in wastewater treatment plants based on plant-wide simulations**, Water Research, 2017.

FINE, P., HADAS, E. **Options to reduce greenhouse gas emissions during wastewater treatment for agricultural use**. Science of the Total Environment, v. 416, p. 289–299, 2012.

FRANÇA, M. **Avaliação da biodegradabilidade e da biodisponibilidade do lodo de esgoto anaeróbio termohidrolisado pelo uso de biogás**. 2002. 154 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2002.

FUNDAÇÃO JOÃO PINHEIRO. Diretoria de Estatística e Informações. Saneamento Básico de Minas Gerais – 2014 / Fundação João Pinheiro. Diretoria de Estatística e Informações – Belo Horizonte, 2017. **Sistema Estadual de Informações Sobre Saneamento (Seis)**. 80p. Disponível em: <http://www.fjp.mg.gov.br/index.php/docman/cei/seis/730-sistema-estadual-de-informacoes-sobre-saneamento-2014-31-08-2017-site/file> Acesso em 17 de março de 2017.

GLÓRIA, R. M.; NETO G. P. P.; SOUZA C. L.; SILVA S. Q.; AQUINO S. F.; CHERNICHARO, C.A.L. **Remoção de sulfeto de hidrogênio de efluente de reator UASB: contribuição da camada de espuma e da tubulação de descarte**. In: IX Taller y Simposio Digestión Anaerobia, Anais... Ilha de Páscoa, 2008.

GODOY JÚNIOR, E.; SILVEIRA, J.L.; GIACAGLIA, G.E.O. **Miniestação de tratamento de esgoto e reuso de águas associada a sistema de cogeração energética no aproveitamento do biogás produzido**. In: Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 4, Natal, 2004.

GODOY JÚNIOR, E. **Sistema de armazenamento e aproveitamento energético de GNPB (Gás Natural a Baixa Pressão) e de biogás de esgoto**. In: Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental - SILUBESA, 12, 2006.

GUARDABASSI, P.; PIRES, R.G. **Auto geração de energia elétrica em condomínios residenciais utilizando biogás de esgoto/gás natural**, In: FERRER, J.T.V. (Ed.). *Biogás: Projetos e pesquisas no Brasil*. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2006.

GUENTHER-LÜBBERS, W., BERGMANN, H., THEUVSEN, L. **Potential analysis of the biogas production e as measured by effects of added value and employment**. Journal of Cleaner Production, v. 129, p. 556-564, 2016.

HOSSAIN, M. K., STREZOV, V., NELSON, P. F. **Thermal characterisation of the products of wastewater sludge pyrolysis**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. v. 85, p.442-446, 2009.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Renda domiciliar per capita 2015**. Brasília, 2016. Disponível em [ftp://ftp.ibge.gov.br/Trabalho\\_e\\_Rendimento/Pesquisa\\_Nacional\\_por\\_Amostra\\_de\\_Domicilio](ftp://ftp.ibge.gov.br/Trabalho_e_Rendimento/Pesquisa_Nacional_por_Amostra_de_Domicilio)

s\_continua/Renda\_domiciliar\_per\_capita/Renda\_domiciliar\_per\_capita\_2015\_20160420.pdf. Acessado em 20 de maio de 2017.

IN. Portal Investimentos e Notícias. Disponível em <http://www.investimentosenoticias.com.br/noticias/negocios/probiogas-ealternativa-eficaz-para-produzir-energia>. Acessado: 23/09/2015.

IPCC. INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Directrices del IPCC para los inventários nacionales de gases de efecto invernadero**, versión revisada em 1996. Reino Unido: IPCC WGI Technical Support Unit, 1997.

IPCC – INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Waste. In: **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme**. EGGLESTON, H.S.; BUENDIA, L.; MWA, K.; NGARA, T.; TANABE, K. (eds.). V.5, Chapter 6, IGES, Japan, 2006.

IPCC – INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2014: Synthesis Report**. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland, 2014.

JOHANSSON, T.B.; KELLY, H.; REDDY, A.K.N.; WILLIAMS, R.H. **Renawable energy sources for fuels and electricity**. Washington: Island Press, 1993.

JORDÃO, E. P.; PESSOA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. Rio de Janeiro: ABES, 4. ed., 932p, 2005.

KERSTENS, S.M., LEUSBROCK, I., ZEEMAN, G. **Feasibility analysis of wastewater and solidwaste systems for application in Indonesia**. Science of the Total Environment, v. 530–531, p. 53–65, 2015.

LAMAS, W.Q. **Análise termoeconômica aplicada a uma mini-estação de tratamento de esgoto com auto-suficiência energética**. 2007. 135 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

LARSSON, M., JANSSON, M., GRONKVIST, S., ALVFORS, P. **Techno-economic assessment of anaerobic digestion in a typical Kraft pulp mill to produce biomethane for the road transport sector**. Journal of Cleaner Production, v. 104, p. 460-467, 2015.

LEE, S., ESFAHANI, I., J., IFAEI, P., MOYA, W., YOO, C. **Thermo-environ-economic modeling and optimization of an integrated wastewater treatment plant with a combined heat and power generation system**. Energy Conversion and Management, v. 142 p. 385–402, 2017.

LIMA, F.P. **Energia no tratamento de esgotos: análise tecnológica e institucional para a conservação de energia e o uso do biogás**. 2005. 139 f. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

LIN, Y., GUO, M., SHAH, N., STUCKEY, D. C. **Economic and environmental evaluation of nitrogen removal and recovery methods from wastewater**. Bioresource Technology, v. 215, p. 227–238, 2016.

LOBATO, L.C.S.; CHERNICHARO, C.A.L.; SOUZA, C.L. **Estimates of methane loss and energy recovery potential in anaerobic reactors treating domestic wastewater.** *Water science & Technology*, V. 66, n.12 p. 2745-2753, 2012.

LOURENÇO, A. P. M.; CAMPOS, C. M. M. **Hydrodynamic behavior of a lab-scale upflow anaerobic sludge blanket reactor (UASB) operated with an adopted hydraulic retention time (HRT) of 12 hours.** *Revista Ciência e Agrotecnologia*, Lavras, v.33, n.4, p.1139-1144, 2009.

LUDUVICE, M. **Processos de estabilização de lodos.** In: *Lodos de Esgotos – Tratamento e Disposição Final*. Rio de Janeiro: ABES, 2001. 484p.

MARAGKAKI, A. E., FOUNTOULAKIS, M., KYRIAKOU, A., LASARIDI, K., MANIOS, T. **Boosting biogas production from sewage sludge by adding small amount of agro-industrial by-products and food waste residues.** *Waste Management*, 2017.

MARTINS, O.S.; GUARDABASSI, P.; COSTA, D.F. **Produção de energia elétrica a partir do biogás resultante do tratamento de esgoto: projeto piloto na ETE de Barueri na Grande São Paulo**, In: FERRER, J.T.V. (Ed.). *Biogás: Projetos e pesquisas no Brasil*. Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2006. p. 139-147.

MENESES-JÁCOME, A., DIAZ-CHAVEZ, R., VELÁSQUEZ-ARREDONDO, H. I., CÁRDENAS-CHÁVEZ, D. L., PARRA, R., RUIZ-COLORADO, A. A. **Sustainable Energy from agro-industrial wastewaters in Latin-America.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 56, p. 1249–1262, 2016.

METCALF & EDDY Inc. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse.** 4th edition, McGraw Hill, New York, 2003.

MINISTÉRIO DAS CIDADES - MCID. **Instrução Normativa nº 39**, de 24 de Outubro. Brasília, DOU de 25/10/2012 (nº 207, Seção 1, pg.84), 2012

MINITÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – MCTI. **Estimativas Anuais de Emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil.** 2ª edição, Brasília, 2014.

MINITÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO – MCTI. **Arquivo dos fatores de emissão.** Disponível em <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html>> Acessado em 27/04/2017.

MOREDA, I. L. **The potential of biogás production in Uruguay.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* v. 54, p.1580–1591, 2016.

MOREIRA, H. PROBIOGÁS. **Iniciativas para o aproveitamento energético do biogás em ETEs.** 5º Encontro Brasileiro das Aguas, São Paulo, 2014.

MOHAMMED, M., EGYIR, I.S., DONKOR, A.K., AMOAH, P., NYARKO, S., BOATENG, K.K., ZIWU, C. **Feasibility study for biogas integration into waste treatment plants in Ghana.** *Egyptian Journal of Petroleum*, 2016.

MONI SILVA. A.P.M. **Lodo de Leito de Secagem: Avaliação do Ciclo de Vida e Aproveitamento Energético.** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2016.

MOREIRA, H. C.; VALENTE, V. B. **Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto: status quo na Alemanha e no Brasil.** In: Fricke, K.; Pereira, C.; Leite, A.; Bagnati, M. *Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos - transferência de experiência entre Alemanha e o Brasil.* Braunschweig: Technische Universität Braunschweig, Alemanha, p.722, 2015.

NOYOLA, A.; MORGAN-SAGASTUME, J. M.; LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. E. **Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: odour control and energy/resource recovery.** *Reviews in Environmental Sciences and Bio/Technology*, v.5, n.1, p.93-114, 2006.

NUVOLARI, A. **Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reuso agrícola.** 2ª Ed., São Paulo, Editora Bluncher, 2011.

PEDROZA, M.N.; VIEIRA, G.E.G.; SOUSA, J.F.; PICKLER, A.C.; LEAL, E.R.M.; MILHOMEN, C.C. **Produção e tratamento de lodo de esgoto – uma revisão.** *Revista Liberato*, v.11, n. 16, p.89-xx. Novo Hamburgo, 2010.

PIEROTTI, S. M. **Avaliação da partida do reator anaeróbio de manta de lodo (UASB), em escala real, sob condições hidráulicas desfavoráveis.** Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia da Universidade de Sao Paulo, 2007.

POSADAS, E., MUÑOZ. R., GUIEYSSE, B. **Integrating nutrient removal and solid management restricts the feasibility of algal biofuel generation via wastewater treatment.** *Algal Research*, v. 22, p. 39–46, 2017.

QASIN, S.R. **Wastewater Treatment Plants – Planning, design and operation.** 2ed. Landcaster, Pennsylvania, USA Technomic Publishing Company, 1999.

RAHDE, S.B. **Motores de Combustão Interna.** Departamento de Engenharia Mecânica PUC/PR. Curitiba, 2006.

RATANATAMSKUL, C., ONNUM, G., YAMAMOTO, K. **A prototype single-stage anaerobic digester for co-digestion of food waste and sewage sludge from high-rise building for on-site biogas production.** *International Biodeterioration & Biodegradation* v. 95, p. 176-180, 2014.

RIBEIRO, E. M., BARROS, R. M., FILHO, G. L. T., SANTOS, I. F. S., SAMPAIO, L. C., SANTOS, T. V., SILVA, F. G. B., SILVA, A. P. M., FREITAS, J. V. R. **Power generation potential in posture aviaries in Brazil in the context of a circular economy.** *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 18, p. 153-163, 2016.

ROTUNNO, P., LANZINI, A., LEONE, P. **Energy and economic analysis of a water scrubbing based biogás upgrading process for biomethane injection into the gas grid or use as transportation fuel.** *Renewable Energy*, v. 102, p. 417-432, 2017.

SANTOS, I. F. S., VIEIRA, N. D. B., BARROS, R. M., FILHO, G. L. T. **Economic and CO2 avoided emissions analysis of WWTP biogas recovery and its use in a small power plant in Brazil.** *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, v. 17, p. 77–84, 2016a.

SANTOS, I. F.; BARROS, M. R.; FILHO, G. L. T. **Electricity generation from biogás of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential.** Journal of Cleaner Production 126, p. 504-514, 2016b.

SANTOS, P. **Valorização energética de lamas de ETARs Municipais: Digestão anaeróbia e cogeração com biogás.** Lisboa: Centro para a Conservação de Energia - CCE, 2000.

SILVA, T. R.; BARROS, R. M.; TIAGO FILHO, G. L.; SANTOS, I. F. S. **Methodology for the determination of optimum power of a Thermal Power Plant (TPP) by biogas from sanitary landfill,** In Waste Management, Volume 65, 2017, Pages 75-91, ISSN 0956-053X.

SHANE, A., GHEEWALA, S. H., KAFWEMBE, K. **Urban commercial biogas power plant model for Zambian towns.** Renewable Energy, v. 103, 1-14, 2017.

SINGH, K. S.; VIRARAGHAVAN, T. **Start-up and Operation of UASB Reactors at 20° C for Municipal Wastewater Treatment.** Journal of Fermentation and Bioengineering, v. 85, n. 6, p. 609-614, 1998

SKOVSGAARD, L., JACOBSEN, H. K. **Economies of scale in biogas production and the significance of flexible regulation.** Energy Policy, v. 101, p. 77–89, 2017.

SOUZA, C.L. **Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto doméstico em reatores UASB.** 2010. 127 p. Tese (Doutorado em Saneamento) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SOUZA, C. L. & CHERNICHARO, C. A. L. **Methane losses in UASB reactors treating domestic wastewater: Mass balance and possible improvements.** In: 10th Specialized Conference on Small Water and Wastewater Treatment Systems. IWA Specialist Conference. Venice, Italy, 2011a.

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

SOUZA, Z. **Elementos de Máquinas Térmicas.** Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Editora Campus Ltda, Rio de Janeiro, 1980.

STOICA, A., SANDBERG, M., HOLBY, O. **Energy use and recovery strategies within wastewater treatment and sludge handling at pulp and paper mills.** Bioresource Technology, v. 100, p. 3497–3505, 2009.

UNFCCC – UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Approved Methodologies for small scale CDM project activities. Type III. AMS-III-H. Methane recovery in wastewater treatment (version 16.0),** in Clean Development Mechanism – CDM Methodology – Booklet (2013).

VERONEZ, R. G., ORRA, A. A.; RIBEIRO, R.; ZAIAT, M.; RATUSZNEI, S. M.; RODRIGUEZ, J. A. D. **A simplified analysis of granule behavior in ASBR and UASN reactors treating low-strength synthetic wastewater.** Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.22, n.3, p.361-369, 2005

VLYSSIDES, A.; BARAMPOUTI, E.M.; MAI, S. **Determination of granule size in a UASB reactor.** Journal of Environmental Management, v.86, n.4, p.660-664, 2008.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto.** Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, Vol 1., 4ª Ed., Editora UFMG, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2014.

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

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos.** Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, Vol 2., Editora UFMG, Belo Horizonte, Editora UFMG, 1996.

VON SPERLING, M. CHERNICHARO, C. A. L. **Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions.** Publicado por IWA Publishing, Londres, Reino Unido. 2005.

WATANABE, K., KOYAMA, M., UEDA, J., BAN, S., KUROSAWA, N., TODA, T. **Effect of operating temperature on anaerobic digestion of the Brazilian waterweed Egeria densa and its microbial community.** Anaerobe, v. 47, p. 8-17, 2017.

WORLD BANK /ESMAP. **Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe.** Conestoga Rovers & Associates (org.). Banco Mundial: Waterloo, Ontario, Canadá.

YETILMEZSOY, K.; SAKAR, S. **Development of empirical models for performance evaluation of UASB reactors treating poultry manure wastewater under different operational conditions.** Journal of Hazard Materials, v.153, n.1-2, p.532-543, 2008.

ZHAO, C. **Effect of Temperature on Biogas Production in Anaerobic Treatment of Domestic Wastewater UASB System in Hammarby Sjostadsverk.** Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2011.

## Anexo A – Resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido no tratamento anaeróbio de esgotos

### a) Municípios com população menor que 50.000 habitantes

Tabela A.1 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)			
		Método DQO convertida em metano Lobato (2011)	Método IPCC (2006)	Método CETESB (2006)	Método UNFCCC (2013)
Águas Vermelhas	3.646	1.552,08	6.597,92	5.170,94	6.950,42
Além Paraíba	20.372	15.082,38	36.860,88	28.892,61	67.541,02
Almenara	28.862	16.493,61	52.226,34	40.933,56	73.860,72
Araçuaí	12.846	7.602,51	23.244,88	18.218,85	34.045,09
Arceburgo	8.284	5.120,03	14.989,76	11.748,79	22.928,23
Ataléia	3.306	466,01	5.983,36	4.688,74	2.086,84
Barbacena	37.117	8.211,12	67.173,91	52.641,22	36.770,54
Bom Despacho	41.370	23.015,63	74.860,29	58.673,04	103.067,22
Bom Repouso	5.435	2.847,87	9.834,94	7.708,19	12.753,18
Bonfim	2.236	1.741,97	4.045,73	3.171,21	7.800,81
Borda da Mata	12.356	5.875,36	22.359,33	17.523,91	26.310,71
Botelhos	7.931	4.769,47	14.351,11	11.248,15	21.358,34
Brasília de Minas	15.536	7.524,37	28.113,73	22.033,95	33.695,20
Brumadinho	15.780	4.245,74	28.557,88	22.380,00	19.013,03
Bueno Brandão	5.388	2.790,74	9.749,91	7.641,54	12.497,34
Buenópolis	3.979	2.137,04	7.200,18	5.643,22	9.569,98
Buritis	4.780	2.834,07	8.649,42	6.779,24	12.691,36
Cabo Verde	7.011	3.706,60	12.686,77	9.943,36	16.598,67
Caldas	5.353	3.331,36	9.686,15	7.591,90	14.918,28
Camanducaia	11.676	8.525,26	21.126,52	16.559,50	38.177,33
Cambuquira	8.443	1.364,38	15.280,43	11.974,29	6.109,90
Campanha	12.246	5.895,19	22.160,22	17.367,90	26.399,50
Campina Verde	12.949	8.301,44	23.430,77	18.364,93	37.175,02
Campo Florido	5.610	3.560,91	10.151,13	7.956,39	15.946,24
Capelinha	18.865	9.637,18	34.137,46	26.755,30	43.156,67
Capetinga	458	241,30	828,78	649,56	1.080,58

Tabela A.1 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)			
		Método DQO convertida em metano Lobato (2011)	Método IPCC (2006)	Método CETESB (2006)	Método UNFCCC (2013)
Capim Branco	708	289,33	1.281,23	1.004,12	1.295,64
Capitão Enéas	3.354	1.313,27	6.069,59	4.756,81	5.881,02
Carbonita	5.077	1.906,76	9.187,69	7.200,46	8.538,73
Carlos Chagas	9.520	5.198,90	17.226,81	13.501,75	23.281,41
Carmo da Cachoeira	7.805	3.864,63	14.123,76	11.069,45	17.306,34
Carmo do Paranaíba	22.950	14.354,51	41.527,51	32.548,86	64.281,53
Carmo do Rio Claro	13.089	8.259,14	23.684,20	18.563,49	36.985,61
Carneirinho	6.086	3.879,02	11.012,43	8.631,48	17.370,79
Carvalhos	1.548	936,86	2.801,10	2.195,45	4.195,38
Conceição da Barra de Minas	1.526	692,03	2.761,46	2.164,25	3.099,01
Cataguases	45.657	29.775,27	82.614,39	64.753,08	133.337,85
Catuti	658	291,97	1.190,73	933,21	1.307,48
Caxambu	18.806	10.758,65	34.029,81	26.671,63	48.178,76
Centralina	2.057	1.145,85	3.722,20	2.917,34	5.131,26
Claro dos Poções	1.905	896,17	3.447,28	2.701,77	4.013,20
Cláudio	20.686	10.514,27	37.432,72	29.337,94	47.084,37
Conceição do Mato Dentro	8.608	4.636,70	15.576,56	12.208,30	20.763,79
Conceição do Pará	1.685	1.190,79	3.048,86	2.389,75	5.332,51
Congonhal	8.136	4.065,69	14.722,70	11.538,89	18.206,71
Congonhas	33.859	19.346,77	61.268,51	48.020,56	86.637,58
Coração de Jesus	4.254	2.305,79	7.697,79	6.033,24	10.325,66
Cordisburgo	2.611	1.164,06	4.724,91	3.703,05	5.212,82
Corinto	13.317	7.530,98	24.097,43	18.886,85	33.724,80
Coronel Murta	3.245	1.767,53	5.871,96	4.602,22	7.915,25
Cristália	818	406,97	1.480,23	1.160,13	1.822,45
Cruzília	12.126	5.980,37	21.942,96	17.197,71	26.780,96
Desterro do Melo	1.186	662,36	2.146,10	1.682,05	2.966,16
Diamantina	26.399	15.168,00	47.769,43	37.440,41	67.924,45
Divino	8.326	4.486,31	15.066,27	11.808,36	20.090,32
Divisópolis	2.615	882,81	4.732,36	3.708,73	3.953,35

Tabela A.1 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)			
		Método DQO convertida em metano Lobato (2011)	Método IPCC (2006)	Método CETESB (2006)	Método UNFCCC (2013)
Dores do Indaiá	10.717	6.375,15	19.392,42	15.199,40	28.548,81
Engenheiro Navarro	2.502	1.209,73	4.527,59	3.548,46	5.417,36
Esmeraldas	8.422	4.687,22	15.239,87	11.944,51	20.990,03
Estrela do Indaiá	1.335	72,70	2.416,24	1.893,36	325,55
Estrela do Sul	2.847	1.685,58	5.151,66	4.037,76	7.548,26
Extrema	22.186	7.513,36	40.149,96	31.465,32	33.645,88
Fama	772	716,41	1.396,74	1.094,89	3.208,19
Francisco Dumont	735	338,08	1.330,06	1.042,41	1.513,99
Fronteira	12.118	6.886,39	21.927,78	17.186,36	30.838,22
Frutal	43.704	29.710,21	79.079,59	61.983,24	133.046,50
Funilândia	1.088	392,87	1.968,93	1.543,06	1.759,31
Glaucilândia	618	311,80	1.118,31	876,48	1.396,27
Gonçalves	810	682,19	1.465,54	1.148,78	3.054,95
Grão Mogol	2.730	1.329,72	4.940,16	3.871,83	5.954,69
Guaraciaba	2.790	1.152,75	5.048,90	3.956,92	5.162,17
Guarda-Mor	3.251	2.046,57	5.882,60	4.610,73	9.164,85
Guaxupé	43.328	27.654,24	78.400,62	61.449,98	123.839,56
Ibiaí	1.947	888,54	3.523,31	2.761,33	3.979,00
Icaraí de Minas	1.111	540,61	2.010,45	1.575,68	2.420,94
Igarapé	17.483	11.430,12	31.634,72	24.795,28	51.185,69
Indaiabira	856	392,13	1.549,02	1.214,02	1.756,02
Inhapim	6.260	3.701,31	11.327,49	8.878,25	16.574,99
Ipuiúna	5.622	3.027,20	10.173,26	7.973,41	13.556,21
Itabirinha	5.407	2.745,51	9.784,33	7.668,48	12.294,77
Itacarambi	4.176	2.029,83	7.556,83	5.922,62	9.089,87
Itamarandiba	15.197	6.808,40	27.500,70	21.553,16	30.488,99
Itaobim	7.030	4.024,86	12.720,91	9.970,30	18.023,87
Itapecerica	11.885	6.011,66	21.506,74	16.855,91	26.921,04
Itapeva	4.413	2.724,07	7.985,25	6.258,74	12.198,75
Iturama	30.708	17.954,93	55.566,40	43.551,65	80.404,69
Jaboticatubas	8.098	765,17	14.656,45	11.485,00	3.426,54
Jacinto	4.510	2.435,62	8.161,04	6.396,31	10.907,06
Jaíba	4.695	2.563,54	8.495,78	6.658,69	11.479,90
Janaúba	15.997	8.515,72	28.947,36	22.687,76	38.134,58
Januária	7.951	4.824,69	14.387,27	11.276,51	21.605,63
Jequitinhonha	11.822	5.844,52	21.392,84	16.766,56	26.172,60

Tabela A.1 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)			
		Método DQO convertida em metano Lobato (2011)	Método IPCC (2006)	Método CETESB (2006)	Método UNFCCC (2013)
Joáima	7.721	3.157,76	13.972,26	10.950,32	14.140,90
João Pinheiro	30.268	17.325,31	54.770,51	42.927,62	77.585,19
Juatuba	7.478	1.762,54	13.533,51	10.605,68	7.892,88
Juramento	1.621	755,62	2.933,36	2.298,98	3.383,79
Juvenília	82	27,76	148,40	116,30	124,30
Lagoa dos Patos	1.740	792,63	3.148,72	2.467,76	3.549,53
Lagoa Santa	22.924	19.066,99	41.476,83	32.511,98	85.384,69
Leandro Ferreira	1.764	1.139,38	3.191,89	2.501,79	5.102,32
Limeira do Oeste	3.972	2.292,87	7.187,39	5.633,29	10.267,79
Lontra	686	226,91	1.241,46	972,92	1.016,12
Malacacheta	8.720	2.867,26	15.780,63	12.367,15	12.840,00
Manga	223	45,23	403,59	316,27	202,57
Martinho Campos	5.424	3.390,69	9.814,61	7.692,59	15.183,99
Mata Verde	6.809	2.470,14	12.322,11	9.656,87	11.061,61
Mateus Leme	11.642	8.346,38	21.065,12	16.511,28	37.376,27
Matozinhos	21.397	8.728,97	38.720,97	30.346,32	39.089,54
Medina	12.563	5.781,37	22.734,06	17.817,49	25.889,79
Minas Novas	5.717	1.918,21	10.346,06	8.108,14	8.590,03
Mirabela	3.384	1.551,64	6.123,71	4.799,36	6.948,45
Montalvânia	273	149,95	494,00	387,18	671,50
Monte Azul	205	43,77	371,01	290,74	195,99
Monte São	16.912	11.515,01	30.601,17	23.985,46	51.565,84
Morada Nova de Minas	2.145	597,60	3.881,90	3.042,15	2.676,12
Mutum	6.809	3.976,10	12.320,95	9.656,87	17.805,52
Nanuque	26.432	171,25	47.840,69	37.487,21	766,86
Natércia	2.155	1.358,21	3.899,42	3.056,33	6.082,28
Nova Lima	16.483	13.159,17	29.823,43	23.377,03	58.928,63
Nova Módica	1.664	952,87	3.011,04	2.359,97	4.267,06
Nova Porteirinha	1.893	931,13	3.425,54	2.684,75	4.169,73
Novo Cruzeiro	6.383	2.683,38	11.550,90	9.052,70	12.016,57
Ouro Branco	31.636	12.338,05	57.250,36	44.867,79	55.251,51
Passabém	368	221,62	665,89	521,92	992,45
Pedra Azul	16.756	7.205,82	30.322,12	23.764,21	32.268,68
Pedralva	4.836	2.582,19	8.750,97	6.858,66	11.563,43
Pedro Leopoldo	31.482	1.918,65	56.979,63	44.649,38	8.592,00

Tabela A.1 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)			
		Método DQO convertida em metano Lobato (2011)	Método IPCC (2006)	Método CETESB (2006)	Método UNFCCC (2013)
Perdões	15.367	8.677,56	27.806,96	21.794,26	38.859,35
Pirapetinga	7.329	4.532,72	13.261,70	10.394,36	20.298,15
Porteirinha	6.439	3.888,56	11.651,33	9.132,12	17.413,54
Poté	5.471	2.424,46	9.900,42	7.759,25	10.857,07
Prados	5.863	2.526,53	10.609,84	8.315,21	11.314,16
Presidente Bernardes	1.429	756,06	2.585,85	2.026,68	3.385,77
Prudente de Moraes	3.153	1.553,11	5.705,61	4.471,75	6.955,02
Raposos	11.395	6.367,51	20.619,58	16.160,97	28.514,62
Resplendor	8.366	5.038,23	15.138,24	11.865,09	22.561,90
Riacho dos Machados	2.449	1.202,54	4.431,66	3.473,30	5.385,13
Rio Casca	8.060	4.381,15	14.584,90	11.431,10	19.619,42
Rio Pardo de Minas	3.046	1.376,87	5.512,08	4.319,99	6.165,80
Salinas	23.209	12.502,98	41.997,72	32.916,19	55.990,09
Santa Maria do Suaçuí	6.445	3.236,19	11.662,69	9.140,63	14.492,10
Santana da Vargem	5.266	2.571,03	9.529,26	7.468,51	11.513,44
Santana do Paraíso	29.269	15.569,68	52.963,71	41.510,79	69.723,22
Santa Rita de Caldas	4.384	2.761,08	7.932,74	6.217,61	12.364,49
Santa Rita do Sapucaí	32.332	18.750,94	58.505,16	45.854,89	83.969,35
Santo Antônio do Monte	21.844	12.174,00	39.527,37	30.980,27	54.516,87
Santo Antônio do Retiro	1.378	699,37	2.493,59	1.954,35	3.131,90
Santos Dumont	25.842	13.904,22	46.762,26	36.650,44	62.265,06
São Francisco	15.807	7.957,33	28.603,90	22.418,29	35.634,06
São Gonçalo do Abaeté	3.239	1.789,56	5.861,08	4.593,71	8.013,90
São Gotardo	27.568	266,41	49.896,73	39.098,34	1.193,04
São João da Ponte	1.064	539,00	1.925,38	1.509,02	2.413,71
São João del Rei	9.229	5.104,91	16.700,18	13.089,04	22.860,49
São João do	4.378	1.817,76	7.922,60	6.209,10	8.140,17

Tabela A.1 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)			
		Método DQO convertida em metano Lobato (2011)	Método IPCC (2006)	Método CETESB (2006)	Método UNFCCC (2013)
Manhuaçu					
São João do Paraíso	5.305	2.462,65	9.599,94	7.523,82	11.028,07
São Joaquim de Bicas	7.823	644,45	14.158,81	11.094,98	2.885,92
São José da Lapa	10.926	7.242,69	19.770,04	15.495,81	32.433,76
São José do Jacuri	1.616	887,36	2.924,21	2.291,89	3.973,74
São Roque de Minas	3.634	2.582,93	6.575,40	5.153,92	11.566,72
São Sebastião do Maranhão	1.922	946,70	3.478,01	2.725,88	4.239,44
São Tiago	5.267	2.617,15	9.531,04	7.469,93	11.719,96
Sapucaí-Mirim	3.383	1.871,07	6.121,65	4.797,94	8.378,91
Sarzedo	23.633	979,15	42.773,99	33.517,52	4.384,79
Serra Azul de Minas	1.129	600,39	2.042,98	1.601,21	2.688,62
Serra da Saudade	439	315,61	794,33	622,61	1.413,37
Serra dos Aimorés	2.652	1.273,77	4.799,03	3.761,20	5.704,11
Serro	7.520	4.062,16	13.607,77	10.665,25	18.190,92
Taiobeiras	8.961	3.874,47	16.216,06	12.708,95	17.350,40
Taquaraçu de Minas	820	569,10	1.483,73	1.162,97	2.548,53
Tiradentes	3.903	3.619,51	7.061,49	5.535,43	16.208,66
Três Marias	20.364	11.075,44	36.849,48	28.881,26	49.597,38
Turmalina	9.849	4.828,07	17.822,57	13.968,35	21.620,76
União de Minas	2.345	1.357,48	4.243,31	3.325,80	6.078,99
Várzea da Palma	6.861	3.465,74	12.415,46	9.730,62	15.520,06
Varzelândia	1.273	603,77	2.303,61	1.805,43	2.703,75
Vazante	14.356	8.758,63	25.977,03	20.360,41	39.222,39

Fonte: Elaboração própria

b) Municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes

Tabela A.2 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com 50.000 a 150.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)			
		Método DQO convertida em metano Lobato (2011)	Método IPCC (2006)	Método CETESB (2006)	Método UNFCCC (2013)
Alfenas	65.754	44.859,27	118.977,53	93.255,67	200.886,11
Araxá	95.042	59.476,08	171.976,36	134.793,41	266.342,26
Caratinga	50.715	29.384,32	91.769,46	71.926,60	131.587,10
Conselheiro Lafaiete	96.847	21.341,06	175.272,64	137.353,35	95.568,29
Coronel Fabriciano	80.816	45.706,24	146.238,47	114.617,37	204.678,98
Curvelo	55.603	28.294,13	100.617,37	78.859,01	126.705,10
Ibirité	115.604	8.222,57	209.232,10	163.955,48	36.821,84
Itajubá	78.096	47.188,56	141.314,24	110.759,72	211.317,00
Lavras	83.895	52.170,83	151.806,36	118.984,16	233.628,33
Nova Serrana	71.894	35.184,34	130.098,11	101.963,73	157.560,41
Paracatu	63.656	34.160,39	115.188,46	90.280,18	152.975,03
Patos de Minas	131.829	88.325,22	238.537,13	186.966,60	395.532,75
Pouso Alegre	123.766	73.964,98	223.954,47	175.531,24	331.225,57
Sabará	87.815	47.008,50	158.905,37	124.543,71	210.510,68
Santa Luzia	145.145	46.646,48	262.670,56	205.852,03	208.889,48
São Sebastião do Paraíso	58.108	37.221,81	105.144,46	82.411,73	166.684,49
Teófilo Otoni	85.623	41.467,40	154.942,20	121.434,90	185.696,86
Timóteo	71.781	41.913,14	129.888,41	101.803,47	187.692,94
Três Corações	60.017	3.546,81	108.625,54	85.119,17	15.883,11
Varginha	117.898	67.551,35	213.338,56	167.208,95	302.504,45
Vespasiano	83.316	36.847,15	150.770,17	118.162,99	165.006,73

Fonte: Elaboração própria

c) Municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes

Tabela A.3 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com 150.000 a 250.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)			
		Método DQO convertida em metano Lobato (2011)	Método IPCC (2006)	Método CETESB (2006)	Método UNFCCC (2013)
Divinópolis	192.421	3.757,27	348.271,11	272.901,26	22.434,09
Ipatinga	234.008	127.169,45	423.447,01	331.882,06	569.482,69
Ribeirão das Neves	215.232	58.367,10	389.516,10		261.376,08

Fonte: Elaboração própria

d) Municípios com população superior a 250.000 habitantes

Tabela A.4 - Potencial de geração de energia elétrica para municípios com mais de 250.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)			
		Método DQO convertida em metano Lobato (2011)	Método IPCC (2006)	Método CETESB (2006)	Método UNFCCC (2013)
Belo Horizonte	2.285.364	1.333.477,22	4.135.315,74	3.241.219,62	6.398.034,18
Betim	312.231	171.935,46	564.992,98	442.821,91	769.951,17
Contagem	519.469	279.309,61	940.002,61	736.737,39	1.250.787,71
Montes Claros	326.931	161.239,96	591.607,59	463.670,20	722.055,22

Fonte: Elaboração própria

## Anexo B - Resultados dos cálculos de potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na biodigestão anaeróbia do lodo proveniente de reatores UASB

### a) Municípios com população menor que 50.000 habitantes

Tabela B.1 – Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)	
		Dados Felca (2016)	Dados Moni Silva (2016)
Águas Vermelhas	3.646	25,84	28,85
Além Paraíba	20.372	144,41	161,21
Almenara	28.862	204,59	228,40
Araçuaí	12.846	91,06	101,66
Arceburgo	8.284	58,72	65,55
Ataléia	3.306	23,43	26,16
Barbacena	37.117	263,10	293,72
Bom Despacho	41.370	293,25	327,38
Bom Repouso	5.435	38,53	43,01
Bonfim	2.236	15,85	17,69
Borda da Mata	12.356	87,58	97,78
Botelhos	7.931	56,22	62,76
Brasília de Minas	15.536	110,13	122,94
Brumadinho	15.780	111,86	124,87
Bueno Brandão	5.388	38,19	42,64
Buenópolis	3.979	28,20	31,49
Buritis	4.780	33,88	37,83
Cabo Verde	7.011	49,70	55,48
Caldas	5.353	37,94	42,36
Camanducaia	11.676	82,76	92,40
Cambuquira	8.443	59,85	66,81
Campanha	12.246	86,80	96,91
Campina Verde	12.949	91,79	102,47
Campo Florido	5.610	39,77	44,39
Capelinha	18.865	133,72	149,29
Capetinga	458	3,25	3,62
Capim Branco	708	5,02	5,60
Capitão Enéas	3.354	23,77	26,54
Carbonita	5.077	35,99	40,18
Carlos Chagas	9.520	67,48	75,34
Carmo da Cachoeira	7.805	55,33	61,76

Tabela B.1 – Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)	
		Dados Felca (2016)	Dados Moni Silva (2016)
Carmo do Paranaíba	22.950	162,68	181,61
Carmo do Rio Claro	13.089	92,78	103,58
Carneirinho	6.086	43,14	48,16
Carvalhos	1.548	10,97	12,25
Conceição da Barra de Minas	1.526	10,82	12,08
Cataguases	45.657	323,64	361,30
Catuti	658	4,66	5,21
Caxambu	18.806	133,30	148,82
Centralina	2.057	14,58	16,28
Claro dos Poções	1.905	13,50	15,08
Cláudio	20.686	146,63	163,70
Conceição do Mato Dentro	8.608	61,02	68,12
Conceição do Pará	1.685	11,94	13,33
Congonhal	8.136	57,67	64,38
Congonhas	33.859	240,01	267,94
Coração de Jesus	4.254	30,15	33,66
Cordisburgo	2.611	18,51	20,66
Corinto	13.317	94,40	105,38
Coronel Murta	3.245	23,00	25,68
Cristália	818	5,80	6,47
Cruzília	12.126	85,95	95,96
Desterro do Melo	1.186	8,41	9,39
Diamantina	26.399	187,13	208,91
Divino	8.326	59,02	65,89
Divisópolis	2.615	18,54	20,69
Dores do Indaiá	10.717	75,97	84,81
Engenheiro Navarro	2.502	17,74	19,80
Esmeraldas	8.422	59,70	66,65
Estrela do Indaiá	1.335	9,46	10,56
Estrela do Sul	2.847	20,18	22,53
Extrema	22.186	157,26	175,57
Fama	772	5,47	6,11
Francisco Dumont	735	5,21	5,82
Fronteira	12.118	85,90	95,90
Frutal	43.704	309,79	345,85
Funilândia	1.088	7,71	8,61
Glaucilândia	618	4,38	4,89

Tabela B.1 – Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)	
		Dados Felca (2016)	Dados Moni Silva (2016)
Gonçalves	810	5,74	6,41
Grão Mogol	2.730	19,35	21,60
Guaraciaba	2.790	19,78	22,08
Guarda-Mor	3.251	23,04	25,73
Guaxupé	43.328	307,13	342,87
Ibiaí	1.947	13,80	15,41
Icaraí de Minas	1.111	7,88	8,79
Igarapé	17.483	123,93	138,35
Indaiabira	856	6,07	6,77
Inhapim	6.260	44,37	49,54
Ipuiúna	5.622	39,85	44,49
Itabirinha	5.407	38,33	42,79
Itacarambi	4.176	29,60	33,05
Itamarandiba	15.197	107,72	120,26
Itaobim	7.030	49,83	55,63
Itapecerica	11.885	84,25	94,05
Itapeva	4.413	31,28	34,92
Iturama	30.708	217,67	243,01
Jaboticatubas	8.098	57,40	64,08
Jacinto	4.510	31,97	35,69
Jaíba	4.695	33,28	37,15
Janaúba	15.997	113,39	126,59
Januária	7.951	56,36	62,92
Jequitinhonha	11.822	83,80	93,55
Joáima	7.721	54,73	61,10
João Pinheiro	30.268	214,55	239,52
Juatuba	7.478	53,01	59,18
Juramento	1.621	11,49	12,83
Juvenília	82	0,58	0,65
Lagoa dos Patos	1.740	12,33	13,77
Lagoa Santa	22.924	162,49	181,41
Leandro Ferreira	1.764	12,50	13,96
Limeira do Oeste	3.972	28,16	31,43
Lontra	686	4,86	5,43
Malacacheta	8.720	61,81	69,01
Manga	223	1,58	1,76
Martinho Campos	5.424	38,45	42,92
Mata Verde	6.809	48,27	53,88
Mateus Leme	11.642	82,52	92,13

Tabela B.1 – Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)	
		Dados Felca (2016)	Dados Moni Silva (2016)
Matozinhos	21.397	151,67	169,32
Medina	12.563	89,05	99,42
Minas Novas	5.717	40,52	45,24
Mirabela	3.384	23,99	26,78
Montalvânia	273	1,94	2,16
Monte Azul	205	1,45	1,62
Monte Sião	16.912	119,88	133,83
Morada Nova de Minas	2.145	15,20	16,97
Mutum	6.809	48,27	53,88
Nanuque	26.432	187,36	209,17
Natércia	2.155	15,28	17,05
Nova Lima	16.483	116,84	130,44
Nova Módica	1.664	11,80	13,17
Nova Porteirinha	1.893	13,42	14,98
Novo Cruzeiro	6.383	45,25	50,51
Ouro Branco	31.636	224,25	250,35
Passabém	368	2,61	2,91
Pedra Azul	16.756	118,77	132,60
Pedralva	4.836	34,28	38,27
Pedro Leopoldo	31.482	223,16	249,13
Perdões	15.367	108,93	121,61
Pirapetinga	7.329	51,95	58,00
Porteirinha	6.439	45,64	50,95
Poté	5.471	38,78	43,29
Prados	5.863	41,56	46,40
Presidente Bernardes	1.429	10,13	11,31
Prudente de Moraes	3.153	22,35	24,95
Raposos	11.395	80,77	90,17
Resplendor	8.366	59,30	66,20
Riacho dos Machados	2.449	17,36	19,38
Rio Casca	8.060	57,13	63,78
Rio Pardo de Minas	3.046	21,59	24,10
Salinas	23.209	164,52	183,66
Santa Maria do Suaçuí	6.445	45,68	51,00
Santana da Vargem	5.266	37,33	41,67
Santana do Paraíso	29.269	207,47	231,62
Santa Rita de Caldas	4.384	31,08	34,69
Santa Rita do Sapucaí	32.332	229,18	255,86
Santo Antônio do Monte	21.844	154,84	172,86

Tabela B.1 – Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)	
		Dados Felca (2016)	Dados Moni Silva (2016)
Santo Antônio do Retiro	1.378	9,77	10,90
Santos Dumont	25.842	183,18	204,50
São Francisco	15.807	112,05	125,09
São Gonçalo do Abaeté	3.239	22,96	25,63
São Gotardo	27.568	195,41	218,16
São João da Ponte	1.064	7,54	8,42
São João del Rei	9.229	65,42	73,03
São João do Manhuaçu	4.378	31,03	34,65
São João do Paraíso	5.305	37,60	41,98
São Joaquim de Bicas	7.823	55,45	61,91
São José da Lapa	10.926	77,45	86,46
São José do Jacuri	1.616	11,45	12,79
São Roque de Minas	3.634	25,76	28,76
São Sebastião do Maranhão	1.922	13,62	15,21
São Tiago	5.267	37,33	41,68
Sapucaí-Mirim	3.383	23,98	26,77
Sarzedo	23.633	167,52	187,02
Serra Azul de Minas	1.129	8,00	8,93
Serra da Saudade	439	3,11	3,47
Serra dos Aimorés	2.652	18,80	20,99
Serro	7.520	53,30	59,51
Taiobeiras	8.961	63,52	70,91
Taquaraçu de Minas	820	5,81	6,49
Tiradentes	3.903	27,67	30,89
Três Marias	20.364	144,35	161,15
Turmalina	9.849	69,81	77,94
União de Minas	2.345	16,62	18,56
Várzea da Palma	6.861	48,63	54,29
Varzelândia	1.273	9,02	10,07
Vazante	14.356	101,76	113,61

Fonte: Elaboração própria

b) Municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes

Tabela B.2 – Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com 50.000 a 150.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)	
		Dados Felca (2016)	Dados Moni Silva (2016)
Alfenas	65.754	466,09	520,34
Araxá	95.042	673,70	752,11
Caratinga	50.715	359,49	401,33
Conselheiro Lafaiete	96.847	686,49	766,39
Coronel Fabriciano	80.816	572,86	639,53
Curvelo	55.603	394,14	440,01
Ibirité	115.604	819,45	914,83
Itajubá	78.096	553,58	618,01
Lavras	83.895	594,68	663,90
Nova Serrana	71.894	509,61	568,93
Paracatu	63.656	451,22	503,74
Patos de Minas	131.829	934,46	1.043,22
Pouso Alegre	123.766	877,31	979,42
Sabará	87.815	622,47	694,92
Santa Luzia	145.145	1.028,85	1.148,60
São Sebastião do Paraíso	58.108	411,89	459,83
Teófilo Otoni	85.623	606,93	677,57
Timóteo	71.781	508,81	568,04
Três Corações	60.017	425,43	474,94
Varginha	117.898	835,71	932,98
Vespasiano	83.316	590,58	659,32

Fonte: Elaboração própria

c) Municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes

Tabela B.3 – Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com 150.000 a 250.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)	
		Dados Felca (2016)	Dados Moni Silva (2016)
Divinópolis	192.421	1.363,96	1.522,71
Ipatinga	234.008	1.658,75	1.851,81
Ribeirão das Neves	215.232	1.525,65	1.703,23

Fonte: Elaboração própria

d) Municípios com população com mais de 250.000 habitantes

Tabela B.4 – Potencial de geração de energia elétrica através do lodo para municípios com mais de 250.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Potencial de geração de energia elétrica (kWh/mês)	
		Dados Felca (2016)	Dados Moni Silva (2016)
Belo Horizonte	2.285.364	16.199,62	18.085,11
Betim	312.231	2.213,22	2.470,82
Contagem	519.469	3.682,21	4.110,79
Montes Claros	326.931	2.317,42	2.587,15

Fonte: Elaboração própria

## Anexo C – Resultados da análise da viabilidade econômica da implantação do sistema de recuperação energética do metano produzido no tratamento de esgotos e na digestão anaeróbia lodo nos municípios analisados.

### a) Municípios com população menor que 50.000 habitantes

Tabela C.1 – Viabilidade econômica para municípios com menos de 50.000 habitantes

Municípios	População atendida com esgotamento sanitário (hab)	Custo total de investimento (R\$)	Custo evitado de energia elétrica (R\$/mês)	VPL (R\$)	TIR	Payback (anos)
Águas Vermelhas	3.646	403.521,54	960,48	-363.776,39	-0,02	0,00
Além Paraíba	20.372	793.649,66	9.150,51	402.983,09	0,16	4,04
Almenara	28.862	888.461,10	9.684,50	364.999,85	0,15	5,29
Araçuaí	12.846	646.931,53	4.006,78	-203.236,32	0,07	0,00
Arceburgo	8.284	549.831,47	2.728,25	-277.031,32	0,05	0,00
Ataléia	3.306	384.022,49	298,24	-441.052,49	-0,10	0,00
Barbacena	37.117	904.563,35	4.447,21	-462.108,32	0,05	0,00
Bom Despacho	41.370	1.029.602,05	12.103,72	558.642,04	0,16	3,71
Bom Repouso	5.435	467.699,12	1.514,30	-359.858,63	0,01	0,00
Bonfim	2.236	345.568,04	52,68	-430.110,79	-0,19	0,00
Borda da Mata	12.356	628.297,84	2.921,89	-346.709,98	0,04	0,00
Botelhos	7.931	540.164,01	2.234,56	-340.812,82	0,03	0,00
Brasília de Minas	15.536	685.576,23	4.939,05	-108.648,42	0,09	0,00
Brumadinho	15.780	668.149,79	662,35	-745.280,22	-0,08	0,00
Bueno Brandão	5.388	466.038,94	1.457,39	-366.519,05	0,01	0,00
Buenópolis	3.979	418.849,63	1.968,14	-228.007,30	0,04	0,00
Burititis	4.780	448.787,27	1.905,68	-275.592,03	0,03	0,00
Cabo Verde	7.011	512.923,51	2.446,20	-273.669,88	0,05	0,00
Caldas	5.353	468.487,67	1.622,51	-344.191,76	0,02	0,00
Camanducaia	11.676	634.026,92	7.367,54	330.778,44	0,16	3,90
Cambuquira	8.443	529.353,70	1.330,90	-466.293,81	-0,01	0,00
Campanha	12.246	626.665,65	3.747,58	-217.461,16	0,07	0,00
Campina Verde	12.949	652.948,68	4.051,12	-204.038,35	0,07	0,00
Campo Florido	5.610	476.981,53	2.489,46	-221.428,58	0,06	0,00
Capelinha	18.865	741.552,98	5.029,58	-165.690,08	0,09	0,00
Capetinga	458	198.837,01	149,58	-229.111,23	-0,10	0,00
Capim Branco	708	229.939,68	82,29	-278.917,70	-0,14	0,00
Capitão Enéas	3.354	391.217,19	987,22	-344.054,79	-0,01	0,00
Carbonita	5.077	451.655,73	1.218,76	-385.035,49	-0,01	0,00
Carlos Chagas	9.520	574.856,37	2.611,29	-326.780,58	0,04	0,00
Carmo da Cachoeira	7.805	531.726,18	2.299,66	-320.085,09	0,04	0,00
Carmo do Paranaíba	22.950	817.305,63	7.487,31	116.805,03	0,12	13,20

Tabela C.1 – Viabilidade econômica para municípios com menos de 50.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Custo total de investimento (R\$)</b>	<b>Custo evitado de energia elétrica (R\$/mês)</b>	<b>VPL (R\$)</b>	<b>TIR</b>	<b>Payback (anos)</b>
Carmo do Rio Claro	13.089	654.834,97	3.862,31	-235.511,46	0,07	0,00
Carneirinho	6.086	491.487,53	2.413,95	-251.453,76	0,05	0,00
Carvalhos	1.548	301.916,60	604,52	-289.755,63	-0,03	0,00
Conceição da Barra de Minas	1.526	298.959,98	439,21	-311.468,94	-0,05	0,00
Cataguases	45.657	1.101.880,01	13.628,25	701.804,31	0,17	3,07
Catuti	658	224.460,43	9,67	-283.155,55	0,00	0,00
Caxambu	18.806	747.939,56	5.976,34	-27.961,34	0,11	0,00
Centralina	2.057	332.628,46	742,92	-307.386,22	-0,02	0,00
Claro dos Poções	1.905	322.836,33	585,43	-319.226,02	-0,04	0,00
Cláudio	20.686	768.310,22	5.756,01	-87.731,05	0,10	0,00
Conceição do Mato Dentro	8.608	553.426,25	2.307,95	-346.327,45	0,03	0,00
Conceição do Pará	1.685	312.000,91	724,69	-284.034,77	-0,02	0,00
Congonhal	8.136	540.063,14	2.328,65	-326.193,25	0,04	0,00
Congonhas	33.859	949.335,83	11.530,38	572.120,03	0,17	3,27
Coração de Jesus	4.254	429.038,72	1.587,98	-299.484,10	0,02	0,00
Cordisburgo	2.611	359.637,48	688,97	-349.946,84	-0,03	0,00
Corinto	13.317	653.702,70	3.928,27	-223.916,06	0,07	0,00
Coronel Murta	3.245	389.901,94	1.165,67	-314.899,96	0,00	0,00
Cristália	818	241.922,16	227,22	-271.790,24	-0,08	0,00
Cruzília	12.126	625.275,17	3.142,14	-308.952,35	0,05	0,00
Desterro do Melo	1.186	275.055,25	438,77	-281.223,48	-0,05	0,00
Diamantina	26.399	857.125,33	9.943,76	444.669,91	0,16	3,93
Divino	8.326	546.693,67	2.482,35	-310.927,62	0,04	0,00
Divisópolis	2.615	358.037,49	585,71	-363.822,22	-0,05	0,00
Dores do Indaiá	10.717	604.100,75	3.011,31	-302.252,44	0,05	0,00
Engenheiro Navarro	2.502	354.959,55	778,95	-330.154,52	-0,02	0,00
Esmeraldas	8.422	549.947,40	1.181,24	-515.459,94	-0,03	0,00
Estrela do Indaiá	1.335	282.211,70	44,99	-350.950,60	-0,18	0,00
Estrela do Sul	2.847	373.235,90	930,87	-329.930,69	-0,01	0,00
Extrema	22.186	765.873,59	3.845,09	-378.975,00	0,05	0,00
Fama	772	239.311,35	438,92	-235.871,06	-0,04	0,00
Francisco Dumont	735	233.108,91	222,10	-261.402,19	-0,08	0,00
Fronteira	12.118	630.878,92	3.901,20	-199.142,12	0,07	0,00
Frutal	43.704	1.088.266,40	16.014,05	1.086.547,09	0,20	2,03
Funilândia	1.088	265.681,51	129,34	-316.995,99	-0,12	0,00
Glaucilândia	618	219.984,92	218,60	-245.298,67	-0,08	0,00
Gonçalves	810	242.881,62	511,69	-229.191,36	-0,03	0,00
Grão Mogol	2.730	365.952,87	709,13	-354.849,84	-0,03	0,00
Guaraciaba	2.790	367.430,83	728,38	-353.759,71	-0,03	0,00
Guarda-Mor	3.251	391.900,64	1.410,43	-279.735,25	0,02	0,00

Tabela C.1 – Viabilidade econômica para municípios com menos de 50.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Custo total de investimento (R\$)</b>	<b>Custo evitado de energia elétrica (R\$/mês)</b>	<b>VPL (R\$)</b>	<b>TIR</b>	<b>Payback (anos)</b>
Guaxupé	43.328	1.072.670,53	12.842,17	617.767,40	0,17	3,44
Ibiaí	1.947	325.099,64	579,62	-322.991,36	-0,04	0,00
Icaraí de Minas	1.111	268.456,25	386,13	-280.961,84	-0,05	0,00
Igarapé	17.483	735.872,47	3.179,22	-443.492,97	0,04	0,00
Indaiabira	856	245.474,94	304,33	-264.417,99	-0,07	0,00
Inhapim	6.260	494.766,91	2.351,49	-265.232,67	0,05	0,00
Ipuiúna	5.622	473.927,93	1.932,82	-303.293,60	0,03	0,00
Itabirinha	5.407	466.278,63	1.660,65	-335.515,67	0,02	0,00
Itacarambi	4.176	424.746,40	1.447,20	-315.723,76	0,01	0,00
Itamarandiba	15.197	676.376,20	3.753,93	-279.522,52	0,06	0,00
Itaobim	7.030	515.378,62	2.102,04	-329.794,30	0,03	0,00
Itapecerica	11.885	621.559,26	3.161,28	-301.292,89	0,05	0,00
Itapeva	4.413	436.780,75	1.390,60	-339.702,80	0,01	0,00
Iturama	30.708	914.063,65	8.404,64	135.397,37	0,13	12,98
Jaboticatubas	8.098	518.377,85	333,88	-605.943,17	-0,11	0,00
Jacinto	4.510	438.004,23	1.616,27	-306.495,31	0,02	0,00
Jaíba	4.695	444.508,90	1.594,45	-318.105,01	0,02	0,00
Janaúba	15.997	698.091,42	5.795,10	7.336,88	0,11	20,31
Januária	7.951	540.941,33	2.534,46	-295.606,58	0,04	0,00
Jequitinhonha	11.822	619.469,89	3.687,72	-217.555,97	0,07	0,00
Joáima	7.721	525.428,91	1.656,49	-411.165,40	0,01	0,00
João Pinheiro	30.268	906.242,07	8.529,65	164.571,08	0,13	11,57
Juatuba	7.478	511.246,71	401,61	-586.467,28	-0,09	0,00
Juramento	1.621	305.346,66	516,42	-307.675,90	-0,04	0,00
Juvenília	82	111.446,46	24,83	-137.504,24	-0,17	0,00
Lagoa dos Patos	1.740	312.755,58	504,97	-318.835,77	-0,05	0,00
Lagoa Santa	22.924	846.849,82	8.690,12	264.604,91	0,14	7,33
Leandro Ferreira	1.764	316.356,68	804,66	-277.241,51	-0,01	0,00
Limeira do Oeste	3.972	419.598,03	1.424,06	-312.760,26	0,01	0,00
Lontra	686	227.159,49	155,91	-264.053,79	-0,10	0,00
Malacacheta	8.720	544.491,01	2.111,57	-365.243,64	0,03	0,00
Manga	223	155.548,80	34,47	-191.946,32	-0,17	0,00
Martinho Campos	5.424	470.830,53	1.919,11	-301.477,07	0,03	0,00
Mata Verde	6.809	500.357,75	1.617,58	-385.365,36	0,01	0,00
Mateus Leme	11.642	632.332,00	2.968,80	-344.600,39	0,04	0,00
Matozinhos	21.397	764.955,62	3.965,15	-359.318,47	0,05	0,00
Medina	12.563	630.982,55	3.535,75	-255.564,05	0,06	0,00
Minas Novas	5.717	469.455,53	955,93	-448.090,90	-0,03	0,00
Mirabela	3.384	393.862,55	837,06	-370.538,11	-0,03	0,00
Montalvânia	273	167.031,14	98,38	-196.663,39	-0,11	0,00
Monte Azul	205	151.248,55	26,07	-187.786,74	-0,18	0,00
Monte São	16.912	729.112,87	6.620,60	95.147,37	0,12	13,76

Tabela C.1 – Viabilidade econômica para municípios com menos de 50.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Custo total de investimento (R\$)</b>	<b>Custo evitado de energia elétrica (R\$/mês)</b>	<b>VPL (R\$)</b>	<b>TIR</b>	<b>Payback (anos)</b>
Morada Nova de Minas	2.145	333.730,12	424,75	-357.789,19	-0,06	0,00
Mutum	6.809	509.886,77	2.204,39	-307.065,11	0,04	0,00
Nanuque	26.432	762.549,66	165,02	-941.594,19	-0,17	0,00
Natércia	2.155	339.054,38	999,67	-275.987,33	0,00	0,00
Nova Lima	16.483	733.925,37	6.879,77	128.964,15	0,13	11,81
Nova Módica	1.664	309.226,58	572,74	-303.922,00	-0,04	0,00
Nova Porteirinha	1.893	322.390,81	608,63	-315.086,54	-0,03	0,00
Novo Cruzeiro	6.383	491.389,96	1.435,45	-402.047,17	0,00	0,00
Ouro Branco	31.636	886.498,04	5.463,60	-282.647,38	0,07	0,00
Passabém	368	184.848,46	156,50	-210.306,17	-0,09	0,00
Pedra Azul	16.756	699.824,35	3.496,71	-348.877,52	0,05	0,00
Pedralva	4.836	448.867,88	1.699,36	-307.472,97	0,02	0,00
Pedro Leopoldo	31.482	819.256,46	839,47	-909.621,50	-0,08	0,00
Perdões	15.367	690.553,70	4.215,31	-226.436,00	0,07	0,00
Pirapetinga	7.329	525.434,66	2.589,15	-267.517,34	0,05	0,00
Porteirinha	6.439	500.397,74	2.547,40	-242.198,40	0,05	0,00
Poté	5.471	466.009,63	1.652,96	-336.358,75	0,02	0,00
Prados	5.863	477.161,11	1.609,09	-357.257,83	0,01	0,00
Presidente Bernardes	1.429	292.992,67	335,32	-319.903,74	-0,07	0,00
Prudente de Moraes	3.153	384.935,34	608,23	-394.463,08	-0,05	0,00
Raposos	11.395	615.687,01	1.864,09	-493.649,46	0,00	0,00
Resplendor	8.366	551.013,83	2.896,39	-252.632,54	0,06	0,00
Riacho dos Machados	2.449	352.446,63	739,64	-333.022,78	-0,03	0,00
Rio Casca	8.060	540.454,36	2.448,26	-308.265,91	0,04	0,00
Rio Pardo de Minas	3.046	379.532,31	849,90	-350.388,36	-0,02	0,00
Salinas	23.209	808.309,90	6.444,87	-32.351,94	0,11	0,00
Santa Maria do Suaçuí	6.445	496.417,39	1.832,50	-347.264,99	0,02	0,00
Santana da Vargem	5.266	461.242,03	1.603,17	-337.982,05	0,02	0,00
Santana do Paraíso	29.269	886.279,70	13.162,40	903.459,58	0,21	2,00
Santa Rita de Caldas	4.384	436.094,83	1.357,95	-343.862,17	0,01	0,00
Santa Rita do Sapucaí	32.332	932.955,48	9.571,02	291.096,10	0,14	7,34
Santo Antônio do Monte	21.844	791.657,41	6.723,85	31.736,56	0,11	18,48
Santo Antônio do Retiro	1.378	289.167,14	523,54	-286.061,09	-0,04	0,00
Santos Dumont	25.842	843.742,77	6.696,30	-38.557,51	0,11	0,00
São Francisco	15.807	692.000,16	3.758,82	-298.582,71	0,06	0,00
São Gonçalo do	3.239	389.808,00	1.142,70	-318.319,44	0,00	0,00

Tabela C.1 – Viabilidade econômica para municípios com menos de 50.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Custo total de investimento (R\$)</b>	<b>Custo evitado de energia elétrica (R\$/mês)</b>	<b>VPL (R\$)</b>	<b>TIR</b>	<b>Payback (anos)</b>
Abaeté						
São Gotardo	27.568	773.897,17	268,90	-939.983,93	-0,14	0,00
São João da Ponte	1.064	264.658,44	352,39	-281.342,91	-0,06	0,00
São João del Rei	9.229	568.687,85	2.579,08	-323.919,58	0,04	0,00
São João do Manhuaçu	4.378	429.935,08	1.144,64	-368.907,38	-0,01	0,00
São João do Paraíso	5.305	461.650,90	1.467,25	-359.435,73	0,01	0,00
São Joaquim de Bicas	7.823	511.739,68	252,69	-610.030,59	-0,12	0,00
São José da Lapa	10.926	613.227,66	3.506,89	-237.493,11	0,07	0,00
São José do Jacuri	1.616	305.871,19	576,39	-299.104,12	-0,04	0,00
São Roque de Minas	3.634	409.612,31	1.615,27	-270.645,21	0,03	0,00
São Sebastião do Maranhão	1.922	324.095,73	639,00	-312.571,57	-0,03	0,00
São Tiago	5.267	461.561,97	1.417,78	-366.942,39	0,00	0,00
Sapucai-Mirim	3.383	395.845,98	1.960,31	-200.041,13	0,05	0,00
Sarzedo	23.633	739.801,92	323,28	-888.370,24	-0,13	0,00
Serra Azul de Minas	1.129	270.256,72	353,85	-288.216,92	-0,06	0,00
Serra da Saudade	439	196.542,90	155,73	-225.254,92	-0,09	0,00
Serra dos Aimorés	2.652	362.164,14	554,21	-373.907,29	-0,05	0,00
Serro	7.520	526.731,22	1.954,79	-366.871,21	0,02	0,00
Taiobeiras	8.961	555.664,31	1.960,63	-402.662,98	0,02	0,00
Taquaraçu de Minas	820	243.142,81	188,73	-279.266,40	-0,10	0,00
Tiradentes	3.903	425.635,32	1.980,05	-234.778,22	0,04	0,00
Três Marias	20.364	768.204,33	5.161,52	-179.164,97	0,08	0,00
Turmalina	9.849	578.676,28	2.554,50	-340.372,50	0,04	0,00
União de Minas	2.345	348.479,85	832,29	-313.721,56	-0,02	0,00
Várzea da Palma	6.861	507.887,05	1.864,61	-356.865,07	0,02	0,00
Varzelândia	1.273	281.145,41	386,89	-296.936,61	-0,06	0,00
Vazante	14.356	676.823,58	4.221,89	-208.011,33	0,08	0,00

Fonte: Elaboração própria

b) Municípios com população entre 50.000 e 150.000 habitantes

Tabela C.2– Viabilidade econômica para municípios com 50.000 a 150.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Custo total de investimento (R\$)</b>	<b>Custo evitado de energia elétrica (R\$/mês)</b>	<b>VPL (R\$)</b>	<b>TIR</b>	<b>Payback (anos)</b>
Alfenas	65.754	1.315.301,01	21.467,33	1.638.595,77	0,22	1,75
Araxá	95.042	1.542.413,31	30.999,07	2.818.741,09	0,27	1,46
Caratinga	50.715	1.131.931,28	17.369,25	1.239.913,23	0,21	1,90
Conselheiro Lafaiete	96.847	1.308.441,25	10.349,63	-65.141,26	0,10	0,00
Coronel Fabriciano	80.816	1.393.992,78	25.690,45	2.189.282,78	0,25	1,56
Curvelo	55.603	1.154.468,32	14.340,61	744.838,51	0,17	3,03
Ibirité	115.604	1.296.690,00	2.666,40	-1.233.670,45	-0,03	0,00
Itajubá	78.096	1.390.848,45	24.113,56	1.950.384,64	0,24	1,64
Lavras	83.895	1.448.739,57	23.875,81	1.840.350,79	0,23	1,73
Nova Serrana	71.894	1.285.205,65	17.920,12	1.130.390,65	0,19	2,24
Paracatu	63.656	1.236.525,70	16.055,50	904.920,22	0,18	2,64
Patos de Minas	131.829	1.859.184,25	43.752,07	4.381.352,52	0,32	1,34
Pouso Alegre	123.766	1.741.276,63	37.599,96	3.583.277,81	0,29	1,40
Sabará	87.815	1.433.215,61	19.215,74	1.142.256,10	0,19	2,44
Santa Luzia	145.145	1.637.802,34	17.118,50	559.780,51	0,14	6,63
São Sebastião do Paraíso	58.108	1.225.377,56	18.154,70	1.242.391,90	0,21	1,01
Teófilo Otoni	85.623	1.388.633,73	25.082,82	2.102.485,54	0,25	1,58
Timóteo	71.781	1.327.225,88	22.760,73	1.822.692,47	0,24	1,66
Três Corações	60.017	1.023.010,53	2.077,70	-977.285,94	-0,03	0,00
Varginha	117.898	1.680.265,20	34.211,67	3.138.756,96	0,28	1,45
Vespasiano	83.316	1.349.201,81	19.786,14	1.336.654,45	0,20	2,04

Fonte: Elaboração própria

c) Municípios com população entre 150.000 e 250.000 habitantes

Tabela C.3 – Viabilidade econômica para municípios com 150.000 a 250.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Custo total de investimento (R\$)</b>	<b>Custo evitado de energia elétrica (R\$/mês)</b>	<b>VPL (R\$)</b>	<b>TIR</b>	<b>Payback (anos)</b>
Divinópolis	192.421	1.498.588,53	2.538,40	-1.509.420,30	-0,04	0,00
Ipatinga	234.008	2.378.778,17	59.623,47	6.167.076,69	0,33	1,31
Ribeirão das Neves	215.232	1.900.192,69	19.339,98	569.205,96	0,14	7,67

Fonte: Elaboração própria

d) Municípios com população com mais de 250.000 habitantes

Tabela C.4 – Viabilidade econômica para municípios com mais de 250.000 habitantes

<b>Municípios</b>	<b>População atendida com esgotamento sanitário (hab)</b>	<b>Custo total de investimento (R\$)</b>	<b>Custo evitado de energia elétrica (R\$/mês)</b>	<b>VPL (R\$)</b>	<b>TIR</b>	<b>Payback (anos)</b>
Belo Horizonte	2.285.364	12.402.420,92	685.312,01	89.829.270,76	0,70	1,10
Betim	312.231	2.820.699,67	59.715,42	5.620.827,04	0,29	1,42
Contagem	519.469	3.820.214,60	104.029,87	11.178.973,33	0,36	1,27
Montes Claros	326.931	2.779.773,99	82.856,39	9.237.080,21	0,39	1,23

Fonte: Elaboração própria