

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA E AMBIENTE
MESTRADO PROFISSIONAL EM ENERGIA E AMBIENTE

RUBEM MOREIRA DE BRITO

**VIABILIDADE DE COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM O BIOGÁS
PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS**

São Luís
2020

RUBEM MOREIRA DE BRITO

**VIABILIDADE DE COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM O BIOGÁS
PROVENIENTE DO TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Energia e Ambiente, da Universidade Federal do Maranhão – UFMA, como requisito para obtenção do grau de Mestre.

Orientador: Dr. Adeilton Pereira Maciel

São Luís
2020

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Brito, Rubem Moreira de.

Viabilidade de cogeração de energia elétrica com o
biogás proveniente do tratamento de esgotos domésticos /
Rubem Moreira de Brito. - 2020.
125 f.

Orientador(a): Adeilton Pereira Maciel.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Energia e Ambiente/ccet, Universidade Federal do Maranhão,
São Luís - MA, 2020.

1. Biogás. 2. Cogeração de energia. 3. Esgotos
sanitários. I. Maciel, Adeilton Pereira. II. Título.

RUBEM MOREIRA DE BRITO

**VIABILIDADE DE COGERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA COM BIOGÁS PROVENIENTE DO
TRATAMENTO DE ESGOTOS DOMÉSTICOS.**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Energia e
Ambiente da Universidade Federal do
Maranhão como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de
Mestre em Energia e Ambiente.

Aprovada em: / /

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adeilton Pereira Maciel
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

Prof. Dr. Ulisses Magalhães Nascimento
Universidade Federal do Maranhão – UFMA

Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Corrêa
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão - IFMA

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho aos meus pais, Sr. Irineu e a Sra. Alzira, in memoriam, ao meu sobrinho Tiago Moreira de Brito, engenheiro eletricista, pela sua contribuição nos aspectos técnicos da eletricidade e aos meus familiares.

Ao meu orientador, Prof. Adeilton Pereira Maciel, que sempre esteve disponível todas as vezes que o demandei para tirar dúvidas e orientar-me na trilha da pesquisa acadêmica.

Aos meus professores, na pessoa da Prof.^a Teresa Cristina R. dos Santos Franco, a quem homenageio pelo seu exemplo de dedicação ao ensino da ciência e comprometimento pedagógico com todos os seus alunos.

Aos colegas do mestrado, pela interação geracional e pelo intercâmbio de experiências multidisciplinares vivenciadas em diversos ramos profissionais, com que todos se houveram durante todo o período do nosso curso.

Ao meu amigo, especialista em Engenharia Sanitária, Eng. Custódio Roque Tavares, que foi mestre e aluno na troca de conhecimentos nos aspectos da engenharia sanitária que embasam teoricamente este trabalho. Reconhecimento especial a ele que sempre me animou a prosseguir no desenvolvimento deste, nos momentos que estava prestes a desistir.

Registro um agradecimento especial à Profa. Dra. Paula Francinetti de Araujo Tavares pela revisão ortográfica e gramatical do texto final desta dissertação.

Por fim, manifestamos os nossos agradecimentos a Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA, empresa da qual fui engenheiro por uma década, representada nas pessoas do seu Diretor Presidente, à época deste trabalho, Eng. Carlos Rogério Santos Araújo e do químico industrial, Afonso de Ligorio A. Santos da área de operação e manutenção das ETEs, pela colaboração com o fornecimento dos dados operacionais das estações de tratamento, objeto deste trabalho.

“Metano, amônia, vapor de água, fósforo, submetidos a descargas elétricas por muitos dias, produzem uma mistura que muda de cor; acontece que os aminoácidos, as proteínas que promovem a vida, se formaram lá, ocorrendo como condição primordial. Nas rochas, nos fósseis ainda existem bactérias que com os aminoácidos podem criar vida”.

Emanuele Racconta

RESUMO

Pretende-se com este trabalho estudar os aspectos técnicos e econômicos da viabilidade da cogeração de energia – elétrica e calorífica – utilizando-se o biogás gerado a partir de digestores anaeróbios de estações de tratamento de esgotos (ETEs), limitado a três dessas ETEs de propriedade da COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO MARANHÃO – CAEMA, com reatores anaeróbios do tipo RAFA instalados e em operação. Este trabalho objetiva demonstrar a possibilidade de recuperação do biogás produzido pelo tratamento de esgotos domésticos por processo de digestão anaeróbica e posterior purificação do mesmo para atender as especificações técnicas do seu uso, como combustível na geração de energia. No que concerne aos aspectos econômico e financeiro, também, visa analisar e verificar a viabilidade econômica financeira – em nível de estudo de concepção – dos investimentos em arranjos de ativos de cogeração em ETEs de diversas capacidades de tratamento e de geração de lodo, tendo como premissas a redução do consumo de energia elétrica – insumo que representa um considerável peso nas despesas operacionais totais do setor de saneamento – fornecida pela concessionária e a redução dos custos de transporte do lodo desaguado das ETEs, com a redução do seu volume com o aproveitamento da energia calorífica da cogeração, para a secagem térmica do mesmo. Por fim, subsidiariamente, no aspecto ambiental, ao aproveitar o metano na cogeração de energia, propõe uma alternativa para a queima do metano produzido pelas ETEs, como estabelecido em norma da ABNT, contribuindo para redução as metas de emissão deste relevante GEE e, ao aproveitar a energia térmica produzida pela exaustão dos gases dos geradores na secagem térmica dos lodos com as suas higienização e eliminação de microrganismos patogênicos, apresenta uma possibilidade de ação em saúde pública e ambiental para o setor do Saneamento Básico. Utilizando-se a metodologia do decaimento da demanda química de oxigênio (DQO) da literatura, estimou-se o volume do biogás produzido; valorando-se os custos dos investimentos e os operacionais e aplicando-se as técnicas de análise de investimentos de Engenharia Econômica, assim também, as de análise de riscos dos investimentos, chegou-se aos resultados que comprovam a viabilidade econômico-financeira dos investimentos na cogeração de energia, objeto deste estudo.

Palavras-chave: Cogeração de energia. Biogás. Esgotos sanitários.

ABSTRACT

This work goals to study the technical and economic aspects of the feasibility of energy cogeneration - electrical and thermal – using the biogas spawn from digesters from sewage anaerobes treatment plants (UASB) limited to three of these UASB's plants owned by the COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO MARANHÃO - CAEMA with anaerobic reactors of the UASB type available and in operation. It also aims to demonstrate the possibility of recovering biogas produced by the treatment of domestic sewage by anaerobic process of digestion and subsequent purification even to meet the technical specifications of its use, as a fuel for power generation. In witch It concerns to economic and financial aspects It also aims to analyze and verify the economic feasibility at a conception study standard of the energy cogeneration asset investments in sewage plants of various sludge treatment and generation capacity sizes having as premises the electricity consumption reduction which represents a relevant weighting in the expenses of the sanitation sector total expenses energy charged by supplier companies and the dried sludge transport costs reduction from the ETEs with the reduction of its volume with the use of heat energy from the cogeneration to Its thermal drying. Finally as an environmental completing aspect It analyses the energy cogeneration with methane fuel use as an alternative burning to the methane produced by the sewage plants as established in the ABNT standard thus contributing to the greenhouse gas emissions reduction goals of a current relevance GHG and to take advantage of the clean thermal energy by using the exhausting heat gases from the generators besides the thermal drying of the sewage sludge with Its hygiene and pathogenic microorganisms removal that presents an environmental and public health policies possibility for the Basic Sanitation sector. Using the methodology for the decay of chemical oxygen demand (COD) from the literature, the volume of biogas produced was estimated and the investment and operating costs were valued and the Economic Engineering investment analysis techniques were applied, also, as with the risk analysis of investments, results were obtained that prove the financial and economic viability of investments in energy cogeneration, which is the object of this study.

Keywords: Energy cogeneration. Biogas. Sanitary sewers.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Fluxograma do processo da digestão anaeróbia, com as suas fases e grupos de bactérias atuantes40
Figura 2	Vista fotográfica de um dos RAFAs da CAEMA da ETE – Vinhais..41
Figura 3	Esquema do interior de um reator anaeróbio do tipo RAFA, com a coleta do biogás pela parte superior.....42
Figura 4	Gasômetro do sistema de beneficiamento de biogás da ETE de França – SP, SABESP.42
Figura 5	Queimadores de biogás instalados nas tubulações do sistema de coleta dos reatores (RAFA) da estação de tratamento de esgotos – ETE do Vinhais – Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA 43
Figura 6	Medidor de biogás instalado na saída do sistema de coleta dos reatores (RAFA), da estação de tratamento de esgotos – ETE do Vinhais – Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA43
Figura 7	Sistema de coleta de biogás dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente (RAFA) da estação de tratamento de esgotos – ETE do Vinhais – Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA.44
Figura 8	Sistema de tratamento do biogás, com filtração e compressão, contendo unidade de condensação, dessulfurização, remoção de siloxanos e resfriamento. Fabricado pela Indústria ALBRECHT45
Figura 9	Equipamento de dessulfurização do biogás, através do método de biológico de injeção controlada de oxigênio fabricado pela Awite.....46
Figura 10	Reator de siloxanos do biogás, fabricado pela empresa portuguesa ATLAS (da Proposta de Preços N. Ref.: 182820 do fabricante)47
Figura 11	Fluxograma da purificação do biogás, através do método de adsorção por modulação de pressão (PSA, “Pressure Swing Adsorption”), sistema de beneficiamento de biogás da ETE de França – SP, SABESP.48
Figura 12	Conjunto microturbina – gerador da Capstone Turbine Corporation49
Figura 13	Gerador de energia a gás do fabricante nacional CHP BRASIL, modelo CHP60.....49

Figura 14	Especificação do biometano oriundo de aterros e estações de tratamento de esgoto	50
Figura 15	Arranjo de cogeração de energia com o aproveitamento da energia calorífica gerada pela CHP com microturbina, na secagem térmica da torta do lodo desaguado da centrifuga, após a digestão no UASB	65
Figura 16	Arranjo de cogeração de energia com o aproveitamento da energia Calorífica da CHP com motogerador a gás metano na secagem térmica da torta do lodo desaguado na centrifuga, após a digestão no UASB	66
Figura 17	Secador térmico rotativo de lodo da Albrecht	69
Gráfico 1	Potência instalada por Arranjo Técnico e de acordo com a capacidade de tratamento da ETE	107
Gráfico 2	Geração de energia elétrica por Arranjo Técnico, de acordo com a de capacidade de tratamento da ETE	108
Gráfico 3	Autossuprimento de energia elétrica por arranjo, de acordo com a capacidade de tratamento da ETE	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Dados operacionais da estação de tratamento de esgotos - ETE do Vinhais (Coordenadas: S - 02° 31' 36,9"; W- 044° 15' 51,7") operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Estado do Maranhão – CAEMA	53
Tabela 2	Dados operacionais da estação de tratamento de esgotos - ETE do Jaracaty (Coordenadas: S - 02°30'46,87"; W - 44°17'39") operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Estado do Maranhão – CAEMA.	54
Tabela 3	Dados operacionais da estação de tratamento de esgotos - ETE do Bacanga (Coordenadas: S - 02° 32' 39,5"; W - 044°18'8,7") operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Estado do Maranhão – CAEMA.	55
Tabela 4	Cálculo da massa do metano produzido pela estação de tratamento de esgotos do Vinhais – CAEMA	57
Tabela 5	Cálculo do volume do metano produzido pela estação de tratamento de esgotos do Vinhais – CAEMA	57
Tabela 6	Cálculo da massa do metano produzido pela estação de tratamento de esgotos do Jaracaty – CAEMA	58
Tabela 7	Cálculo do volume do metano produzido pela estação de tratamento de esgotos do Jaracaty – CAEMA	58
Tabela 8	Cálculo da massa do metano produzido pela estação de tratamento de esgotos do Bacanga – CAEMA.....	59
Tabela 9	Cálculo do volume do metano produzido pela estação de tratamento de esgotos do Bacanga – CAEMA.....	59
Tabela 10	Cálculo da energia bruta produzida e da potência elétrica disponibilizada – ETE do Vinhais – CAEMA.....	61
Tabela 11	Características da microturbina da Bowman Power (dados do modelo Turbogen TG50 de 50 kW).....	62
Tabela 12	Características técnicas do motogerador de energia a gás da CHP BRASIL, modelo CPH60	62
Tabela 13	Cálculo da energia bruta produzida e da potência elétrica disponibilizada – ETE do Jaracaty – CAEMA	63

Tabela 14	Características da microturbina da Elliot Energy Systems (dados do modelo de 45 kW, que corresponde a um ciclo simples, não regenerativo)	63
Tabela 15	Cálculo da energia bruta produzida e da potência elétrica disponibilizada – ETE do Bacanga – CAEMA	64
Tabela 16	Características da microturbina da Capstone (dados do modelo C30 HP)	64
Tabela 17	Limites de patógenos no lodo, segundo a USEPA – Agência De Proteção Ambiental Americana	67
Tabela 18	Cálculo da produção do lodo digerido – ETE do Vinhais – CAEMA.....	69
Tabela 19	Cálculo da energia térmica demandada para secar a torta do lodo desaguada – ETE Vinhais – CAEMA	70
Tabela 20	Cálculo da produção do lodo digerido – ETE do Jaracaty – CAEMA...	70
Tabela 21	Cálculo da energia térmica demandada para secar a torta do lodo desaguada – ETE do Jaracaty – CAEMA	71
Tabela 22	Cálculo da produção do lodo digerido – ETE do Bacanga – CAEMA ..	71
Tabela 23	Cálculo da energia térmica demandada para secar a torta do lodo desaguada – ETE BACANGA – CAEMA	72
Tabela 24	Tarifas médias (R\$/kW) por classe de consumo no Brasil – serviço público.....	74
Tabela 25	Precificação dos custos anuais de energia elétrica na cogeração de energia aproveitando o metano das ETEs da CAEMA.....	75
Tabela 26	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – ETE do Vinhais – CAEMA.....	77
Tabela 27	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - pagamentos dos investimentos – ETE do Vinhais – CAEMA.....	78
Tabela 28	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - receitas dos investimentos – ETE do Vinhais – CAEMA.....	79
Tabela 29	Cálculo de investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - fluxo de caixa do investimento – ETE do Vinhais – CAEMA.....	80
Tabela 30	Resultados das técnicas de análise dos investimentos na cogeração de energia para o arranjo – I	80

Tabela 31	Cálculo dos parâmetros do método CAPM de análise do risco dos investimentos cogeração de energia com o aproveitamento do biogás – ETE do Vinhais – CAEMA.....	81
Tabela 32	Cálculo da taxa de risco e análise de risco dos investimentos na cogeração de energia com o aproveitamento do biogás – ETE do Vinhais – CAEMA	82
Tabela 33	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - ETE do Jaracaty – CAEMA	83
Tabela 34	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – pagamentos dos investimentos – ETE do Jaracaty – CAEMA.....	84
Tabela 35	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – receitas dos investimentos – ETE do Jaracaty – CAEMA	85
Tabela 36	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - fluxo de caixa do investimento – ETE do Jaracaty – CAEMA	86
Tabela 37	Cálculo da análise de resultados das técnicas de análise dos investimentos na cogeração de energia para o arranjo – I. ETE do Jaracaty CAEMA	86
Tabela 38	Cálculo da taxa de risco e análise de risco dos investimentos na cogeração de energia com o aproveitamento do biogás – ETE do Jaracaty – CAEMA.....	87
Tabela 39	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – ETE do Bacanga – CAEMA	88
Tabela 40	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – pagamentos dos investimentos – ETE do Bacanga – CAEMA	89
Tabela 41	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - receitas dos investimentos – ETE do Bacanga – CAEMA	90
Tabela 42	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – fluxo de caixa do investimento – ETE do Bacanga – CAEMA.....	91
Tabela 43	Cálculo da análise de resultados das técnicas de análise dos investimentos na cogeração de energia para o arranjo – I. ETE do Bacanga – CAEMA	91
Tabela 44	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de cogeração de energia – arranjo II – ETE do Vinhais – CAEMA.....	92

Tabela 45	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II – pagamentos dos investimentos – ETE do Vinhais – CAEMA	93
Tabela 46	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II – receitas dos investimentos – ETE do Vinhais – CAEMA.....	94
Tabela 47	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II – fluxo de caixa do investimento – ETE do Vinhais – CAEMA	95
Tabela 48	Cálculo da análise de resultados das técnicas de análise dos investimentos na cogeração de energia para o arranjo – II – ETE do Vinhais – CAEMA.....	96
Tabela 49	Cálculo dos investimentos de risco e análise de risco dos investimentos cogeração de energia com o aproveitamento do biogás – arranjo II – ETE do Vinhais – CAEMA.....	96
Tabela 50	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II – ETE do Jaracaty – CAEMA	97
Tabela 51	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II – pagamentos dos investimentos – ETE do Jaracaty – CAEMA	98
Tabela 52	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II – receitas dos investimentos – ETE do Jaracaty – CAEMA..	99
Tabela 53	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II – fluxo de caixa do investimento – ETE do Jaracaty – CAEMA	100
Tabela 54	Cálculo da análise de resultados das técnicas de análise dos investimentos na cogeração de energia para o arranjo – II – ETE do Jaracaty – CAEMA	100
Tabela 55	Cálculo da taxa de risco e análise de risco dos investimentos na cogeração de energia com o aproveitamento do biogás – arranjo II – ETE do Jaracaty – CAEMA.....	101
Tabela 56	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II – ETE do Bacanga – CAEMA	102

Tabela 57	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II – pagamentos dos investimentos – ETE do Bacanga – CAEMA	103
Tabela 58	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II – receitas dos investimentos – ETE do Bacanga – CAEMA	104
Tabela 59	Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás arranjo II – fluxo de caixa do investimento – ETE do Bacanga – CAEMA	105
Tabela 60	Cálculo da análise de resultados das técnicas de análise dos investimentos na cogeração de energia para o arranjo – II – ETE do Bacanga – CAEMA	105
Tabela 61	Custo de instalação por escala e arranjo (R\$/kW)	110
Tabela 62	Custo nivelado por escala e arranjo (R\$/MWh)	110
Tabela 63	Custo de instalação total internacional (USD/kW)	111
Tabela 64	Custo nivelado (LCOE) internacional para bioenergia (USD/kW)	111
Tabela 65	Parâmetros econômicos financeiros por arranjo técnico e de acordo com a ETE do Vinhais	113
Tabela 66	Parâmetros econômicos financeiros por arranjo técnico e de acordo com a ETE do Jaracaty.....	114
Tabela 67	Parâmetros econômicos financeiros por arranjo técnico e de acordo com a ETE do Bacanga	114
Tabela 68	Taxas de risco dos investimentos na cogeração de energia com o aproveitamento do biogás nas ETEs da CAEMA.....	117
Tabela 69	Taxas de risco dos investimentos na cogeração de energia com o aproveitamento do biogás para os dois arranjos nas ETEs da CAEMA	117

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional de Petróleo
CAB	Custo com despesas financeira, de operação e manutenção, anualizado, com investimento
CAEMA	Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão
CAPM	Capital Assets Pricing Model
CE	Central de Geração Elétrica
CHP	Combined Heat and Power
CIG	Custo do investimento em equipamentos
CNTP	Condições Normais de Temperatura e Pressão
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
E	Energia
E _E	Energia Elétrica Gerada
E _t	Energia térmica residual
E _c	Energia de combustível
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GEE	Gases de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IRENA	International Renewable Energy Agency
ISO	International Standard Organization
LCOE	Levelized Cust of Energy
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NBR	Norma Brasileira
O&M	Custo com operação e manutenção
PAYBACK	Tempo de Retorno de um Investimento
PAB	Produção anual de biogás
PSA	Pressure Swing Adsorption
RAFA	Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente
SS	Sólidos em Sedimentáveis

SST	Sólidos em Suspensão Totais
SSV	Sólidos em Suspensão Voláteis
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TL	Taxa de Lucratividade
TRI	Taxa Interna de Retorno
UASB	Up Flow Anaerobic Sludge Blanket
UNFCCC	United Nations Framework Convention Climate Changes
VP	Valor presente
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	30
2	JUSTIFICATIVA	32
3	OBJETIVOS	33
3.1	Objetivo Geral	33
3.2	Objetivo Específicos	33
4	METODOLOGIA	34
4.1	Estimativa da produção do metano	34
4.2	Determinação da energia bruta produzida	34
4.3	Cálculo da Eficiência Global (η_G)	34
4.4	Análise da viabilidade econômico-financeira	35
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	38
5.1	Dos processos e equipamentos	38
5.2	Dos produtos da biodegradação	38
5.2.1	Hidrólise	38
5.2.2	Acidogênese	39
5.2.3	Acetogênese	39
5.2.4	Metanogênese	39
5.3	A purificação do Biogás	44
5.3.1	Redução da umidade	44
5.3.2	Retirada do sulfeto de hidrogênio (H_2S)	45
5.3.3	Retirada de siloxanos	46
5.3.4	Separação do dióxido de carbono do metano	47
5.4	A combustão do metano e a geração de energia elétrica e térmica	48
6	RESULTADOS	52
6.1	Determinação do volume do biogás	56
6.1.1	Para a ETE do Vinhais	57
6.1.2	Para a ETE do Jaracaty	58
6.1.3	Para a ETE do Bacanga	59
6.2	Geração de energia e potência disponibilizada	61
6.2.1	Para a ETE do Vinhais	61
6.2.2	Para a ETE do Jaracaty	63
6.2.3	Para a ETE do Bacanga	64
6.3	Determinação da demanda de energia para a secagem	69

6.3.1	Para a ETE do Vinhais.....	69
6.3.2	Para a ETE do Jaracaty	70
6.3.3	Para a ETE do Bacanga	71
7	ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA	73
7.1	Premissas e parâmetros para a análise da viabilidade econômico-financeira	76
7.2	Para o arranjo I	77
7.2.1	Análise econômico-financeira para a ETE do Vinhais	77
7.2.1.1	Fluxo de caixa	77
7.2.1.2	Valores presentes e total	80
7.2.1.3	Taxas de lucratividade interna de retorno e do payback	80
7.2.1.4	Retorno mínimo exigido (TMA).....	81
7.2.2	Análise econômico-financeira para a ETE do Jaracaty	83
7.2.2.1	Fluxo de caixa	83
7.2.2.2	Valores presentes e total	86
7.2.2.3	Taxas de lucratividade interna de retorno e do payback	86
7.2.2.4	Retorno mínimo exigido (TMA).....	87
7.2.3	Análise econômico-financeira para a ETE do Bacanga	88
7.2.3.1	Fluxo de caixa	88
7.2.3.2	Valores presentes e total.....	91
7.2.3.3	Taxas de lucratividade interna de retorno e do payback	91
7.3	Para o arranjo II	92
7.3.1	Análise econômico-financeira para a ETE do Vinhais	92
7.3.1.1	Fluxo de caixa	92
7.3.1.2	Valores presentes e total	95
7.3.1.3	Taxas de lucratividade e interna de retorno	96
7.3.1.4	Retorno mínimo exigido (TMA).....	96
7.3.2	Análise econômico-financeira para a ETE do Jaracaty	97
7.3.2.1	Fluxo de caixa	97
7.3.2.2	Valores presentes e total.....	100
7.3.2.3	Taxas de lucratividade e interna de retorno	100
7.3.3.4	Retorno mínimo exigido (TMA).....	101
7.3.3	Análise econômico-financeira para a ETE do Bacanga	102
7.3.3.1	Fluxo de caixa	102

7.3.3.2	Valores presentes e total	105
7.3.3.3	Taxas de lucratividade interna de retorno	105
8	DISCUSSÃO	107
8.1	Aspectos energéticos	107
8.2	Aspectos econômico-financeiros	113
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	118
	REFERÊNCIAS	122

1 INTRODUÇÃO

O Biogás, produzido pela decomposição da matéria orgânica, usado como fonte de energia só veio a ganhar importância depois do experimento de Louis Pasteur, no século XIX, com a sua utilização na Inglaterra a partir da sua produção pelas Estações de Tratamento de Esgotos – ETEs, no final desse século. Na década de 40, o biogás produzido de uma biomassa de esterco de animais, começou a ser utilizado em plantas de geração de energia na Índia¹.

No que tange à geração do biogás, a partir de biomassas, ter apresentado um desenvolvimento tecnológico² – quer nos processos e equipamentos de biodigestão, quer na fabricação de geradores a gás – e um incremento significativo na matriz energética mundial e nacional³, o proveniente dos esgotos domésticos das ETE (s) ainda se encontram num estágio de utilização pouco expressivo. Por outro lado, as restrições cada vez maiores de redução das emissões de gases causadores do Efeito Estufa, entre eles está o metano (CH_4) – gás produzido pela digestão do lodo dos esgotos domésticos⁴, que apresentam a mesma relação de aumento da concentração na atmosfera com a temperatura da mesma, porém tendo o (CH_4) uma efetividade de absorção de calor vinte vezes maior que o dióxido de carbono (CO_2)⁵, torna o seu aproveitamento relevante.

A crescente produção de metano no tratamento dos esgotos domésticos, nos centros urbanos, demanda solução para a captura desse gás de forma sustentável, oportunizando a sua queima na geração de energia elétrica⁶.

Daí a importância de estudar os processos de produção do biogás a partir da digestão dos esgotos domésticos, da sua quantificação, da sua caracterização técnica, quanto também da sua queima e conversão em energia elétrica em cogeração nas Estações de Tratamento de Esgotos – ETEs, das Concessionárias de Saneamento Básico, no estado do Maranhão. Desta forma, pretendemos demonstrar

¹ REIS, Lineu Belico dos; FADIGAS, Eliane A. F. Amaral e CARVALHO, Cláudio Elias. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2012.

² Ibid., p. 83.

³ BRAGA, Benedito *et al.* **Introdução a Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. p.63.

⁴ Ibid., p.174.

⁵ NUNES, José Alves. **Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. 3.ed. Aracaju: Gráfica Editora J. Andrade, 2012.

⁶ GODLOVE, Christopher. Global Methane Initiative. In: SEMINÁRIO DE SUSTENTABILIDADE DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO (CD), 1., 2011, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES, 2011.

a viabilidade técnica e econômico-financeira da cogeração de energia elétrica nestas plantas de Saneamento Básico, inclusive com o cálculo do *payback* dos investimentos na sua implementação e da eficiência energética em todo o processo.

2 JUSTIFICATIVA

Com a elevação do preço médio mensal da tarifa do tipo de consumo Serviço Público (R\$/MWh)⁷, a participação do custo do insumo energia elétrica nas Despesas Operacionais Totais dos serviços de tratamento de esgotos domésticos, que representam em média 18,60%⁸, acabam impactando, ainda mais, os custos das operadoras dos serviços de saneamento.

Nesse cenário, torna-se relevante o uso de outras fontes de energia, na operação das plantas das ETEs, em cogeração ou isoladamente, objetivando a redução do custo do uso da energia elétrica sem prejuízo da eficiência de todo o processo de tratamento dos esgotos domésticos e ainda, considerando as metas de emissões de GEE e melhoria dos indicadores de conversão do metano para efeito de utilização do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)⁹ estabelecidas na Política Ambiental, com a redução da emissão do gás metano na atmosfera. Por fim, a recuperação do metano para fins energéticos, no tratamento da fase gasosa dos esgotos sanitários, através da combustão direta e outros métodos de oxidação térmica ou catalítica passou a ser exigência de norma técnica brasileira, para a elaboração de projetos de tratamento de esgotos sanitários, a partir do final de 2011¹⁰.

Diante de tudo isto, a importância de estudar a viabilidade técnica da cogeração de energia elétrica, tendo como fonte o metano produzido no tratamento de esgotos sanitários, através da ETEs da Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA, que possuam sistema de coleta de biogás, com a quantificação de todos os parâmetros físico-químicos, de eficiência energética e ambiental, além de todos os custos financeiros alocados, é o que se pretende comprovar neste trabalho.

⁷ BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde – FUNASA. **Gestão econômico-financeira no setor de saneamento**. 2. ed. Brasília: Funasa, 2014.

⁸ Ibid., p. 140.

⁹ UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Kyoto protocol to the United Nations. Washington (2007). Disponível em: <https://unfccc.int/>. Acesso em: 04.nov. de 2019.

¹⁰ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.209**: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

3 OBJETIVOS

São objetivos deste trabalho, estudar a viabilidade da produção de energia elétrica, utilizando-se como fonte primária o biogás da digestão dos esgotos domésticos processados nas estações de tratamento de esgotos – ETE, com Reatores do tipo RAFA (Reatores Anaeróbicos de Fluxo Ascendentes) com sistemas de coleta de biogás, operadas pela Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA, na capital do Estado, utilizando microturbinas a gás, acopladas com geradores de energia elétrica, operando com ciclo Brayton e/ou motogeradores a biogás com motores de ciclo Otto, disponíveis comercialmente no mercado nacional.

3.1 Objetivo Geral

São objetivos gerais avaliar a viabilidade técnica, econômico-financeira desta biomassa, para a redução das despesas operacionais com o consumo de energia elétrica, na prestação dos serviços de saneamento básico, com eficiência do seu aproveitamento energético.

3.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho: estimar da capacidade de produção do biogás; determinar os parâmetros do processo de geração do biogás; caracterização físico-química do biogás produzido e, por fim, estudar a viabilidade econômico-financeira, com a determinação do *payback*, para a implementação da cogeração de energia elétrica para atender, parcialmente, a potência instalada nas plantas das estações de tratamento de esgotos – ETEs destes serviços e de energia térmica para a secagem térmica, através da troca de calor dos gases de exaustão das microturbinas e do vapor d'água de refrigeração do motogerador à biogás e o de exaustão dos gases destes motores, da torta de lodo (biossólido) digerida pelos biodigestores anaeróbios, após o desague da mesma pelas centrífugas instaladas nas ETEs estudadas, aumentando assim a eficiência energética de todo o processo.

4 METODOLOGIA

Adotamos neste trabalho a seguinte metodologia:

4.1 Estimativa da produção de metano

Para a estimativa da produção de metano (CH_4): aplicação dos dados e indicadores médios, obtidos dos relatórios operacionais e de análises de parâmetros técnicos da operadora dos serviços de saneamento básico (CAEMA) das 03 (três) estações de tratamento de esgotos sanitários do tipo RAFA (*UASB: Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors*, em inglês), em São Luís – MA, utilizou-se o método descrito por Nunes¹¹, para estimar-se o volume de metano produzido, pela degradação da matéria orgânica presente no lodo do substrato dos esgotos sanitários tratados por reatores anaeróbicos, medido indiretamente, pelo decaimento estimado da DQO (Demanda Química de Oxigênio).

4.2 Determinação da energia bruta produzida

Utilizamos o poder calorífico do metano da literatura técnica pesquisada¹², determinamos a energia bruta produzida, que também, com o rendimento global obtido nos catálogos técnicos dos fabricantes do conjunto turbina-gerador de energia elétrica foi determinado o potencial de eletricidade disponibilizado.

4.3 Cálculo da eficiência global (η_g)

Para o cálculo da eficiência global (η_g), na cogeração de energia, aproveitamos o calor residual do biogás na exaustão das microturbinas-gerador de eletricidade, para a secagem do lodo desaguado dos digestores anaeróbios, através de secadores térmicos rotativos, a fim de reduzir o volume da torta do lodo desaguado pela centrífuga e eliminar os elementos patogênicos. A redução de volume aumenta o teor de sólidos (TS), reduzindo o custo de transportes do lodo. Ao adotarmos os coeficientes dos equipamentos de geração de energia elétrica (microturbina-gerador-

¹¹ NUNES, 2012, passim.

¹² JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda. Tratamento de esgotos domésticos. 8. ed. Rio de Janeiro: ABES. 2017.

motogerador – secador térmico rotativo) do catálogo técnico dos seus fabricantes, foram utilizadas as seguintes equações:

$$E_e = \eta_e \cdot E_c \quad \text{Eq. (01)}$$

$$\eta_g = \frac{E_e + E_t}{E_c} \quad \text{Eq. (02)}$$

Onde:

η_g = eficiência ou rendimento global;

η_e = eficiência ou rendimento elétrico;

E_e = energia elétrica gerada;

E_t = energia térmica residual; e

E_c = energia de combustível

4.4 Análise da viabilidade econômico-financeira

Para a análise da viabilidade econômico-financeira, utilizamos como receita incremental, a economia com a energia gerada pela implantação dos equipamentos e instalação de armazenamento, tratamento e geração de energia elétrica e térmica em cogeração, precificada pela tarifa de energia consumida por cada ETE paga pela CAEMA à concessionária de energia elétrica (EQUATORIAL), informada pela mesma para um período de funcionamento dos equipamentos de cogeração de energia de 20 horas por dia, conforme calculado no Capítulo 7.

Levamos em conta, além da geração de energia elétrica, o aproveitamento do calor residual da queima do biogás produzido e coletado dos digestores do lodo dos esgotos sanitários tipo RAFA, pelas microturbinas e motogeradores a biogás, para a secagem térmica do mesmo, considerando o tempo de operação de 12 horas por dia, continuamente, ao longo de todos os meses do ano. Para as despesas com o financiamento dos investimentos, adotamos um tempo de vida útil dos equipamentos de 20 anos, uma taxa de desconto de 11% a.a., juros de financiamento do investimento de 6% a.a. e o prazo de amortização de 15 anos, praticados pela caixa¹³ – agência de financiamento do setor do saneamento básico no Brasil. Por fim,

¹³ CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Manual de Fomento do Programa Saneamento para Todos tem. SUFUG/GEAVO - Versão 3.18 Vigência: 23 maio de 2019.

estimamos as despesas com operação e manutenção (O&M) em 4% a.a. do investimento total.

Essas avaliações foram procedidas a posteriori a elaboração dos fluxos de caixas para os investimentos no armazenamento e purificação do biogás produzido pelos RAFAs, na cogeração de energia elétrica e calorífica e secagem da torta de lodo desaguado, para cada uma das ETEs, objeto deste estudo, com a apuração dos seguintes custos, para a produção do biometano em cada ETE:

CIG – Custo do investimento do conjunto microturbina-gerador; dos equipamentos de purificação do metano; dos gasômetros e do secador térmico da torta de lodo desaguada (r\$);

OM – Custo com operação e manutenção (%/ano);

CAB – Custo com despesas financeiras de operação e manutenção anualizado com os investimentos realizados na CHP (*Combined Heat and Power*, em inglês) com microturbinas e motogeradores; na unidade de purificação do biogás e no secador térmico da torta de lodo (R\$/ano);

PAB – Produção anual de biogás (m³/ano).

Finalmente, adotamos para o cálculo do dispêndio anual com a geração do biogás, neste estudo, apenas os custos dos investimentos (CIG) no armazenamento e purificação do biogás produzido pelos RAFAs e na cogeração de energia elétrica e calorífica utilizada na secagem da torta de lodo desaguado e nas despesas financeiras com a aquisição dos equipamentos desses investimentos, uma vez que os outros investimentos nos digestores anaeróbios tipo RAFA, já são amortizados pela tarifa dos serviços de esgotamento sanitário na sua integralidade.

A avaliação da viabilidade econômico-financeira da cogeração de energia elétrica foi feita através do tempo de retorno do investimento (*payback*) em anos, da taxa interna de retorno-tri, do valor presente líquido – VPL e da Taxa de Lucratividade – TL, além da avaliação da relação entre o risco dos investimentos e a Taxa de Retorno exigida pelo investidor (TMA); no nosso estudo igual a taxa de desconto praticada pelas instituições de crédito do setor de saneamento no Brasil, adotando-se o modelo *Capital Assets Pricing Model* – CAPM, calculado com as correspondentes funções do aplicativo de planilhas EXCEL da MICROSOFT, conforme serão apresentados no Capítulo 7.

Finalmente, adotamos o custo nivelado de energia, denominado por *LCOE*, sigla em inglês de *levelized cost of energy* ou *levelized energy cost* (LEC), para fazer

a comparação dos arranjos de cogeração de energia, tendo como fonte o biometano, com as demais tecnologias de geração de energia renováveis com tempos de vida útil, potências e custos de implantação diferentes. No cálculo do LCOE, incluímos todo o tipo de custos ocorridos com a produção de energia: custos de investimento inicial, operação e manutenção – O&M, combustível e custos de capital. Em nosso estudo, não foi considerado o custo do combustível, uma vez que o biogás é um subproduto do processo de biodigestão anaeróbica dos esgotos domésticos. A equação utilizada para o cálculo do LCOE, comparada com os LCOE do REN19¹⁴ está descrita a seguir:

$$LCOE = \frac{\sum_{j=1}^n \frac{GIG_j + OM_j}{(1 + TIR)^j}}{\sum_{j=1}^n \frac{E_{anoj}}{(1 + TIR)^j}} \quad \text{Eq.(03)}$$

Onde:

LCOE = Custo nivelado de eletricidade gerada durante a vida útil (R\$/MWh)

CIG = Investimentos no ano j (R\$);

OM = Custos operacionais no ano j (R\$);

E_{ano} = Energia gerada no ano j (MWh);

TIR = Taxa de desconto (%);

n = Vida útil do projeto (anos).

Apresentamos os cálculos do LCOE, adotando esta metodologia, ao final do Capítulo 7, e a sua análise comparativa com custo nivelado de energia internacional do RN2019, para cada ETE e arranjo técnico de cogeração de energia, no Capítulo 8.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 Dos processos e equipamentos

O processo de tratamento dos esgotos sanitários consiste basicamente na estabilização da matéria sólida presente nos esgotos, denominada de lodo (matéria sólida da ordem de 0,08 % do volume total), através da mineralização da sua matéria

¹⁴ INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2018. Abu Dhabi (2019). Disponível em: www.irena.org/publications. Acesso em: 05.mar.2020.

orgânica. Esta biodegradação ocorre pela utilização da matéria orgânica, pelos microrganismos como fonte de energia, ou para síntese de novas células (metabolismo) e, também, para se desenvolverem (catabolismo). Ela pode ainda ocorrer de forma simultânea ao catabolismo, quando há incorporação da matéria orgânica pelos microrganismos e é transformada em novas células, sendo esta transformação conhecida por anabolismo.

5.2 Dos produtos da biodegradação

O tratamento dos esgotos sanitários, através do catabolismo da matéria orgânica pela oxidação bioquímica, gera líquidos e sólidos dissolvidos, com a produção de gases e remoção primária de alguns micro-organismos patogênicos. Este processo ocorre de duas maneiras: na presença do oxigênio livre, denominada de aeróbia, produz gás carbônico e água pela transferência do hidrogênio para o oxigênio; na ausência do oxigênio livre, denominada anaeróbia, a oxidação se processa com o sulfato ou carbonato, que ao receber os íons de hidrogênio, produz o gás carbônico, metano e outros compostos. Desta forma, cabe ressaltar que na digestão anaeróbica, em função dos compostos obtidos, o tratamento dos esgotos sanitários se processa nas seguintes fases.

5.2.1 Hidrólise

Como as bactérias não tem a capacidade de incorporar os compostos orgânicos complexos, tais como os carboidratos, proteínas e lipídios, compostos orgânicos mais simples são produzidos, pela atuação de exoenzimas excretadas pelas bactérias presentes no substrato da matéria orgânica do lodo de esgotos tratados. Daí, esses compostos são mais facilmente assimilados e convertidos por hidrólise, em açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, respectivamente.

5.2.2 Acidogênese

Nesta fase, os compostos solúveis, resultantes da hidrólise, são metabolizados no interior das células das bactérias anaeróbias e facultativas (fermentação acidogênica), dando origem a subprodutos com estrutura molecular mais simples, como as seguintes substâncias: ácidos graxos voláteis, álcoois, ácido

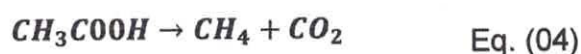
lático e compostos inorgânicos como: gás carbônico, hidrogênio, amônia¹⁵ e ainda, novas células de microrganismos são geradas.

5.2.3 Acetogênese

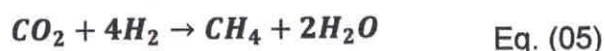
O substrato bioquímico para a geração do metano (acetato, hidrogênio e dióxido de carbono) é produzido nesta fase, por ação das bactérias acetogênicas, sendo que apenas a metade da DQO biodegradável são reduzidas nos compostos butirato e propionato, por essas bactérias.

5.2.4 Metanogênese

A geração do metano ocorre nesta última etapa da decomposição anaeróbia, na qual apenas o acetato – na forma de ácido acético – e o hidrogênio produzidos na acetogênese são reduzidos, pela ação das bactérias metanogênicas, aos compostos finais: gás carbônico e metano. As reduções bioquímicas que ocorrem nesta fase da biodegradação dos lodos dos esgotos sanitários, resultando no gás metano (CH₄) e no gás carbônico (CO₂) são expressas nas Equações 04 e 05 abaixo:



Redução do ácido acético

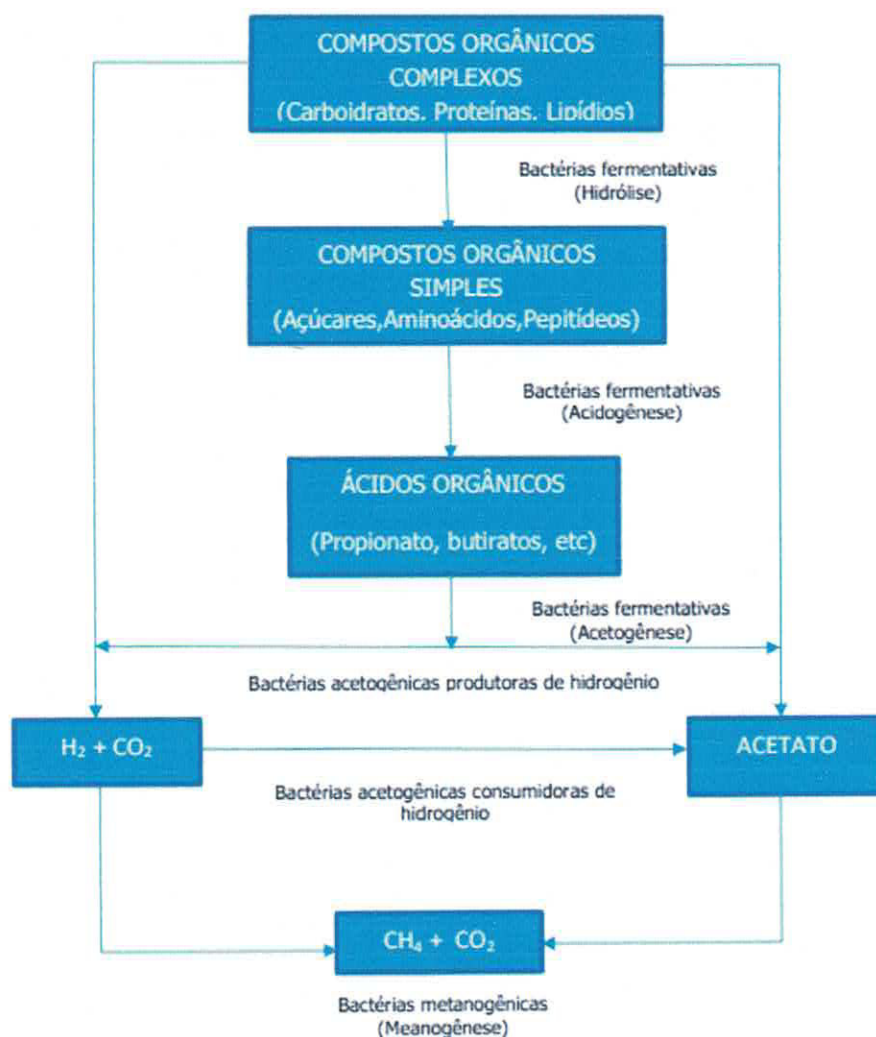


Redução do gás carbônico

Apresentamos, na Figura 1 a seguir, o fluxograma que resume todo este processo da biodegradação anaeróbia.

¹⁵ NUNES, 2012. passim.

Figura 1 - Fluxograma do processo da digestão anaeróbia com as suas fases e grupos de bactérias atuantes



Fonte: Adaptado de Chernicharo, 1997 apud Nunes, 2012¹⁶

Para o objeto deste estudo, que é o de examinar a viabilidade do aproveitamento para a cogeração de energia elétrica a partir do metano (CH₄) gerado no tratamento dos esgotos sanitários, uma vez que a decomposição aeróbia não gera o gás metano, adotamos as estações de tratamento de esgotos – ETEs com reatores anaeróbios de fluxo ascendente (RAFA) como o da Figura 2, a seguir.

¹⁶ NUNES, 2012, passim.

Figura 2 – Vista fotográfica de um dos RAFAs da CAEMA da ETE – Vinhais.

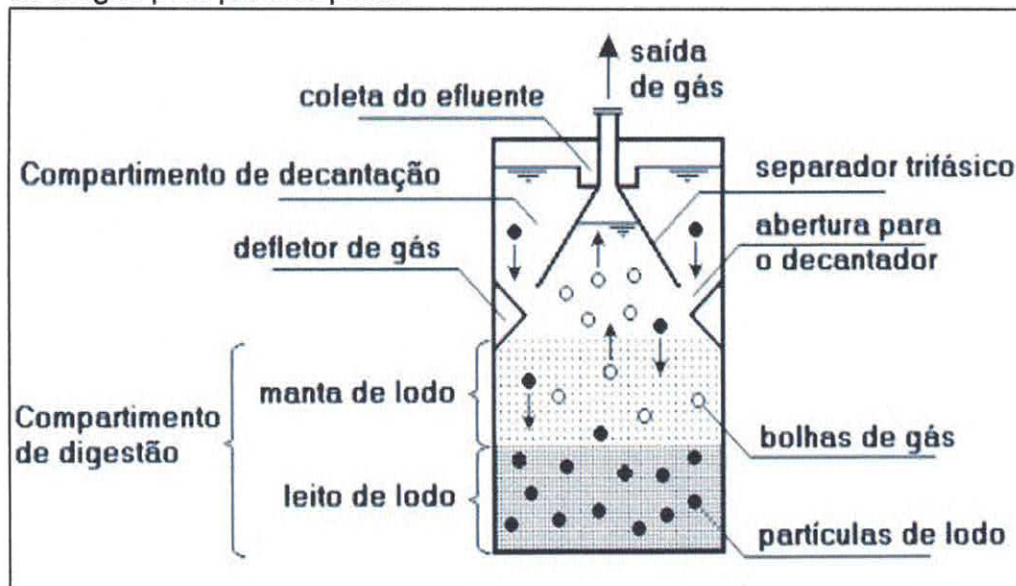


Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

As estações de tratamento de esgotos sanitários, que adotam o processo de digestão anaeróbia do tipo RAFA, são projetadas com sistemas de coleta de biogás na parte superior dos digestores, para os quais apresentamos um esquema do interior de um reator deste tipo na Figura 3. O biogás produzido pelo reator é transportado através de tubulações com medidores de gás instalados nas saídas, com dispositivos corta-chamas, também instalados, antes de ser armazenado posteriormente, em gasômetros (Figura 4), quando há seu aproveitamento na geração de energia elétrica ou térmica ou queimado, conforme estabelece a Norma Técnica Brasileira¹⁷. As Figuras 5, 6 e 7 mostram alguns destes dispositivos já instalados nas ETEs operadas pela Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA, que são objeto deste estudo.

¹⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2011, *passim*.

Figura 3 - Esquema do interior de um reator anaeróbico do tipo RAFA, com a coleta do biogás pela parte superior



Fonte: Adaptado de Valente, 2015¹⁸

Figura 4 – Gasômetro do sistema de beneficiamento de biogás da ETE de Franca SP, SABESP



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

¹⁸ VALENTE, Victor Bustani. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://antigo.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/bustani.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2020.

Figura 5 – Queimadores de biogás instalados nas tubulações do sistema de coleta dos reatores (RAFA) da estação de tratamento de esgotos – ETE do Vinhais – Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Figura 6 – Medidor de biogás instalado na saída do sistema de coleta dos reatores (RAFA), da estação de tratamento de esgotos – ETE do Vinhais – Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Figura 7 – Sistema de coleta de biogás dos reatores anaeróbios de fluxo ascendente (RAFA) da estação de tratamento de esgotos – ETE do Vinhais – Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

5.3 A purificação do Biogás

O biogás, produto do processo de digestão anaeróbia, para ser utilizado na geração de energia elétrica, tem que passar por uma unidade de purificação, visando à remoção de impurezas (siloxanos e outros) e do sulfeto de hidrogênio (H_2S), processando também a sua desumidificação. O siloxano que é um composto de sílica que contém ligações ($Si-O$) com radicais orgânicos ligados à molécula de sílica incluindo grupos metilo e etilo, entre outros, não é decomposto durante a digestão anaeróbia e acaba por volatilizar, misturando-se ao biogás. A combustão destes gases produz uma sílica microcristalina, cuja dureza leva à abrasão das superfícies dos motores. Estes compostos, na forma gasosa, incrustam-se nas turbinas, nos geradores e nos trocadores de calor, levando a uma deterioração mecânica e mau funcionamento desses equipamentos. O processo de purificação e remoção de impurezas é realizado atualmente por unidades compactas, que reúnem em containers as seguintes etapas: redução da umidade; retirada do sulfeto de hidrogênio (H_2S); retirada de siloxanos e separação do dióxido de carbono do metano, as quais descrevemos a seguir.

5.3.1 Redução da umidade

A primeira etapa consiste na desidratação do biogás, através da compressão a elevadas pressões (2 a 4 bar) e da condensação, reduzindo a sua umidade aos teores de especificação do biometano da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis¹⁹

5.3.2 Retirada do sulfeto de hidrogênio (H₂S)

Em seguida, é feita a dessulfurização, com a utilização de carvão ativado, a qual ocorre pela oxidação do sulfeto na superfície do carvão, ou, biologicamente, com a injeção de oxigênio de forma controlada. A presença de H₂S no biogás, mesmo que em baixos teores, em contacto com o vapor de água, leva à oxidação em componentes das tubulações, motogeradores, turbinas e geradores, influenciando no rendimento do sistema de geração de energia. Nas Figuras 8 e 9, mostramos um equipamento de dessulfurização com carvão ativado, fabricado pela indústria nacional ALBRECHT e outro pela indústria Awite, com injeção de oxigênio, respectivamente:

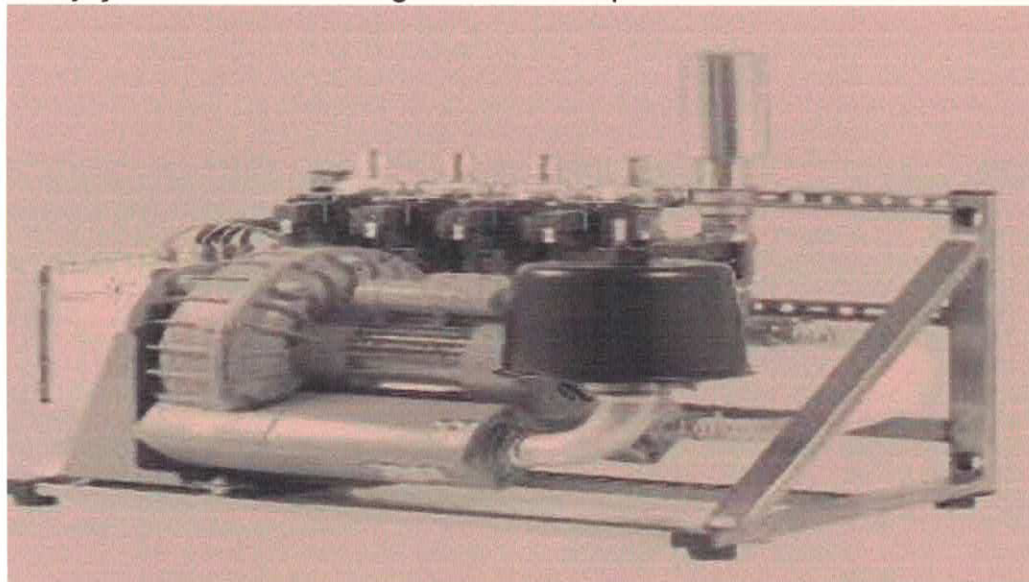
Figura 8 – Sistema de Tratamento do Biogás, com filtração e compressão, contendo unidade de condensação, dessulfurização, remoção de siloxanos e resfriamento. Fabricado pela Indústria ALBRECHT



¹⁹ AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. (Brasil). Resolução ANP nº 685, de 29 de junho de 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. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 2017. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2017/junho&item=ranp-685--2017>. Acesso em: 20 mar. 2020.

Fonte: ALBRECHT, 2019²⁰

Figura 9 – Equipamento de dessulfurização do biogás, através do método biológico de injeção controlada de oxigênio fabricado pela Awite



Fonte: AWITE, 2019²¹

5.3.3 Retirada de siloxanos

Após a dessulfurização, faz-se necessária a retirada dos siloxanos. Os Siloxanos são compostos de sílica que contém ligações Si–O com radicais orgânicos ligados à molécula de sílica. No processo de digestão anaeróbia dos esgotos domésticos, eles se volatilizam e acabam ficando incorporados ao biogás. A sua combustão com siloxanos produz uma sílica microcristalina, levando pela sua dureza à abrasão e incrustações nas paredes internas de componentes das tubulações, motogeradores, turbinas e geradores, influenciando no rendimento do sistema de geração de energia. Na figura 10, mostramos um Sistema de remoção de siloxanos fabricado pela indústria portuguesa AtlasSeis.

²⁰ ALBRECHT. Catálogo de produtos. Secador Indireto Bruthus F. Joinville, SC, 2019.

²¹ AWITE. Catálogo de produtos. Dessulfurização biológica com o Awidesulf. São Paulo, 2019.

Figura 10 – Reator de siloxanos do Biogás, fabricado pela empresa portuguesa ATLAS (da Proposta de Preços N. Ref.: 182820 do fabricante)



Fonte: Sistemas de Energia para Indústria e Serviços LTDA - ATLASSEIS, 2014²²

5.3.4 Separação do dióxido de carbono do metano

Por fim, a separação do CO_2 do CH_4 é realizada por tres processos físicos químicos usuais: o de adsorção por modulação de pressão (PSA, “*Pressure Swing Adsorption*”); o de absorção com aminas e o da destilação criogênica. Usualmente, em razão de ser um método mais econômico do que os outros, o PSA vem sendo largamente utilizado em plantas de produção de biometano para especificações de concentração de CO_2 mais elevadas, como no caso do metano para uso como combustível veicular. Essa separação ocorre numa unidade compacta de separação, que utiliza o processo de adsorção por modulação de pressão, com duas camadas de adsorvente, ou PSA multicamada, como o da absorção com aminas e a destilação criogênica. É o caso da instalada na Estação de Tratamento de Esgotos do município de Franca - SP, de fabricação da organização de pesquisa aplicada alemã Fraunhofer-

²² SISTEMAS DE ENERGIA PARA INDÚSTRIA E SERVIÇOS LTDA - ATLASSEIS. Catálogo de produtos. Reactor Siloxanos. Portugal, 2019.

GmbH e operada pela SABESP, de cujo processo de separação mostramos o seu fluxograma na Figura 11.

Figura 11 - Fluxograma da purificação do Biogás, através do método de adsorção por modulação de pressão (PSA, "Pressure Swing Adsorption"), Sistema de beneficiamento de biogás da ETE de Franca – SP, SABESP.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2009

Uma vez que o dióxido de carbono (CO₂) no biogás gerado por reatores anaeróbios de esgotos domésticos apresenta limites menores que 33,5% (YAMASHITA, 2009 apud MOURA, 2013)²³ e as especificações técnicas brasileiras (ANP) para o biometano resultante da purificação desse biogás para uso como combustível na geração de energia, estabelecerem o limite máximo de CO₂ de 3,0 mol, nenhum destes processos se fará necessário neste estudo.

5.4 A combustão do metano e a geração de energia elétrica e térmica

A combustão do gás metano, resultante da purificação do biogás, visa à geração de trabalho por meio de microturbinas e de motogeradores, de ciclo Otto, no caso deste estudo, com a máxima proporção de calor potencial do biometano, como a das Figuras 12 e 13.

²³ MOURA, Félix Antônio. Viabilidade econômica da geração de energia através do biogás produzido em uma estação de tratamento de esgotos. 2013. TCC (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro Universitário Barão de Mauá, Ribeirão Preto, 2013. 46 p.

Figura 12 – Conjunto microturbina-gerador da Capstone Turbine Corporation.



Fonte: CAPSTONE TURBINE CORPORATION, 2019²⁴

Figura 13 - Gerador de energia a gás do fabricante nacional CHP BRASIL, modelo CHP60



Fonte: CHP BRASIL, 2019²⁵

Para assegurar isto, além do gás biometano estar livre de impurezas, no Brasil, já existem especificações da ANP, para o biometano produzido por estações de tratamento de esgotos sanitários (Figura 14) da página seguinte, que garante que o metano e o ar, em quantidade suficiente para a combustão, estejam em mistura homogênea. O biogás produzido pelo processo de digestão anaeróbia, através de

²⁴ CAPSTONE TURBINE CORPORATION. Catálogo de produtos. Microturbinas Capstone. Chatsworth, Califórnia, 2019.

²⁵ CHP BRASIL. Catálogo de produtos. Gerador de energia a gás CPH60. Rio de Janeiro, 2019.

reatores do tipo *UASB*, possui de 65 a 80 % de metano e apresenta um poder calórico na faixa de 5.800 a 6.500 kcal/m³, apresentando limites de inflamabilidade, na pressão ambiente, de 5,3% e 14,9 % em volume de metano na mistura com o ar, respectivamente: inferior e superior.²⁶

Figura 14 - Especificação do biometano oriundo de aterros e estações de tratamento de esgoto

Característica	Unidade	Limite (1)			Método			
		Norte	Nordeste	Centro-Oeste, Sudeste e Sul	NBR	ASTM D	ISO	NF
Poder Calorífico Superior	kJ/m ³	34.000 a 38.400	35.000 a 43.000		15213	3588	6976	
	kWh/m ³	9,47 a 10,67	9,72 a 11,94					
Índice de Wobbe	kJ/m ³	40.500 a 45.000	40.500 a 53.500		15213		6976	
Metano, mín.	% mol	90,0	90,0		14903	1945	6974	
Etano (2)	% mol	anotar	anotar		14903	1945	6974	
Propano (2)	% mol	anotar	anotar		14903	1945	6974	
Butanos e mais pesados (2)	% mol	anotar	anotar		14903	1945	6974	
Oxigênio, máx.	% mol	0,8	0,8		14903	1945	6974	
CO ₂ , máx.	% mol	3,0	3,0		14903	1945	6974	
CO ₂ + O ₂ + N ₂ , máx.	% mol	10			14903	1945	6974	
Enxofre Total, máx. (3, 4)	mg/m ³	70			15531	5504	6326-3 6326-5 19739	
Gás Sulfídrico (H ₂ S), máx.	mg/m ³	10			15531	D4084 - 07 D4323 - 16 5504 6228	6326-3 19739	
Ponto de orvalho de água a 1atm máx. (5)	°C	-39	-39	-45	15766	5454	6327 10101-2 10101-3 11641	
Ponto de orvalho de hidrocarbonetos (6, 7)	°C	15	15	0	15538		23874	
Teor de siloxanos, máx.	mgSi/m ³	0,3	0,3		16560 16561			
Clorados, máx.	mg (Cl/m ³)	5,0	5,0				1911	
Fluorados, máx.	mg (F/m ³)	5,0	5,0				15713	X43-304

Fonte: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2017.²⁷

OBSERVAÇÕES:

- (1) Os Limites especificados são valores referidos a 293,15K (20°C) e 101,325 kPa (1ATM) em base seca, exceto os pontos de orvalho de hidrocarbonetos e de água.
- (2) A determinação somente deve ser realizada quando houver a adição de gás natural, GLP ou propano.

²⁶ HILSDORF, Jorge Wilson *et al.* **Química tecnológica**. 1. ed.. São Paulo: Editora Cengage Learning, 2016.

²⁷ AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2017, *passim*.

- (3) A odoração do biometano quando necessária deverá atender à norma ABNT NBR 15616 e NBR 15614.
- (4) É o somatório dos compostos de enxofre presentes no biometano, devendo a periodicidade ser definida, conforme a análise de risco.
- (5) CASO a determinação seja em teor de água, a mesma deve ser convertida para ponto de orvalho em (°C), conforme correlação da ISO 18453. Quando os pontos de recebimento e de entrega estiverem em regiões distintas, observar o valor mais crítico dessa característica na especificação.
- (6) O ponto de orvalho de hidrocarbonetos só precisa ser analisado, quando houver adição de propano ou GLP, devendo a medição para fins do certificado de qualidade ser feita em linha após o enriquecimento do gás. O ponto cricondentherm da mistura deve ser calculado por meio de equação de estado com base nas composições obtidas nas cromatografias convencional e estendida, reportando o valor encontrado como ponto de orvalho de hidrocarbonetos. Caso a presença de hexanos e mais pesados não tenha sido detectada na cromatografia convencional, fica dispensada a necessidade de se realizar a cromatografia estendida.
- (7) Fica dispensada a análise do ponto de orvalho de hidrocarbonetos para o caso do enriquecimento com gás natural.

6 RESULTADOS

Como descrito na metodologia mencionada no subitem 4.1, utilizamos o método proposto pelo engenheiro José Alves Nunes²⁸ para se estimar o volume de metano produzido a partir dos dados operacionais das 03 (três) estações de tratamento de esgotos (ETEs) com reatores do tipo RAFA, da CAEMA, cujos dados operacionais seguem transcritos nas Tabelas 2, 3 e 4 das páginas seguintes.

No método supramencionado, que tem como princípio a relação do decaimento da demanda química de oxigênio (DQO) com a produção do biogás, no processo de biodigestão anaeróbica, estimada pela demanda bioquímica de oxigênio (DBO) da contribuição de esgotos afluentes as ETEs medida e informada nos relatórios de dados operacionais retrocitados, pela Equação 06. Adotamos, para a estimativa da massa do metano, a taxa indicada pelo autor referenciado expressa na Equação 07 e, para a estimativa do volume respectivo, a equação geral dos gases (lei de Gay - Lussac), Equação 08. Todas indicadas a seguir:

$$DQO = 2 \times DBO \quad (\text{Eq. 06})$$

Onde:

DQO – Demanda química de oxigênio, em mg/L;

DBO – Demanda bioquímica de oxigênio, em mg/L.

$$\rho_m = 1 \text{ kgCH}_4 / 4 \text{ kgDQO} \quad (\text{Eq. 07})$$

Onde:

ρ_m - Taxa de aplicação do metano, em kg de CH₄/kg de DQO.

Equação de Gay – Lussac:

$$V_2 = \frac{V_1 \cdot T_2}{T_1} \quad (\text{Eq. 08})$$

Onde:

V₁ – Volume de CH₄ nas condições normais de temperatura e pressão - CNTP (T₁=273 K; P₁=1 atm), em m³;

V₂ - Volume do CH₄, para T₂ = 30°C = 303 K e P₂ = 1 atm, em m³;

T₁ - Temperatura do CH₄ nas CNTP, em graus Kelvin;

T₂ - Temperatura do CH₄ em 30°C graus ou 303 graus Kelvin;

P₁ = P₂ – Pressão do CH₄ nas CNTP, igual a 1 atm (ao nível do mar).

²⁸ NUNES, 2012, passim.

Tabela 1 – Dados operacionais da estação de tratamento de esgotos – ETE do Vinhais (Coordenadas: S - 02° 31' 36,9"; W- 044° 15' 51,7") operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Estado do Maranhão – CAEMA

PARÂMETROS	UNIDADE	QUANTIDADE	OBSERVAÇÃO
Vazão de esgoto afluente de projeto	m³/d	118.800,00	
Vazão de esgoto afluente máxima horária	L/s	112,00	Média
Vazão de esgoto afluente máxima diária	L/s	95,00	Média
Vazão de esgoto afluente máxima mensal	L/s	85,00	Média
Sólidos totais afluentes ao digestor	kg ST/d	7.200,00	
Sólidos voláteis afluentes ao digestor	kg ST/d	5.040,00	
Sólidos voláteis destruídos na digestão	kg SV/d	-	Não medido
Potência elétrica total instalada	kW	160,00	
Consumo de energia elétrica	kWh/mês	48.267,00	
Custo com energia elétrica	R\$/mês	31.630,30	
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	mg/L	-	

Fonte: CAEMA, 2019.²⁹

²⁹ COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO MARANHÃO – CAEMA. Dados relativos ao período do mês de outubro/2019.

Tabela 2 – Dados operacionais da estação de tratamento de esgotos – ETE do Jaracaty (Coordenadas: S - 02°30'46,87"; W - 44°17'39") operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Estado do Maranhão – CAEMA.

PARÂMETROS	UNIDADE	QUANTIDADE	OBSERVAÇÃO
Vazão de esgoto afluente de projeto	m³/d	17.280,00	
Vazão de esgoto afluente máxima horária	L/s	150,00	Média
Vazão de esgoto afluente máxima diária	L/s	135,00	Média
Vazão de esgoto afluente máxima mensal	L/s	130,00	Média
Sólidos totais afluente ao digestor	kg ST/d	7.200,00	
Sólidos voláteis afluente ao digestor	kg ST/d	3.000,00	
Sólidos voláteis destruídos na digestão	kg SV/d	-	Não medido
Potência elétrica total instalada	kW	20,20	
Consumo de energia elétrica	kWh/mês	10.901,00	
Custo com energia elétrica	R\$/mês	13.045,12	
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	mg/L	-	

Fonte: Diretoria de Operações da Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA. Dados relativos ao período do mês de outubro/2019³⁰

³⁰ COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO MARANHÃO – CAEMA, 2019, passim.

Tabela 3 – Dados operacionais da estação de tratamento de esgotos – ETE do Bacanga (Coordenadas: S - 02° 32' 39,5"; W - 044°18'8,7") operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Estado do Maranhão – CAEMA.

PARÂMETROS	UNIDADE	QUANTIDADE	OBSERVAÇÃO
Vazão de esgoto afluente de projeto	m³/d	27.648,0	
Vazão de esgoto afluente máxima horária	L/s	37,5	Média
Vazão de esgoto afluente máxima diária	L/s	35,0	Média
Vazão de esgoto afluente máxima mensal	L/s	33,5	Média
Sólidos totais afluentes ao digestor	kg ST/d	1.500,0	
Sólidos voláteis afluentes ao digestor	kg ST/d	900,0	
Sólidos voláteis destruídos na digestão	kg SV/d	-	Não medido
Potência elétrica total instalada	kW	4,9	
Consumo de energia elétrica	kWh/mês	2.651,0	
Custo com energia elétrica	R\$	5.223,1	
Demanda bioquímica de oxigênio (DBO)	mg/L	-	

Fonte: Diretoria de Operações da Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão – CAEMA. Dados relativos ao período do mês de outubro/2019³¹

³¹ COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO MARANHÃO – CAEMA, 2019, passim.

6.1 Determinação do volume do biogás

Utilizando-se a metodologia retromencionada no item 4.1, os dados de vazões e das cargas orgânicas dos esgotos afluentes às ETEs estudadas, consignadas nas Tabelas 2 a 4 das páginas anteriores, aplicando-se as equações retroindicadas, foi procedida, com uso da ferramenta de planilhas do Excel, a determinação dos volumes de biogás por cada uma das ETEs. Em seguida, considerando que 75% do biogás é composto de metano e que há uma perda do CH₄ para a atmosfera da ordem de 70 %, determinamos o volume do CH₄, aplicando-se as Equações 09 e 10:

$$V_B = \frac{CH_4}{0,75} \quad \text{Eq. 09}$$

Onde:

V_B – Volume do Biogás, em m³ e

CH₄ – Volume do CH₄, em m³.

$$VCH_{4capt} = 0,70CH_4 \quad \text{Eq. 10}$$

Onde:

VCH_{4cap} – Volume do CH₄ captado, em m³ e

CH₄ - Volume do CH₄, em m³.

Apresentamos, nas páginas seguintes, as tabelas com os resultados dos cálculos em EXCEL dos volumes de biogás e metano (CH₄), para cada uma das estações de tratamento objeto deste estudo.

6.1.1 Para a ETE do Vinhais

Tabela 4 - Cálculo da massa do metano produzido pela estação de tratamento de esgotos do Vinhais – CAEMA

Cálculo das contribuições excluindo infiltrações	
Vazão máxima diária - $Q_{\max d}$	= 95 L/s
Coefficiente do dia de maior consumo - k_1	= 1,2
Vazão média - Q_{med}	= 79,1667 L/s
Tempo de detenção adotado - t_{adotado}	= 6 h (adotamos a eficiência média medida)
Eficiência de remoção da DBO - E_f	= 66 % (adotamos a eficiência média medida)
Cálculo da DQO	
Demanda Bioquímica de Oxigênio afluente a ETE - DBO_{afi}	= 167,2 mgDBO/L
Demanda Química de Oxigênio afluente a ETE - DQO_{afi}	= 334,4 mgDQO/L
Demanda Química de Oxigênio removida - DQO_{rem}	= 220,704 mgDQO/L
DQO_{afi}	= 0,000334 kgDQO/L
DQO_{rem}	= 0,000221 kgDQO/L ou 1.509,615 kgDQO/dia
Produção diária de CH_4 (METANO)	
$m \text{CH}_4$	= 377,404 kg CH_4 /d
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.	

Tabela 5 - Cálculo do volume do metano produzido pela estação de tratamento de esgotos do Vinhais – CAEMA.

CONVERSÃO EM VOLUME CH_4	
V_2 para $T_2 = 30^\circ\text{C} = 303\text{K}$ e $P_2 = 1 \text{ atm}$ (ao nível do mar)	= 4,86154 L/MOL
Considerando que 1 MOL de METANO possui 16 g e a $m\text{CH}_4$	= 23.587,7 g/h CH_4
$V_1\text{CH}_4$	= 566.106 L/dia ou 566 m ³ /dia CH_4
Cálculo do Volume de Biogás	
Considerando 75% do biogás composto de metano	
Volume de biogás sem perdas - VB	= 754,667 m ³ /dia $\approx$ 755 m ³ /dia
Considerando perdas na atmosfera e no processo de 30 %	
Volume do biogás captado - VB_{capt}	= 528,50 m ³ /dia
Volume do metano captado - $\text{VCH}_{4\text{capt}}$	= 396,2 m ³ /dia
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.	

Para a estação de tratamento de esgotos do Vinhais, o volume de gás metano (CH_4) captado, já considerando as perdas, é da ordem de 396,2 m³/dia.

6.1.2 Para a ETE do Jaracaty

Tabela 6 - Cálculo da massa do metano produzido pela estação de tratamento de Esgotos do Jaracaty – CAEMA

Cálculo das contribuições excluindo infiltrações	
Vazão máxima diária - $Q_{\max d}$	= 150 L/s
Coeficiente do dia de maior consumo - k_1	= 1,2
Vazão média - Q_{med}	= 125 L/s
Tempo de detenção adotado - t_{adotado}	= 6 h (adotamos a eficiência média medida)
Eficiência de remoção da DQO - E_f	= 46,00% (adotamos a eficiência média medida)
Cálculo da DQO	
Demanda bioquímica de oxigênio do afluente a ETE - DBO_{afi}	= 132,9 mg/L
Demanda química de oxigênio do afluente - DQO_{afi}	= 265,8 mgDQO/L
Demanda química de oxigênio removida - DQO_{rem}	= 122,268 mgDQO/L
DQO_{afi}	= 0,000266 kgDQO/L
DQO_{rem}	= 0,000122 kgDQO/L ou 1.320,494 kgDQO/dia
Produção diária de CH_4 (METANO)	
mCH_4	= 330,124 kg CH_4 /d
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.	

Tabela 7 - Cálculo do volume do metano produzido pela estação de tratamento de esgotos do Jaracaty – CAEMA

Conversão em volume CH_4	
Considerando 1 MOL CH_4 tem volume de 22,4 L nas CNTP ($T_1=273$ K; $P_1= 1$ atm)	
V_2 para $T_2 = 29^\circ\text{C} = 302\text{K}$ e $P_2 = 1$ atm (ao nível do mar) = 24,77949 L/MOL	
Considerando que 1 MOL de METANO possui 16 g e $mCH_4 = 20.632,7$ g/h CH_4	
$V_1CH_4 = 495.185$ L/dia ou 495 m ³ /dia CH_4	
Cálculo do Volume de Biogás	
Considerando 75% do biogás composto de metano	
Volume de biogás sem perdas - V_B	= 660 m ³ /dia
Considerando perdas na atmosfera e no processo de 30%	
Volume de biogás captado - V_{Bcapt}	= 462,0 m ³ /dia
Volume do metano captado - $VCH_{4\text{capt}}$	= 346,5 m ³ /dia
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019	

A estação de tratamento de esgotos do Jaracaty, apresentou um volume do gás metano (CH_4) calculado – com as perdas – da ordem de 346,5 m³/dia.

6.1.3 Para a ETE do Bacanga

Tabela 8 - Cálculo da massa do metano produzido pela estação de tratamento de esgotos do Bacanga – CAEMA

Cálculo das contribuições excluindo infiltrações	
Vazão máxima diária - $Q_{\max d}$	= 37,5 L/s
Coefficiente do dia de maior consumo - k_1	= 1,2
Vazão média - Q_{med}	= 31,25 L/s
Tempo de detenção adotado - t_{adotado}	= 6 h (adotamos a eficiência média medida)
Eficiência na remoção de DQO-Ef	= 68,38 % (adotamos a eficiência média medida)
Cálculo da DQO	
Demanda de bioquímica de oxigênio afluente a ETE - DBO_{afl}	= 127,6 mg/L
Demanda química de oxigênio - DQO_{afl}	= 255,2 gDQO/L
Demanda química de oxigênio - DQO_{rem}	= 173,536 mgDQO/L
DQO_{afl}	= 0,000255 kgDQO/L
DQO_{rem}	= 0,000174 kgDQO/L ou 468,5472 kgDQO/dia
Produção diária de CH_4 (METANO)	
$m\text{CH}_4$	= 117,137 kg CH_4 /d
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019	

Tabela 9 - Cálculo do volume do metano produzido pela estação de tratamento de esgotos do Bacanga – CAEMA.

Conversão em volume CH_4	
Considerando 1 MOL CH_4 tem volume de 22,4 L nas CNTP ($T_1=273\text{ K}$; $P_1=\text{atm}$)	
Volume V_2 para $T_2=30^\circ\text{C}=303\text{K}$ e $P_2=1\text{ atm}$ (ao nível do mar)	= 24,86154 L/MOL
Considerando que 1 MOL de METANO possui 16 g e $m\text{CH}_4$	= 7.321,05 g/h CH_4
$V_1 = \text{CH}_4$	175.705 L/dia ou 176 m ³ /dia CH_4
Cálculo do Volume de Biogás	
Considerando 75% do biogás composto de metano	
Volume de biogás sem perdas - V_B	= 234,6667 m ³ /dia $\approx$ 235 m ³ /dia
Considerando perdas na atmosfera e no processo de 30%	
Volume de biogás captado - $V_{B_{\text{capt}}}$	= 164,5 m ³ /dia
Volume de metano captado - $V_{\text{CH}_4_{\text{cap}}}$	= 123,2 m ³ /dia
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019.	

A estação de tratamento de esgotos do Bacanga, das estudadas neste trabalho, foi a que apresentou o menor volume do gás metano (CH_4) captado calculado, da ordem de 123,2 m³/dia.

Para o passo seguinte, aplicando a metodologia descrita nos itens 4.2 e 4.3 deste trabalho, calculamos a energia bruta disponibilizada, a energia elétrica e térmica e, a potência elétrica dos conjuntos microturbinas a gás – geradores de

energia elétrica (*CHPs - Combined Heat and Power*) – geração de eletricidade e calor útil a partir do mesmo item da usina. Neste tipo de instalação de CG, a eletricidade desloca parte da energia que seria comprada da rede de suprimento local, e o calor recuperado dos suplementos da microturbina e/ou do motogerador a biogás.

No cálculo da energia bruta disponibilizada e da potência elétrica, utilizou-se as Equações 11, 12, 13 e 14, consignadas abaixo, sem considerar para a potência elétrica, a tipologia de ligação elétrica dos geradores de energia e suas demandas, em razão deste estudo ter sido realizado em nível técnico de concepção, mesmo não resultando na obtenção de resultados com graus de precisão de um estudo de caso em nível de projeto piloto ou executivo.

$$E_c = C_p \cdot V_{CH_4cap} \quad \text{Eq. 11}$$

Onde, temos:

E_c - Energia consumida do combustível, em kWh/d

C_p - Poder calorífico do metano, em kJ/m³

V_{CH_4cap} - Volume do metano produzido, em m³/d

$$E_{el} = \eta_{el} \cdot E_c \quad \text{Eq. 12}$$

Temos que:

E_{el} - Energia elétrica disponibilizada, em kWh;

η_{el} - Eficiência elétrica (admitidas), de 30 %;

E_c - Energia consumida do combustível, em kWh/d

$$E_t = \eta_t \cdot E_c \quad \text{Eq. 13}$$

Sendo:

E_t - Energia térmica disponibilizada, em kWh;

η_t - Eficiência térmica (admitidas), de 40 %;

E_c - Energia consumida do combustível, em kWh/d

$$\eta_g = [(E_{el} + E_t) / E_c] \quad \text{Eq. 14}$$

Onde:

η_g - Eficiência global na cogeração (calculada), em %;

E_{el} - Energia elétrica disponibilizada, em kWh;

E_t – Energia térmica disponibilizada, em kWh;

E_c – Energia consumida do combustível, em kWh/d

Por fim, temos a potência expressa pela Equação 15.

$$P = \frac{\eta_{el} \cdot E_c}{24} \quad \text{Eq. 15}$$

Onde:

P – Potência elétrica, em kW;

η_{el} – Eficiência elétrica (admitidas), em %

Os resultados dos cálculos, realizados em Excel, com a seleção da microturbina e/ou do motogerador a biogás disponível no mercado, são apresentados a seguir.

6.2 Geração de energia e potência disponibilizada

6.2.1 Para a ETE do Vinhais

Tabela 10 - Cálculo da energia bruta produzida e da potência elétrica disponibilizada – ETE do Vinhais – CAEMA.

Aproveitamento do Biogás para geração de energia	
Volume do metano produzido = 396,2 m ³ CH ₄ /d	
Poder calorífero do METANO CH ₄ = 35.800 kJ/m ³	
Energia bruta produzida	
Energia Bruta - E_b = 14.183.960 kJ/dia ou 3.940 kWh/d	
Energia Consumida do Combustível - E_c = 164 kWh	
Cogeração de energia (elétrica e térmica)	
Eficiência Elétrica - η_{el} = 30% > Energia Elétrica Disponibilizada - E_{el} = 49 kWh	
Eficiência Térmica - η_t = 40% > Energia Térmica Disponibilizada - E_t = 66 kWh	
Eficiência Global - η_g = 70 %	
Cogeração de energia e potência de eletricidade disponibilizada	
Potência Elétrica Disponibilizada - P = 49 kW ou 66 HP	
Fonte: Elaborado pelo autor, 2019	

Para a potência elétrica disponibilizada, selecionamos a microturbina da Bowman Power, modelo Turbogen TG50, com as seguintes especificações técnicas:

Tabela 11 - Características da microturbina da Bowman Power (dados do modelo Turbogen TG50 de 50 kW).

POTÊNCIA ELÉTRICA	RENDIMENTO ELÉTRICO	POTÊNCIA TÉRMICA	RENDIMENTO C/ COGERAÇÃO	VOLTAGEM
KW	%	KW	%	Volts
50-60	24,0-13,5	100-312	71-82	380/420

Fonte: Adaptado de SOUZA *et al*, 2003³²

Ou o motogerador a biogás, como alternativa de cogeração de energia, do fabricante nacional CHP BRASIL, modelo CHP-60 com as especificações técnicas das indicadas na Tabela 13, a seguir:

Tabela 12 – Características técnicas do Motogerador de energia a gás da CHP BRASIL, modelo CPH60.

REGIME DE OPERAÇÃO	POTÊNCIA ELÉTRICA	CONSUMO BIOGÁS*
Emergência	60 kVA / 48 kW	26 Nm ³ /h
Principal	50 kVA / 40 kW	23 Nm ³ /h
Contínua	43 kVA / 35 kW	20 Nm ³ /h
Tensão de saída		220-440 V / 60 Hz

Fonte: Elaborado pelo autor a partir do catálogo do fabricante, CPH BRASIL, 2019.³³

* Biogás com 65% de metano em sua composição, com Poder Calorífico Inferior (PCI) de 23.320 kJ/Nm³.

³² SOUZA, Arlindo Antônio de *et al*. Micro-Cogeração: Tecnologia, Desafios e Oportunidades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS, 2., 2003. *Anais* [...]. Rio de Janeiro: UFRJ, 2003. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/2/8037.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2020.

³³ CHP BRASIL, 2019, *passim*.

6.2.2 Para a ETE do Jaracaty

Tabela 13 - Cálculo da energia bruta produzida e da potência elétrica disponibilizada – ETE do Jaracaty – CAEMA.

Aproveitamento do Biogás para geração de energia	
Volume do metano produzido =	346,5 m ³ CH ₄ /d
Poder calorífero do METANO CH ₄ =	35.800 kJ/m ³
Energia bruta produzida	
Energia bruta disponibilizada - Eb =	12.404.700 kJ/dia ou 3.446 kWh/dia
Energia consumida do combustível - Ec =	144 kWh
Cogeração de energia (elétrica e térmica)	
Eficiência Elétrica - η_{el} = 30% > Energia Elétrica Disponibilizada - E _{el} =	43 kWh
Eficiência Térmica - η_t = 40% > Energia Térmica Disponibilizada - E _t =	57 kWh
Eficiência Global - η_g =	70%
Cogeração de energia e Potência de eletricidade disponibilizada	
Potência Elétrica Disponibilizada - P =	43 kW ou 58 HP

Fonte: elaborado pelo autor, 2019

Para a potência elétrica disponibilizada, selecionamos a microturbina Elliot TA45, com as seguintes especificações técnicas:

Tabela 14 - Características da microturbina da Elliot Energy Systems (dados do modelo de 45 kW, que corresponde a um ciclo simples, não regenerativo)

Potência elétrica (kW)	45
Consumo de gás natural (Nm³/h)	31,4
Emissão de NO_x (ppm)	< 50
Dimensões Alt. x Larg. x Prof. (mm)	1194x2286x813
Peso (kg)	770

Fonte: Adaptado de Bruno *et al*, 2002³⁴

E como alternativa de cogeração o mesmo motogerador selecionado para a ETE – Vinhais, com as especificações da Tabela 13.

³⁴ BRUNO, J. C., A. CORONAS, A. Hinestrosa y. A. Estado actual de la tecnología de las microturbinas de gás. **Energua**, Universidad Rovira i Virgili, Espanha, 2002. Disponível em: https://jrguezs.webs.ull.es/tecnologia/bibliografia/micro_tg.pdf. Acesso em: 10 mar. 2020

6.2.3 Para a ETE do Bacanga

Tabela 15 - Cálculo da energia bruta produzida e da potência elétrica disponibilizada – ETE do Bacanga - CAEMA

Aproveitamento do biogás para geração de energia	
Volume do metano produzido =	123,2 m ³ CH ₄ /d
Poder calorífero do METANO CH ₄ =	35.800 kJ/m ³
Energia bruta produzida	
Energia bruta disponibilizada - E _b =	4.410.560 kJ/dia ou 1.225 kWh/dia
Energia consumida do combustível - E _c =	51kWh
Cogeração de Energia (elétrica e térmica)	
Eficiência Elétrica - η_{el} = 30% >	Energia Elétrica Disponibilizada - E _e = 15kWh
Eficiência Térmica - η_t = 40% >	Energia Térmica Disponibilizada - E _t = 20kWh
Eficiência Global - η_g =	70%
Potência Elétrica Disponibilizada - P =	15 kW ou 21 HP

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Por fim, para esta ETE, os cálculos realizados resultaram no menor valor de potência disponibilizada de 15 kW, tendo sido selecionada a CPH de menor potência disponível no mercado, que é a do fabricante Capstone, modelo C30 HP, usando o biogás como combustível. Apresentamos, na Tabela 17, as suas principais especificações técnicas.

Tabela 16 - Características da microturbina da Capstone (dados do modelo C30 HP)

Potência Elétrica	Rendimento Elétrico	Temperatura de Saída dos Gases	Rendimento Térmico	Vazão dos gases de Exaustão
kW	%	°C	MJ/kWh	Kg/s
30	26	275	13,8	0,31

Fonte: CAPSTONE TURBINE CORPORATION, 2019.³⁵

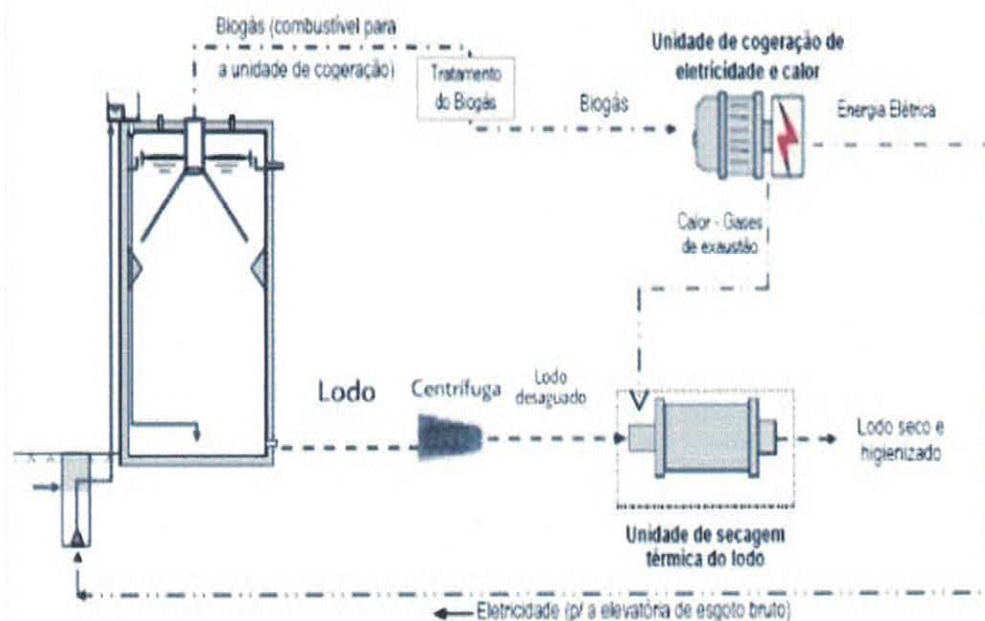
Como alternativa de cogeração, utilizamos o motogerador a biogás do item anterior. Também, foram adotados os seguintes arranjos de cogeração de energia que aproveitam a energia calorífica gerada pela CHP, a partir da queima do gás metano:

Arranjo I – Aproveitamento da energia calorífica gerada pelas microturbinas a biogás de cogeração de eletricidade e calor, para a secagem térmica com a troca de calor dos gases de exaustão das microturbinas, da torta de lodo (biossólido) digerida pelos biodigestores anaeróbios, após o desague da

³⁵ CAPSTONE TURBINE CORPORATION, 2019, passim.

mesma pelas centrífugas instaladas nas ETEs estudadas, com adição de polímeros. Apresentamos, na Figura 14, o desenho esquemático deste arranjo.

Figura 15 – Arranjo de cogeração de energia com o aproveitamento da energia calorífica gerada pela CHP com microturbina, na secagem térmica da torta do lodo desaguado da centrífuga, após a digestão no UASB

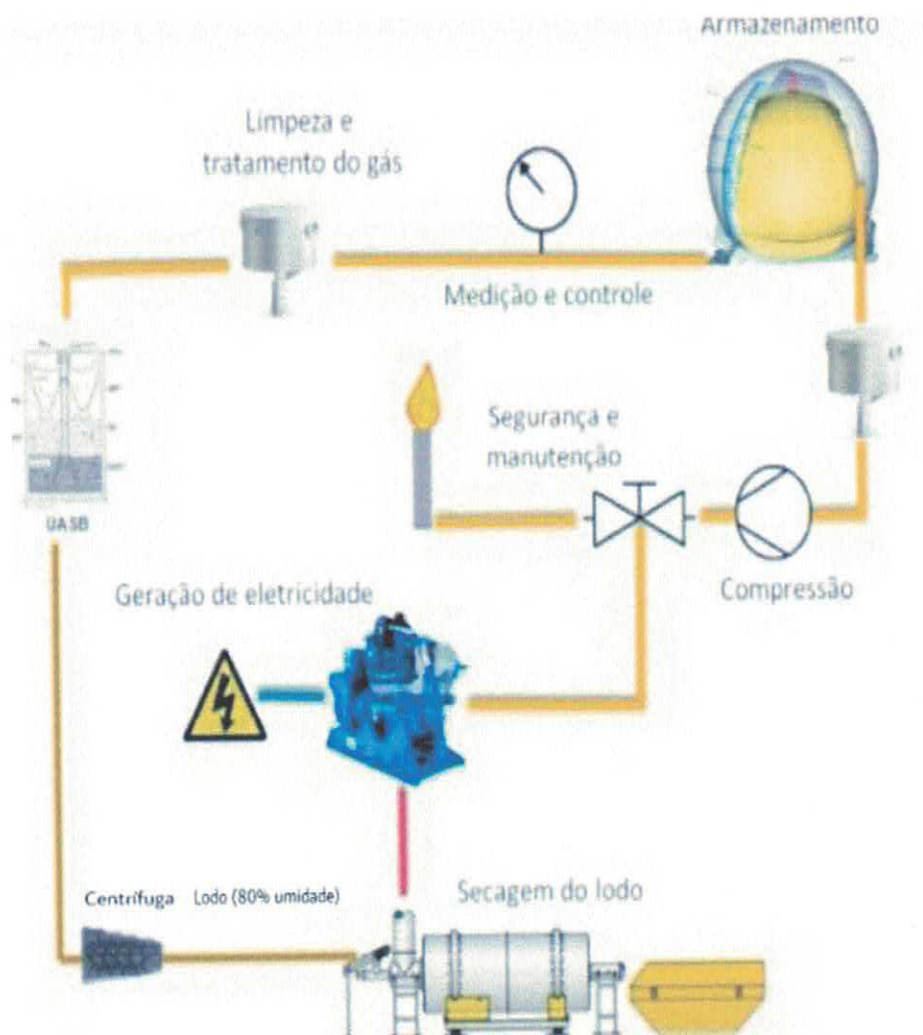


Fonte: Adaptado de Lobato, 2011³⁶

Arranjo II – Aproveitamento da energia calorífica gerada pelas CHP com motogeradores a biogás de cogeração de eletricidade e calor, para a secagem térmica com a troca de calor do vapor d'água de refrigeração do motor e de exaustão dos gases destes motores, conforme o desenho esquemático da Figura 15. Neste estudo, utilizamos um secador térmico rotativo do tipo mostrado na Figura 16.

³⁶ LOBATO, Livia Cristina da Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/189D.PDF>. Acesso em: 04.fev.2020.

Figura 16 – Arranjo de cogeração de energia com o aproveitamento da energia calorífica da CHP com motogerador a gás metano na secagem térmica da torta do lodo desaguado na centrifuga, após a digestão no UASB



Fonte: Adaptado de Valente, 2015³⁷

O tratamento térmico do lodo desaguado nas ETEs com digestores do tipo UASB, além de objetivar a redução do volume do biossólido após a secagem, reduz o custo com o transporte do mesmo e a sua secagem térmica a temperaturas elevadas promove a higienização e eliminação dos elementos patogênicos presentes na torta de lodo desaguado, constituindo um plus financeiro, com o aproveitamento da energia calorífica proveniente da queima do gás metano na geração da energia elétrica pelas microturbinas e/ou motogeradores a gás.

³⁷ VALENTE, 2015, passim.

No Brasil, os parâmetros bacteriológicos para o uso de lodos de esgotos sanitários são normatizados pela Resolução do CONAMA Nº 375/2006³⁸ e pela CETESB³⁹. Esta última, que foi baseada em normas similares às da Agência de Proteção Ambiental Americana – USEPA, estabelece procedimentos para aplicação de lodos e critérios para projeto e operação de sistemas de tratamento biológico, em áreas agrícolas, como os apresentados na Tabela 18.

Tabela 17 - Limites de patógenos no lodo, segundo a USEPA - Agência de Proteção Ambiental Americana

Parâmetro	Classe A	Classe B
Helmintos (contagem de ovos viáveis)	<0,25ovo.gMS-1 <0,25 ovo.gMS-1	Não especificado
Coliformes termotolerantes	<103 NMP.gMS-1	<106 NMP. gMS-1 em 7 amostras por duas semanas

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Após o cálculo do volume do metano produzido pelo biodigestor UASB, procedemos ao cálculo da energia bruta disponibilizada pela queima do metano para os dois arranjos de cogeração de energia adotados para este estudo, considerando a eficiência total na cogeração, utilizando o método descrito na literatura⁴⁰ e, em seguida, após a estimativa da produção de lodo através da Equação 16, consignada a seguir, determinamos a demanda de energia calorífica para secar o biossólido desaguado da centrífuga para um teor de sólidos de 90%, aplicando-se as Equações 17 e 18 apresentadas abaixo e, utilizando a taxa média para evaporação 900 kcal/kgH₂O_{evp}.⁴¹

³⁸ CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. (Brasil). Resolução nº 375 de 29 de agosto de 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://siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5956>. Acesso em: 04.fev.2020.

³⁹ COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. (Brasil). Manual técnico: aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação. Ago.1999. p. 4.230. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 05.mar.2020.

⁴⁰ JORDÃO, 2017, passim.

⁴¹ DAVID, Ailton Checoni. **Secagem Térmica de Lodos de Esgotos**: Determinação da Umidade de Equilíbrio. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

$$M_L = 0,30 \cdot Q_{af} \cdot DQO_{af} \quad \text{Eq. 16}$$

Sendo:

M_L – Massa do Lodo produzido, em kgSST/h;

Q_{af} - Vazão afluyente ao reator UASB, em m³/d;

DQO_{af} - Taxa de DQO aplicada na produção do lodo, em mgSST/L;

$$V = \frac{M_L}{Y \cdot C_L} \quad \text{Eq. 17}$$

Onde:

V - Volume do Lodo, em m³/d;

M_L – Massa do Lodo produzido, em kgSST/h;

Y - Densidade do lodo, estimada em 1.030/1.050 e 1.060 kg/m³;

C_L - Teor de sólidos, estimado em 6 %.

$$E_d = C_{oef} \cdot M_{H_2O_{evap}} \quad \text{Eq. 18}$$

Tendo se:

E_d – Energia térmica demandada para a evaporação da água do lodo desaguado, em kWh;

C_{oef} - Coeficiente de transmissão de calor, adotado em 900 kcal/kgH₂O_{evap};

$M_{H_2O_{evap}}$ – Massa de água a evaporar, em kg/h

Os resultados da determinação da demanda de energia para a secagem da torta de lodo desaguado são apresentados nas tabelas, com os resultados dos cálculos em EXCEL, para cada uma das estações de tratamento objeto deste estudo.

Figura 17.– Secador térmico rotativo de lodo da Albrecht



Fonte: ALBRECHT, 2019⁴²

6.3 Determinação da demanda de energia para a secagem

6.3.1 Para a ETE do Vinhais

Tabela 18 - Cálculo da produção do lodo digerido – ETE do Vinhais – CAEMA

Produção estimada de lodo	
Taxa de aplicação de sólidos em suspensão totais - $DQO_{af} = 0,30 \text{ kgSST/kgDQO}^{(*)}$	
Taxa de $DQO_{aplicada}$ na produção do lodo – $DQO_{af} = 334,4 \text{ mgDQ/L}$	
Vazão afluyente do reator UASB - $Q_{af} = 6.840.000 \text{ L/d}$	
Produção diária de lodo produzido no UASB	
Massa de lodo gerada pelo reator UASB - $M_L = 686,19 \text{ kgSST/d}$	

Fonte: Nota: (*) Sperling, 2014⁴³

⁴² ALBRECHT, 2019, passim.

⁴³ SPERLING, Marcos Von; FERNANDES, Fernando; ANDREOLI, Cleverson V. **Lodo de Esgotos: Tratamento e disposição final**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014.

Tabela 19 - Cálculo da energia térmica demandada para secar a torta do lodo desaguado – ETE do Vinhais – CAEMA

Cálculo da energia para secar a torta de lodo desaguado

Parâmetros do Lodo	Humidade (**) (Ww) %	Teor de Sólidos (**) (Ts) %	Volum e de Lodo (m ³ /d)	H ₂ O (kg/d)	Sólidos (kg/d)	Total (kg/d)
Lodo digerido	85	15	11,10	583,26	102,93	686,19
Lodo desaguado	40	60	2,78	150,96	226,44	377,40
Lodo seco	15	85	1,96	42,46	240,59	283,05
Diferença do Volume de Lodo - $\Delta vol.$ de lodo			0,82 m ³ /d			

Cálculo da massa de H₂O a evaporar

Massa de água do lodo desaguado a ser evaporada - $M_{H_2O_{evap}} = 108,503$ kg/dia ou 9,04 kg/h

Demanda de energia para a secagem da torta de lodo desaguado

Energia térmica demandada para a secagem do lodo - $E_d = 8.136,00$ cal/h ou 9,48 kWh

Fonte: Nota (**) Haandel; Lettinga 1994 apud Lobato, 2011⁴⁴

Diante dos resultados encontrados da massa de água (9,04 kg/h) a ser retirada da torta de lodo pela secagem térmica e da energia demandada (9,46 kW.h), selecionamos o secador térmico do fabricante nacional ALBRECHT, modelo Bruthus F 5.2.1 2 kW.6.3.2 Para a ETE do Vinhais.

6.3.2 Para a ETE do Jaracaty

Tabela 20 - Cálculo da produção do lodo digerido – ETE Jaracaty – CAEMA

Produção estimada de lodo
Taxa de aplicação de sólidos em suspensão totais - $DQO_{af} = 0,30 \text{ kgSST/kgDQO}_{aplicada}^{(*)}$
Taxa de $DQO_{aplicada}$ na produção do lodo – $DQO_{af} 334,40 \text{ mgSST/L}$
Vazão afluyente do reator UASB - $Q_{af} = 10.800.000,00 \text{ L/d}$ ou $10.800,00 \text{ m}^3/\text{d}$
Produção diária de lodo produzido no UASB
Massa de lodo gerada pelo reator UASB - $M_L = 1.083,6 \text{ kgSST/d} = 45,144 \text{ Kg SST/h}$

Fonte: Nota: (*) Sperling, 2014⁴⁵

⁴⁴ LOBATO, 2011, passim.

⁴⁵ SPERLING, 2014, passim.

Tabela 21 - Cálculo da energia térmica demandada para secar a torta do lodo desaguado – ETE do Jaracaty – CAEMA

Cálculo da energia para secar a torta de lodo desaguado

Parâmetros do Lodo	Humidade (**) (Ww) %	Teor de Sólidos (**) (Ts) %	Volume de Lodo (m ³ /d)	H ₂ O (kg/d)	Sólidos (kg/d)	Total (kg/d)
Lodo digerido	85	15	17,53	920,94	162,52	1.083,46
Lodo desaguado	40	60	4,38	238,36	357,54	595,90
Lodo seco	15	85	3,09	67,04	379,89	446,93
Diferença de Volume do Lodo - $\Delta_{vol. \text{ de lodo}}$			1,29 m ³ /d			

Cálculo da massa de H₂O a evaporar

Massa de água do lodo desaguado a ser evaporada - $M_{H_2O_{evap}} = 171,32148 \text{ kg/dia}$ ou 14,28 kg/h

Demanda de energia para a secagem da torta de lodo desaguado

Energia térmica demandada para a secagem do lodo - $E_d = 12.852,00 \text{ kcal/h}$ ou 14,95 kW.h

Fonte: Haandel; Lettinga 1994 apud Lobato, 2011⁴⁶

Em que pesem os resultados encontrados, da massa de água (14,28 kg/h) a ser retirada da torta de lodo pela secagem térmica e da energia demandada (14,95 kW.h), serem um pouco maiores do que os encontrados para a ETE do Vinhais, ainda estão na faixa das especificações técnicas do secador térmico selecionado para aquela ETE, o modelo Bruthus F 5.2.1 - 2kW do fabricante nacional ALBRECHT.

6.3.3 Para a ETE do Bacanga

Tabela 22 - Cálculo da produção do lodo digerido – ETE do Bacanga – CAEMA

Produção estimada de lodo
Taxa aplicação de sólidos em suspensão totais - $DQO_{af} = 0,30, \text{kgSST/kgDQO}_{aplicada}^{(*)}$
Taxa de $DQO_{aplicada}$ na produção do lodo – $DQO_{af} = 334,40 \text{ mgSST/L}$
Vazão afluyente do reator UASB = $2.700.000,00 \text{ L/d} = 2.700,00 \text{ m}^3/\text{d}$
Produção diária de lodo produzido no UASB
Massa de lodo gerada pelo reator UASB - $M_L = 270,86 \text{ kg SST/d}$ ou 11,286 kgSST/h

Fonte: Nota: (*) Sperling, 2014⁴⁷

⁴⁶ LOBATO, 2011. passim.

⁴⁷ SPERLING, 2014, passim.

Tabela 23 - Cálculo da energia térmica demandada para secar a torta do lodo desaguada – ETE do Bacanga – CAEMA

Cálculo da energia para secar a torta de lodo desaguada

Parâmetros do Lodo	Humidade (**) (Ww) %	Teor de Sólidos (**) (Ts) %	Volume de Lodo (m ³ /d)	H ₂ O (kg/d)	Sólidos (kg/d)	Total (kg/d)
Lodo digerido	85	15	4,38	230,2 3	40,63	270,8 6
Lodo desaguado	40	60	1,10	59,59	89,39	148,9 8
Lodo seco	15	85	0,77	16,76	94,97	111,7 3
Diferença de Volume do Lodo - $\Delta vol.$ de lodo			0,32 m ³ /d			

Cálculo da massa de H₂O a evaporar

Massa de lodo gerada pelo reator UASB - $M_{H_2O \text{ evap}} = 42,83 \text{ kg/dia}$ ou 3,57 kg/h

Demanda de energia para a secagem da torta de lodo desaguada

Energia térmica demandada para a secagem do lodo - $E_d = 3.213,00 \text{ cal/h}$ ou 3,74 kW.h

Fonte: Notas: (**) Haande; Lettinga, 1994 apud Lobato, 2011⁴⁸

Para essa última ETE, apesar dos resultados encontrados, da massa de água (3,57 kg/h) a ser retirada da torta de lodo pela secagem térmica e da energia demandada (3,74 kW.h), serem bem menores do que os encontrados para a ETE do Vinhais e ETE do Jaracaty, ainda estão também, na faixa das especificações técnicas do secador térmico selecionado para aquela ETE, o modelo Bruthus F 5.2.1 - 2kW do fabricante nacional ALBRECHT.

⁴⁸ LOBATO, 2011, passim.

7 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA

Para a análise da viabilidade econômico-financeira, utilizamos a metodologia, descrita no item 4.4 deste trabalho e, além dos parâmetros financeiros das instituições de financiamento do setor de saneamento básico no Brasil, adotamos, também, para os equipamentos inexistentes no mercado nacional os preços consignados em Boletins Técnicos⁴⁹ especializados de instituições técnicas internacionais do setor. Essas fontes estão citadas nas Tabelas (27, 34, 40, 45, 51 e 57) de apropriação dos custos de investimento, da energia gerada pelo biogás e de manutenção e operação dos equipamentos e instalações da cogeração de energia, para cada ETE estudada.

Já as receitas para o arranjo adotado, são relativas ao custo evitado com o autoconsumo e/ou compensação de eletricidade, de acordo com os custos tarifários, calculados para o regime de funcionamento dos geradores de 12 horas por dia, sendo 3 horas na tarifa de ponta, com seus resultados apresentados na Tabela 24, corrigidos anualmente pela variação média dos últimos 7 (sete) anos – conforme apurada na Tabela 25, e com a redução do custo de transporte e disposição final do lodo encaminhado para o aterro sanitário.

Tendo-se calculado esse custo para o transporte e disposição final do lodo em (R\$/t) a preços do mercado local, reajustado anualmente pela variação média projetada para os próximos 10 anos, pela variação média mensal do Índice de Preço da Construção Civil – IPCC, no período de jan./2019 a dez./2019, apurado em 4,12 %.

Tabela 24 - Tarifas médias (R\$/kW) por classe de consumo no Brasil - serviço público

BRASIL - SERVIÇO PÚBLICO (ÁGUA, ESGOTO, SANEAMENTO)							
ANO	2010 ¹	2011 ¹	2012 ²	2013 ²	2014 ²	2015 ²	2016 ²
TARIFA MÉDIA R\$/kW	198,7	209,4	236,27	200,56	219,89	327,69	361,73
VARIAÇÃO ANUAL (%)		5,39	12,83	-15,11	9,64	49,02	10,39
VARIAÇÃO MÉDIA (%)							12,03

⁴⁹ CENTRO DE ESTUDOS EM ECONOMIA DA ENERGIA DOS TRANSPORTES E AMBIENTE – CEEETA. Tecnologias de Microgeração e Sistemas Periféricos, Lisboa, 2001. Disponível em: file:///C:/Users/win%207/Downloads/TecnoMicroGeraCEEETA.pdf. Acesso em: 12.mar.2020.

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos dados de (1) Tarifas médias (R\$/MWh) por classes de consumo e por regiões geográficas do Brasil – mensal e anual a partir de 2003 (ANEEL, 2015) e do (2) Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017 ano base 2016 – EPE – Empresa de Pesquisa Energia.⁵⁰

⁵⁰ MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017 ano base 2016. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 15.mar.2020.

Tabela 25 - Precificação dos custos anuais de energia elétrica na cogeração de energia aproveitando o metano das ETEs da CAEMA

ETE	POTÊNCIA Inst. (kW)	E (kWh)	E mes (kW)	TARIFA fora da Ponta (R\$/kW)	TARIFA na Ponta (R\$/kW.h)	TARIFA BT (R\$/kW.h)	CUSTO MENSAL (R\$)	CUSTOS ANUAIS (R\$)	OBS
VINHAIS	160	49	29.400	0,28082	2,16871		22.132,10	265.585,19	TARIFA HORO- SAZONAL VERDE CLASSE: A4 (2,3kV a 25kV) TARIFA HORO- SAZONAL VERDE CLASSE: A4 (2,3kV a 25kV)
BACANGA	4,9	15	9.000	0,28082	2,16871		6.775,13	81.301,59	TARIFA HORO- SAZONAL VERDE CLASSE: A4 (2,3kV a 25kV) TARIFA HORO- SAZONAL VERDE CLASSE: A4 (2,3kV a 25kV)
JARACATY	20,2	43	25.800	0,28082	2,16871	0,63018	19.422,05	233.064,56	TARIFA HORO- SAZONAL VERDE CLASSE: A4 (2,3kV a 25kV)

Fonte: ANEEL, 2019.

Obs.: Tarifas em vigor em 28.08.2019 - Resolução homologatória ANEEL, 2019⁵¹

⁵¹ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Homologatória ANEEL nº 2.594 de 20 de agosto de 2019. Homologa o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2019 da Companhia Energética do Maranhão - CEMAR, a vigorar a partir de 28 de agosto de 2019, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 164, p. 50, 20 de agosto de 2019. Disponível em: file:///C:/Users/win%207/Downloads/INPDFViewer%20(1)%20(1).pdf. Acesso em: 12.mar.2020.

7.1 Premissas e parâmetros para a análise da viabilidade econômico-financeira

Na análise de viabilidade econômico-financeira, para a implantação dos sistemas de cogeração de energia correspondentes aos arranjos técnicos descritos no item 5 deste estudo, adotamos as premissas e parâmetros, que passamos a justificar. No mercado nacional, os custos das microturbinas são maiores cerca de 30 a 50 %, do que no mercado americano, no qual estão estimados na faixa de (US\$700 - US\$1.300)⁵² por kW de potência elétrica nominal, em razão dos impostos de importação, de frete, taxas e seguros.

Para o arranjo I deste estudo, adotamos para CHP com microturbina Elliot TA45, cujo valor médio de US\$ 1.000,00/kW, convertidos ao real pelo câmbio de 31 de dezembro de 2019 era de (1 USD = R\$ 4,019). Já para microturbina Bowman TG50, cujo valor de £ 50.000⁵³ inglesas convertidas para o real era de (1£ GBP = R\$ 5,32198), pela cotação do câmbio, também, de 31 de dezembro de 2019 e para a Capstone-CH30, disponível no mercado nacional, cujo valor de R\$ 427.000,00, já incluídos todos os impostos, exceto o da diferença do ICMS, aos quais a CAEMA está dispensada de pagamento na operação de compra de máquinas e equipamentos em outros estados da Federação, para a sua utilização na prestação dos serviços de saneamento, conforme Convênio ICMS nº 71 de 06/07/2007 / CONFAZ - Conselho Nacional de Política Fazendária (D.O.U. 12/07/2007). Preço este, CIF posto em São Luís – MA, informado pelo representante autorizado no Brasil. Todos os valores das CHP com microturbinas não disponíveis no mercado nacional foram acrescidos de 50 %, correspondentes aos impostos e taxas de importação, fretes e seguros (CIF); para os preços dos outros equipamentos selecionados no item 6. Para cada processo de cada uma das ETEs estudadas, adotamos os preços em reais, do mercado nacional, consignados na tabelas do estudo de viabilidade econômica de Valente⁵⁴, informados pelo fabricante nacional ALBRECHTE e corrigidos pela variação do IPA - OG-FGV de 26,10 %, no período de 2014-2019. Por fim, para o nível simplificado do projeto, do

⁵² LORA, Electo Eduardo S., JAMIL, Haddad. **Geração Distribuída: Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora InterCiência, 2006.

⁵³ MEHRAYIN, Kourosh. **Microturbines and their use in small scale cogeneration. Presentation**. Bowman Power Systems Inc. January, 17th, 2002. Disponível em: encurtador.com.br/gwDOZ. Acesso em: 10 mar. 2020.

⁵⁴ VALENTE, 2015, Passim.

tipo comercial e de uso de tecnologia, com elevado grau de incertezas quanto ao custo total dos investimentos. Para a análise do risco e o retorno exigido pelo investidor (TMA) de 11% a.a. foi adotado como base de referência ao ano de 2019 e das variações mensais da taxa SELIX e do índice Ibovespa, além das projeções anuais para esses indicadores econômicos, na aplicação do *CAPM (Capital Assets Pricing Model)*⁵⁵.

Apresentamos, a seguir, as tabelas com os resultados dos cálculos procedidos pelo Excel, com as conclusões da análise para cada indicador econômico-financeiro do projeto de investimento, para os dois arranjos adotados, em cada uma das ETEs deste estudo:

7.2 Para o arranjo I

7.2.1 Análise econômico-financeira para a ETE – Vinhais

7.2.1.1 Fluxo de caixa

Tabela 26 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - ETE do Vinhais - CAEMA

Descrição dos equipamentos	Custo de Equipamentos (CIG)			P.TOTAL (R\$)
	UN	QT	P.UNIT. (R\$)	
1 - CPH com microturbina da Bowman Power, modelo Turbogen TG50 de 50 kW.	CJ	1	266.099,00	266.099,00
2 - Sistema de tratamento do biogás, com filtração e compressão, contendo unidade de condensação, dessulfurização, remoção de siloxanos e resfriamento, fabricado pela indústria ALBRECHT, para 377,4 kg/dia de CH ₄ .	CJ	1	974.767,83	974.767,83
3 - Gasômetro para armazenagem do biogás, a pressão de até 10 bar.	CJ	1	397.221,04	397.221,04
4 - Secador térmico rotativo de lodo da Albrecht Bruthus F 5.2.1 – 33,5 kW e sistema de aproveitamento do calor.	CJ	1	974.767,83	974.767,83
TOTAL CIG				2.612.855,70

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

⁵⁵ OLÍVIO, Rodolfo L. de Faria. **Análise de Investimentos**. 1. ed. Campinas –SP: Empresas. Editora Alínea, 2008

Tabela 27 – Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – pagamentos dos investimentos – ETE do Vinhais – CAEMA

PAGAMENTOS DOS INVESTIMENTOS					
ANO	DESPESAS FINANCEIRAS			DESPESAS DE MANUTENÇÃO & OPERAÇÃO	TOTAL DAS DESPESAS COM O INVESTIMENTO
	AMORTIZAÇÕES	JUROS	TOTAIS		
1	112.255,50	156.771,34	269.026,84	104.514,23	373.541,07
2	118.990,83	150.036,01	269.026,84	109.217,37	378.244,21
3	126.130,28	142.896,56	269.026,84	114.132,15	383.158,99
4	133.698,10	135.328,75	269.026,84	119.268,10	388.294,94
5	141.719,99	127.306,86	269.026,84	124.635,16	393.662,01
6	150.223,18	118.803,66	269.026,84	130.243,74	399.270,59
7	159.236,58	109.790,27	269.026,84	136.104,71	405.131,56
8	168.790,77	100.236,07	269.026,84	142.229,42	411.256,27
9	178.918,22	90.108,63	269.026,84	148.629,75	417.656,59
10	189.653,31	79.373,54	269.026,84	155.318,09	424.344,93
11	201.032,51	67.994,34	269.026,84	162.307,40	431.334,25
12	213.094,46	55.932,39	269.026,84	169.611,23	438.638,08
13	225.880,13	43.146,72	269.026,84	177.243,74	446.270,58
14	239.432,93	29.593,91	269.026,84	185.219,71	454.246,55
15	253.798,91	15.227,93	269.026,84	193.554,59	462.581,44
16	0,00	0,00	0,00	202.264,55	202.264,55
17	0,00	0,00	0,00	211.366,46	211.366,46
18	0,00	0,00	0,00	220.877,95	220.877,95
19	0,00	0,00	0,00	230.817,45	230.817,45
20	0,00	0,00	0,00	241.204,24	241.204,24

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

(*) Operação e manutenção (O&M) calculado em 4% a.a. do investimento total, corrigido anualmente pela variação média do INPC estimada, para as projeções dos custos de operação e manutenção (2010-2019), de 4,50 %.

Tabela 28 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – receitas dos investimentos – ETE do Vinhais – CAEMA

RECEITAS INCREMENTAIS

ANO	CONSUMO DE ENERGIA ECONOMIZADO (R\$ 1,00)	CUSTO DO TRANSPORTE COM A REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO (R\$ 1,00)	RECEITAS TOTAIS (R\$ 1,00)
1	265.585,19	51.851,15	317.436,34
2	297.535,09	53.988,29	351.523,38
3	333.328,56	56.213,51	389.542,08
4	373.427,99	58.530,45	431.958,45
5	418.351,38	60.942,89	479.294,27
6	468.679,05	63.454,77	532.133,82
7	525.061,14	66.070,17	591.131,31
8	588.225,99	68.793,38	657.019,37
9	658.989,58	71.628,82	730.618,40
10	738.266,03	74.581,13	812.847,16
11	827.079,43	77.655,13	904.734,56
12	926.577,09	80.855,83	1.007.432,92
13	1.038.044,31	84.188,45	1.122.232,76
14	1.162.921,04	87.658,43	1.250.579,47
15	1.302.820,44	91.271,44	1.394.091,88
16	1.459.549,74	95.033,36	1.554.583,09
17	1.635.133,57	98.950,33	1.734.083,90
18	1.831.840,14	103.028,75	1.934.868,89
19	2.052.210,51	107.275,27	2.159.485,78
20	2.299.091,44	111.696,81	2.410.788,25

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.2.1.2 Valores presentes e total

Tabela 29 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – fluxo de caixa do investimento – ETE do Vinhais – CAEMA

FLUXO DE CAIXA DO INVESTIMENTO COM A COOGERAÇÃO DE ENERGIA					
ANO	DESPESAS TOTAIS (R\$ 1,00) Saída	RECEITA INCREMENTAL (R\$ 1,00) Entrada	RESULTADOS LIQUIDOS (R\$ 1,00) Fluxos	VALORES PRESENTES ANUAIS (R\$ 1,00)	VALORES PRESENTES ACUMULADOS (R\$ 1,00)
00			-2.612.855,70	-2.612.855,70	-2.612.855,70
01	373.541,07	317.436,34	-56.104,73	-62.276,25	-2.675.131,95
02	378.244,21	351.523,38	-26.720,83	-32.922,74	-2.708.054,69
03	383.158,99	389.542,08	6.383,08	8.729,70	-2.699.324,99
04	388.294,94	431.958,45	43.663,50	66.284,27	-2.633.040,72
05	393.662,01	479.294,27	85.632,27	144.295,35	-2.488.745,37
06	399.270,59	532.133,82	132.863,23	248.509,32	-2.240.236,06
07	405.131,56	591.131,31	185.999,75	386.165,28	-1.854.070,78
08	411.256,27	657.019,37	245.763,10	566.370,35	-1.287.700,43
09	417.656,59	730.618,40	312.961,81	800.567,86	-487.132,57
10	424.344,93	812.847,16	388.502,23	1.103.121,38	615.988,82
11	431.334,25	904.734,56	473.400,32	1.492.042,90	2.108.031,72
12	438.638,08	1.007.432,92	568.794,84	1.989.900,64	4.097.932,36
13	446.270,58	1.122.232,76	675.962,18	2.624.950,51	6.722.882,87
14	454.246,55	1.250.579,47	796.332,92	3.432.546,05	10.155.428,93
15	462.581,44	1.394.091,88	931.510,44	4.456.895,05	14.612.323,97
16	202.264,55	1.554.583,09	1.352.318,54	7.182.020,89	21.794.344,87
17	211.366,46	1.734.083,90	1.522.717,45	8.976.560,52	30.770.905,39
18	220.877,95	1.934.868,89	1.713.990,94	11.215.590,43	41.986.495,81
19	230.817,45	2.159.485,78	1.928.668,32	14.008.580,98	55.995.076,79
20	241.204,24	2.410.788,5	2.169.584,01	17.491.862,20	73.486.938,99

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.2.1.3 Taxas de lucratividade interna de retorno e do payback

Tabela 30 – Resultados das técnicas de análise dos investimentos na cogeração de energia para o arranjo – I

VPL DO PROJETO	101.392,60	R\$
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	11,00	%
TAXA DE LUCRATIVIDADE (TL)	29,13	R\$
TEMPO DE PAYBACK	8,27	anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Como este investimento na cogeração de energia, na ETE do Vinhais, teve um VPL positivo em R\$ 101.392,60, que resultou em um ganho correspondente a este

valor, em relação ao custo de oportunidade acumulado no período, com uma taxa de retorno do capital investido de 11,29 % maior do que a taxa desconto (TMA), garantindo desta forma a atratividade (TMA) do investimento e se pagando em 8 anos e 3 meses, com uma lucratividade de R\$ 29,30 por cada R\$ 1,00 investido, consideramos viável a sua implementação.

7.2.1.4 Retorno mínimo exigido (TMA)

Tabela 31 - Cálculo dos parâmetros do Método CAPM de análise do risco dos investimentos cogeração de energia com o aproveitamento do biogás – ETE do Vinhais - CAEMA

ANÁLISE DO RISCO DO INVESTIMENTO PELO MÉTODO CAPM				
Mês/Ano	Ibovespa (%)	Selic (%)	Meta da Selic Anual (%) (*) p/2020	Projeção anual do Índice IBOVESPA (%) p/ 2020
jan-19	0,10820	0,55130		
fev-19	-0,01860	0,50110		
mar-19	-0,00180	0,47590		
abr-19	0,00980	0,52620		
mai-19	0,00700	0,55130		
jun-19	0,04060	0,47590		
jul-19	0,00840	0,57640		
ago-19	-0,00670	0,51000		
set-19	0,03570	0,47170		
out-19	0,02360	0,48800		
nov-19	0,00950	0,38800	3,75	9,00
Cálculo do β				
Covariância			0,02835	
Variância			0,10598	
Beta β			0,27	

Fonte: BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2020⁵⁶

⁵⁶ BANCO CENTRAL DO BRASIL. Comitê de Política Monetária – COPOM. 229ª Reunião do CMN. (2020). Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/copom>. Acesso em: 16.mar.2020.

Tabela 32 – Cálculo da taxa de risco e análise de risco dos investimentos na cogeração de energia com o aproveitamento do biogás – ETE do Vinhais - CAEMA

Cálculo das Taxas de Risco			
	(%)	Prêmio de Risco Ajustado (%)	
Taxa de risco da economia (Selic) – Rf	9,00		
Taxa livre de risco (IBOVESPA) - Rm	3,75		
Retorno mínimo exigido – TMA	5,15	1,40	
RAZÃO ENTRE O RISCO E RETORNO PELO CAPM			
	%	%	OBSERVAÇÃO
TIR	11,29		
TMA (TAXA DE DESCONTO)	11,00	0,29	RENTÁVEL
TMA _{mín} (TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE)	5,15	1,40	TAXA _{mín} COM PRÊMIO DE RISCO AJUSTADO MENOR QUE TAXA DE DESCONTO

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Como a Taxa de Retorno (TIR) deste investimento em cogeração de energia na ETE do Vinhais é maior que a taxa de desconto Taxa de Desconto (TMA) fixada pela CAIXA, stakeholder deste projeto de investimento e por sua vez maior do que a taxa mínima de atratividade apurada para este empreendimento (TMA), para o risco β do modelo CAPM, de 5,15 %, além de rentável o investimento, tem um prêmio adicional de risco, ou seja, o seu risco é maior em 1,40 %, do que o risco livre da economia nacional, proporcional ao risco deste investimento em relação ao risco da Bolsa de Valores de São Paulo.

7.2.2 Análise econômico-financeira para a ETE do Jaracaty

7.2.2.1 Fluxo de caixa

Tabela 33 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - ETE do Jaracaty – CAEMA

Custo de Equipamentos (CIG)				
Descrição dos equipamentos	UN.	QT.	P.UNIT. (R\$)	P.TOTAL (R\$)
1 - CPH com microturbina da microturbina Elliot TA45 de 45 kW	CJ	1	180.855,00	180.855,00
2 - Sistema de tratamento do biogás, com filtração e compressão, contendo unidade de condensação, dessulfurização, remoção de siloxanos e resfriamento, fabricado pela indústria ALBRECHT, para 377,4 kg/dia de CH ₄ .	CJ	1	412.302,83	412.302,83
3 - Gasômetro para armazenagem do biogás (a pressão de até 10 bar)	CJ	1	407.309,20	407.309,20
4 - Secador térmico rotativo de lodo da Albrecht Bruthus F 5.2.1- 33,5 kW.	CJ	1	1.203.869,80	1.203.869,80
TOTAL CIG				2.204.336,82

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 34– Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – pagamentos dos investimentos – ETE do Jaracaty – CAEMA

PAGAMENTOS DOS INVESTIMENTOS				
ANO	DESPESAS FINANCEIRAS (R\$ 1,00)		DESPESAS DE MANUTENÇÃO & OPERAÇÃO ^(*) (R\$ 1,00)	TOTAL DAS DESPESAS COM O INVESTIMENTO (R\$ 1,00)
	AMORTIZAÇÕES	TOTAIS		
1	94.704,40	226.964,61	88.173,47	315.138,08
2	100.386,67	226.964,61	92.141,28	319.105,89
3	106.409,87	226.964,61	96.287,64	323.252,25
4	112.794,46	226.964,61	100.620,58	327.585,19
5	119.562,13	226.964,61	105.148,51	332.113,12
6	126.735,85	226.964,61	109.880,19	336.844,80
7	134.340,00	226.964,61	114.824,80	341.789,41
8	142.400,40	226.964,61	119.991,91	346.956,53
9	150.944,43	226.964,61	125.391,55	352.356,16
10	160.001,09	226.964,61	131.034,17	357.998,78
11	169.601,16	226.964,61	136.930,71	363.895,32
12	179.777,23	226.964,61	143.092,59	370.057,20
13	190.563,86	226.964,61	149.531,76	376.496,37
14	201.997,70	226.964,61	156.260,68	383.225,30
15	214.117,56	226.964,61	163.292,42	390.257,03
16	0,00	0,00	170.640,57	170.640,57
17	0,00	0,00	178.319,40	178.319,40
18	0,00	0,00	186.343,77	186.343,77
19	0,00	0,00	194.729,24	194.729,24
20	0,00	0,00	203.492,06	203.492,06

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

(*) Operação e manutenção (O&M) calculado em 4% a.a. do investimento total, corrigido anualmente pela variação média do INPC estimada, para as projeções dos custos de operação e manutenção (2010-2019), de 4,50 %.

Tabela 35 – Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - receitas dos investimentos - ETE do Jaracaty – CAEMA

ANO	CONSUMO DE ENERGIA ECONOMIZADO (R\$ 1,00)	RECEITAS INCREMENTAIS	
		CUSTO DO TRANSPORTE COM A REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO (R\$ 1,00)	RECEITAS TOTAIS (R\$ 1,00)
1	233.064,56	51.851,15	284.915,70
2	261.102,22	53.988,29	315.090,51
3	292.512,82	56.213,51	348.726,33
4	327.702,11	58.530,45	386.232,57
5	367.124,68	60.942,89	428.067,57
6	411.289,78	63.454,77	474.744,55
7	460.767,94	66.070,17	526.838,11
8	516.198,32	68.793,38	584.991,70
9	578.296,98	71.628,82	649.925,80
10	647.866,11	74.581,13	722.447,24
11	725.804,40	77.655,13	803.459,53
12	813.118,67	80.855,83	893.974,50
13	910.936,84	84.188,45	995.125,29
14	1.020.522,54	87.658,43	1.108.180,98
15	1.143.291,41	91.271,44	1.234.562,84
16	1.280.829,36	95.033,36	1.375.862,72
17	1.434.913,14	98.950,33	1.533.863,47
18	1.607.533,19	103.028,75	1.710.561,93
19	1.800.919,43	107.275,27	1.908.194,70
20	2.017.570,03	111.696,81	2.129.266,85

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.2.2.2 Valores presentes e total

Tabela 36 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - fluxo de caixa do investimento - ETE do Jaracaty – CAEMA

ANO	DESPESA S TOTAIS (R\$ 1,00) Saída	RECEITA INCREMENTAL (R\$ 1,00) Entrada	RESULTADO S LIQUIDOS (R\$ 1,00) Fluxos	VALORES PRESENTES ANUAIS (R\$ 1,00)	VALORES PRESENTES ACUMULADOS (R\$ 1,00)
0			-2.204.336,82	-2.204.336,82	-2.204.336,82
1	15.138,08	284.915,70	-30.222,38	-33.546,84	-2.237.883,67
2	19.105,89	315.090,51	-4.015,38	-4.947,35	-2.242.831,02
3	23.252,25	348.726,33	25.474,08	34.839,15	-2.207.991,87
4	27.585,19	386.232,57	58.647,38	89.030,85	-2.118.961,02
5	32.113,12	428.067,57	95.954,45	161.688,84	-1.957.272,19
6	36.844,80	474.744,55	137.899,74	257.929,69	-1.699.342,50
7	41.789,41	526.838,11	185.048,70	384.190,74	-1.315.151,76
8	46.956,53	584.991,70	238.035,17	548.561,04	-766.590,72
9	52.356,16	649.925,80	297.569,64	761.194,12	-5.396,60
10	57.998,78	722.447,24	364.448,46	1.034.822,60	1.029.426,00
11	63.895,32	803.459,53	439.564,21	1.385.399,71	2.414.825,71
12	70.057,20	893.974,50	523.917,30	1.832.898,78	4.247.724,49
13	76.496,37	995.125,29	618.628,93	2.402.309,44	6.650.033,93
14	83.225,30	1.108.180,98	724.955,68	3.124.878,68	9.774.912,61
15	90.257,03	1.234.562,84	844.305,82	4.039.656,73	13.814.569,34
16	70.640,57	1.375.862,72	1.205.222,14	6.400.807,46	20.215.376,79
17	78.319,40	1.533.863,47	1.355.544,07	7.991.057,93	28.206.434,73
18	86.343,77	1.710.561,93	1.524.218,16	9.973.802,18	38.180.236,91
19	94.729,24	1.908.194,70	1.713.465,45	12.445.488,55	50.625.725,45
20	03.492,06	2.129.266,85	1.925.774,79	15.526.196,31	66.151.921,77

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.2.2.3 Taxas de lucratividade, interna de retorno e do payback

Tabela 37 - Cálculo da Análise Resultados das Técnicas de Análise dos Investimentos na Cogeração de Energia para o arranjo – I. – ETE do Jaracaty – CAEMA

TAXA DE DESCONTO (TMA)	11,00	%
VPL DO PROJETO	347.966,37	R\$
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	12,16	%
TAXA DE LUCRATIVIDADE (TL)	31,01	R\$
TEMPO DE PAYBACK	8,26	Anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Para este investimento na cogeração de energia, na ETE do Jaracaty, o VPL foi positivo em R\$ 347.966,37, resultando em um ganho deste valor em relação ao custo de oportunidade acumulado no período, com uma taxa de retorno do capital investido (TIR) de 12,16 % maior do que a taxa desconto (TMA), garantindo a atratividade (TMA) do investimento e se pagando, também, em 8 anos e 3 meses, com uma lucratividade de R\$ 31,01 por cada R\$ 1,00 investido. Desta forma, a implantação deste investimento se demonstra viável.

7.2.2.4 Retorno mínimo exigido (TMA)

O cálculo do retorno mínimo (TMA) exigido é o mesmo para o investimento na cogeração de energia da ETE do Vinhais, mostrado no item anterior. O que varia neste investimento é análise da rentabilidade, cujo resultado apresentamos na Tabela 39.

Tabela 38 - Cálculo da Taxa de Risco e Análise de Risco dos Investimentos na cogeração de energia com o aproveitamento do biogás – ETE do Jaracaty – CAEMA

RAZÃO ENTRE O RISCO E RETORNO PELO CAPM

	%	%	OBSERVAÇÃO
TIR (TAXA INTERNA DE RETORNO)	12,16		
TMA (TAXA DE DESCONTO)	11,00	1,16	RENTÁVEL
TMA _{min} (TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE)	5,15	1,40	TMA MÍNIMA COM PRÊMIO DE RISCO AJUSTADA, MENOR QUE TAXA DE DESCONTO

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A Taxa de Retorno (TIR) deste investimento em cogeração de energia na ETE do Jaracaty, 12,16 %, é maior que a taxa de desconto Taxa de Desconto (TMA) fixada pela CAIXA, financiadora deste projeto de investimento e, por sua vez, maior do que a taxa mínima de atratividade apurada para este empreendimento (TMA), para o risco β (0,27) do modelo CAPM, de 5,15 %, significando que este investimento, além de rentável, tem um prêmio adicional de risco, ou seja, o seu risco é maior em 1,40 %, do que o risco livre da economia nacional, proporcional ao risco deste investimento em relação ao risco da Bolsa de Valores de São Paulo.

7.2.3 Análise econômica financeira para a ETE do Bacanga

7.2.3.1 Fluxo de caixa

Tabela 39 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - ETE do Bacanga – CAEMA

Descrição dos equipamentos	Custo de Equipamentos (CIG)			
	UN	QT	P.UNIT	P.TOTAL
1 - CPH com microturbina da Capstone-CH30, para biogás, <i>grid connect</i> , marcação CE, de 30 kW	Cj	1	427.000,00	427.000,00
2 - Sistema de tratamento do biogás, com filtração e compressão, contendo unidade de condensação, dessulfurização, remoção de siloxanos e resfriamento., fabricado pela indústria ALBRECHT, para 377,4 kg/dia de CH ₄ .	Cj	1	974.767,83	974.767,83
3 - Gasômetro para armazenagem do biogás, a pressão de até 10 bar, com compressor das marca ALBRECHT.	Cj	1	397.221,04	397.221,04
4 - Secador térmico rotativo de lodo da Albrecht Bruthus F 5.2.1 2 kW.	Cj	1	974.767,83	974.767,83
TOTAL CIG				2.773.756,70

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 40 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - pagamentos dos investimentos - ETE do Bacanga – CAEMA
PAGAMENTOS DOS INVESTIMENTOS

ANO	DESPESAS FINANCEIRAS (R\$)			DESPESAS DE MANUTENÇÃO & OPERAÇÃO (R\$)	TOTAL DAS DESPESAS COM O INVESTIMENTO (R\$)
	AMORTIZAÇÕES	JUROS	TOTAIS		
1	119.168,25	66.425,40	285.593,66	110.950,27	396.543,92
2	126.318,35	59.275,31	285.593,66	115.943,03	401.536,69
3	133.897,45	51.696,21	285.593,66	121.160,47	406.754,12
4	141.931,30	43.662,36	285.593,66	126.612,69	412.206,34
5	150.447,18	35.146,48	285.593,66	132.310,26	417.903,91
6	159.474,01	26.119,65	285.593,66	138.264,22	423.857,88
7	169.042,45	16.551,21	285.593,66	144.486,11	430.079,77
8	179.184,99	06.408,66	285.593,66	150.987,98	436.581,64
9	189.936,09	95.657,56	285.593,66	157.782,44	443.376,10
10	201.332,26	84.261,40	285.593,66	164.882,65	450.476,31
11	213.412,19	72.181,46	285.593,66	172.302,37	457.896,03
12	226.216,93	59.376,73	285.593,66	180.055,98	465.649,64
13	239.789,94	45.803,72	285.593,66	188.158,50	473.752,16
14	254.177,34	31.416,32	285.593,66	196.625,63	482.219,29
15	269.427,8	16.165,68	285.593,66	205.473,79	491.067,44
16	0,00	0,00	0,00	214.720,11	2.720,11
17	0,00	0,00	0,00	224.382,51	224.382,51
18	0,00	0,00	0,00	234.479,72	234.479,72
19	0,00	0,00	0,00	245.031,31	245.031,31
20	0,00	0,00	0,00	256.057,72	256.057,72

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 41 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - receitas dos investimentos – ETE do Bacanga – CAEMA

ANO	CONSUMO DE ENERGIA ECONOMIZADO (R\$ 1,00)	RECEITAS INCREMENTAIS	
		CUSTO DO TRANSPORTE COM A REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO (R\$ 1,00)	RECEITAS TOTAIS (R\$ 1,00)
1	81.301,59	51.851,15	133.152,74
2	91.082,17	53.988,29	145.070,46
3	102.039,36	56.213,51	158.252,87
4	114.314,69	58.530,45	172.845,15
5	128.066,75	60.942,89	189.009,64
6	143.473,18	63.454,77	206.927,95
7	160.733,00	66.070,17	226.803,17
8	180.069,18	68.793,38	248.862,56
9	201.731,50	71.628,82	273.360,32
10	225.999,80	74.581,13	300.580,94
11	253.187,58	77.655,13	330.842,71
12	283.646,05	80.855,83	364.501,88
13	317.768,67	84.188,45	401.957,12
14	355.996,24	87.658,43	443.654,67
15	398.822,58	91.271,44	490.094,02
16	446.800,94	95.033,36	541.834,30
17	500.551,09	98.950,33	599.501,42
18	560.767,39	103.028,75	663.796,14
19	628.227,71	107.275,27	735.502,98
20	703.803,50	111.696,81	815.500,32

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.2.3.2 Valores presentes e total

Tabela 42 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - fluxo de caixa do investimento - ETE do Bacanga – CAEMA
FLUXO DE CAIXA DO INVESTIMENTO COM A COGERAÇÃO DE ENERGIA

ANO	DESPESAS TOTAIS (R\$ 1,00)	RECEITA INCREMENTAL (R\$ 1,00)	RESULTADOS LIQUIDOS (R\$ 1,00)	VALORES PRESENTES ANUAIS (R\$ 1,00)	VALORES PRESENTES ACUMULADOS (R\$ 1,00)
	Saída	Entrada	Fluxos		
0			-2.773.756,70	-2.773.756,70	-2.773.756,70
1	396.543,92	133.152,74	-263.391,19	-292.364,22	-3.066.120,92
2	401.536,69	145.070,46	-256.466,23	-315.992,04	-3.382.112,96
3	406.754,12	158.252,87	-248.501,25	-339.858,02	-3.721.970,98
4	412.206,34	172.845,15	-239.361,20	-363.367,15	-4.085.338,14
5	417.903,91	189.009,64	-228.894,27	-385.700,16	-4.471.038,30
6	423.857,88	206.927,95	-216.929,93	-405.748,90	-4.876.787,19
7	40.079,77	226.803,17	-203.276,59	-422.034,76	-5.298.821,96
8	436.581,64	248.862,56	-187.719,08	-432.605,72	-5.731.427,68
9	443.376,10	273.360,32	-170.015,78	-434.906,63	-6.166.334,31
10	450.476,31	300.580,94	-149.895,37	-425.616,07	-6.591.950,38
11	457.896,03	330.842,71	-127.053,32	-400.441,22	-6.992.391,60
12	465.649,64	364.501,88	-101.147,76	-353.860,44	-7.346.252,04
13	473.752,16	401.957,12	-71.795,04	-278.800,25	-7.625.052,28
14	482.219,29	443.654,67	-38.564,62	-166.230,51	-7.791.282,80
15	491.067,44	490.094,02	-973,42	-4.657,42	-7.795.940,22
16	214.720,11	541.834,30	327.114,19	1.737.268,90	-6.058.671,32
17	224.382,51	599.501,42	375.118,91	2.211.360,77	-3.847.310,55
18	234.479,72	663.796,14	429.316,42	2.809.254,68	-1.038.055,87
19	245.031,31	735.502,98	490.471,66	3.562.464,28	2.524.408,41
20	256.057,72	815.500,32	559.442,59	4.510.400,49	7.034.808,90

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.2.3.3 Taxas de lucratividade, interna de retorno e do payback

Tabela 43 - Cálculo da Análise Resultados das Técnicas de Análise dos Investimentos na Cogeração de Energia para o arranjo – I – ETE do Bacanga – CAEMA

TAXA DE DESCONTO (TMA)	11,00	%
VPL DO PROJETO	-3.878.125,18	R\$
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	-5,72	%
TAXA DE LUCRATIVIDADE (TL)	3,54	R\$
TEMPO DE PAYBACK	PROJETO INVIÁVEL	Anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Finalmente, para o investimento em cogeração de energia da ETE do Bacanga, obtivemos um VPL negativo, significando que este investimento apresenta uma perda de R\$ 3.878.125,18 em relação ao custo de oportunidade acumulado no período de 20 (vinte) anos, existindo alternativas melhores, de

investimento no mercado do que esta. Desta forma, concluímos que o mesmo não tem viabilidade econômico-financeira, dispensando a sua análise de risco.

7.3 Para o arranjo II

7.3.1 Análise econômico-financeira para a ETE do Vinhais

7.3.1.1 Fluxo de caixa

Tabela 44 - Cálculo dos Investimentos Anuais e dos Custos de Cogeração de Energia - arranjo II - ETE do Vinhais – CAEMA.

Custo de Equipamentos (CIG)				
Descrição dos equipamentos	UN.	QT.	P.UNIT. (R\$)	P.TOTAL (R\$)
1 - Motogerador do fabricante nacional CHP BRASIL, modelo CHP-60, potência elétrica 60 kVA / 48 kW	Cj	1	176.000,00	176.000,00
2 - Sistema de tratamento do biogás, com filtração e compressão, contendo unidade de condensação e dessulfurização do fabricante Awite, para 377,4 kg/dia de CH ₄ .	Cj	1	208.080,00	208.080,00
3 - Sistema de remoção de siloxanos com reator de siloxanos, do fabricante português AtlasSeis	Cj	1	182.067,60	182.067,60
4 - Gasômetro para armazenagem do biogás (a pressão de até 10 bar)	Cj	1	397.221,64	397.221,64
5 - Secador térmico rotativo de lodo da Albrecht Bruthus F 5.2.1 2 kW e sistema de aproveitamento do calor	Cj	1	974.767,83	974.767,83
TOTAL CIG				1.938.137,07

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 45 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II - pagamentos dos investimentos - ETE do Vinhais – CAEMA

ANO	DESPESAS FINANCEIRAS (R\$)			DESPESAS DE MANUTENÇÃO & OPERAÇÃO (R\$)	TOTAL DAS DESPESAS COM O INVESTIMENTO (R\$)
	AMORTIZAÇÕES	JUROS	TOTAIS		
1	83.267,73	116.288,22	199.555,95	77.525,48	277.081,43
2	88.263,79	111.292,16	199.555,95	81.014,13	280.570,08
3	93.559,62	105.996,33	199.555,95	84.659,77	284.215,72
4	99.173,19	100.382,76	199.555,95	88.469,45	288.025,40
5	105.123,58	94.432,36	199.555,95	92.450,58	292.006,53
6	111.431,00	88.124,95	199.555,95	96.610,86	296.166,81
7	118.116,86	81.439,09	199.555,95	100.958,34	300.514,29
8	125.203,87	74.352,08	199.555,95	105.501,47	305.057,42
9	132.716,10	66.839,85	199.555,95	110.249,04	309.804,99
10	140.679,07	58.876,88	199.555,95	115.210,24	314.766,19
11	149.119,81	50.436,14	199.555,95	120.394,70	319.950,65
12	158.067,00	41.488,95	199.555,95	125.812,47	325.368,42
13	167.551,02	32.004,93	199.555,95	131.474,03	331.029,98
14	177.604,08	21.951,86	199.555,95	137.390,36	336.946,31
15	188.260,33	11.295,62	199.555,95	143.572,92	343.128,87
16	0,00	0,00	0,00	150.033,71	150.033,71
17	0,00	0,00	0,00	156.785,22	156.785,22
18	0,00	0,00	0,00	163.840,56	163.840,56
19	0,00	0,00	0,00	171.213,38	171.213,38
20	0,00	0,00	0,00	178.917,98	178.917,98

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 46 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II - receitas dos investimentos - ETE do Vinhais – CAEMA

RECEITAS INCREMENTAIS

ANO	CONSUMO DE ENERGIA ECONOMIZADO (R\$ 1,00)	CUSTO DO TRANSPORTE COM A REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO (R\$ 1,00)	RECEITAS TOTAIS (R\$ 1,00)
1	265.585,19	51.851,15	317.436,34
2	297.535,09	53.988,29	351.523,38
3	333.328,56	56.213,51	389.542,08
4	373.427,99	58.530,45	431.958,45
5	418.351,38	60.942,89	479.294,27
6	468.679,05	63.454,77	532.133,82
7	525.061,14	66.070,17	591.131,31
8	588.225,99	68.793,38	657.019,37
9	658.989,58	71.628,82	730.618,40
10	738.266,03	74.581,13	812.847,16
11	827.079,43	77.655,13	904.734,56
12	926.577,09	80.855,83	1.007.432,92
13	1.038.044,31	84.188,45	1.122.232,76
14	1.162.921,04	87.658,43	1.250.579,47
15	1.302.820,44	91.271,44	1.394.091,88
16	1.459.549,74	95.033,36	1.554.583,09
17	1.635.133,57	98.950,33	1.734.083,90
18	1.831.840,14	103.028,75	1.934.868,89
19	2.052.210,51	107.275,27	2.159.485,78
20	2.299.091,44	111.696,81	2.410.788,25

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.3.1.2 Valores presentes e total

Tabela 47 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - arranjo II - fluxo de caixa do investimento - ETE do Vinhais – CAEMA

FLUXO DE CAIXA DO INVESTIMENTO COM A COOGERAÇÃO DE ENERGIA

ANO	DESPESAS TOTAIS (R\$ 1,00)	RECEITA INCREMENTAL (R\$ 1,00)	RESULTADOS LIQUIDOS (R\$ 1,00)	VALORES PRESENTES ANUAIS (R\$ 1,00)	VALORES PRESENTES ACUMULADOS (R\$ 1,00)
	Saída	Entrada	Fluxos		
0			-2.612.855,70	-2.612.855,70	-2.612.855,70
1	277.081,43	317.436,34	40.354,91	44.793,95	-2.568.061,75
2	280.570,08	351.523,38	70.953,30	87.421,56	-2.480.640,19
3	284.215,72	389.542,08	105.326,3	144.047,60	-2.336.592,60
4	288.025,40	431.958,45	143.933,04	218.500,49	-2.118.092,11
5	292.006,53	479.294,27	187.287,74	315.590,74	-1.802.501,37
6	296.166,81	532.133,82	235.967,01	441.356,13	-1.361.145,24
7	300.514,29	591.131,31	290.617,02	603.367,47	-757.777,77
8	305.057,42	657.019,37	351.961,95	811.109,60	53.331,84
9	309.804,99	730.618,40	420.813,41	1.076.456,25	1.129.788,09
10	314.766,19	812.847,16	498.080,97	1.414.261,55	2.544.049,64
11	319.950,65	904.734,56	584.783,91	1.843.096,95	4.387.146,59
12	325.368,42	1.007.432,92	682.064,50	2.386.168,96	6.773.315,55
13	331.029,98	1.122.232,76	791.202,78	3.072.462,08	9.845.777,62
14	336.946,31	1.250.579,47	913.633,16	3.938.161,83	13.783.939,46
15	343.128,87	1.394.091,88	1.050.963,00	5.028.426,54	18.812.365,99
16	150.033,71	1.554.583,09	1.404.549,39	7.459.413,39	26.271.779,38
17	156.785,22	1.734.083,90	1.577.298,68	9.298.321,95	35.570.101,33
18	163.840,56	1.934.868,89	1.771.028,33	11.588.817,60	47.158.918,93
19	171.213,38	2.159.485,78	1.988.272,40	14.441.505,83	61.600.424,76
20	178.917,98	2.410.788,25	2.231.870,26	17.994.033,38	79.594.458,15

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.3.1.3 Taxas de lucratividade interna de retorno

Tabela 48 - Cálculo da análise de resultados das técnicas de análise dos investimentos na cogeração de energia para o arranjo – II – ETE do Vinhais CAEMA

TAXA DE DESCONTO (TMA)	11,00	%
VPL DO PROJETO	1.566.674,84	R\$
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	13,62%	%
TAXA DE LUCRATIVIDADE (TL)	42,42	R\$
TEMPO DE PAYBACK	6,26	anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Para este investimento do Arranjo II, na cogeração de energia, na ETE do Vinhais, o VPL foi positivo em R\$ 1.566.674,84, resultando em um ganho correspondente a este valor em relação ao custo de oportunidade acumulado no período, com uma taxa de retorno do capital investido (TIR) de 13,62 %, maior do que a taxa desconto (TMA) do financiamento. Desta forma, com esta taxa de retorno garante a atratividade (TMA) do investimento e o investimento se paga em 6 anos e 3 meses

7.3.1.4 Retorno mínimo exigido (TMA)

Tabela 49 - Cálculo da taxa de risco e análise de risco dos investimentos na cogeração de energia com o aproveitamento do biogás – arranjo II – ETE do Vinhais – CAEMA

RAZÃO ENTRE O RISCO E RETORNO PELO CAPM			
	%	%	OBSERVAÇÃO
TIR	11,29		
TMA (TAXA DE DESCONTO)	11,00	0,29	RENTÁVEL
TMA_{min} (TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE)	5,15	1,40	TMA _{mínima} COM PRÊMIO DE RISCO AJUSTADA, MENOR QUE TAXA DE DESCONTO

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

A Taxa de Retorno (TIR) deste investimento em cogeração de energia, no arranjo II, na ETE do Vinhais, 11,29 %, é maior que a taxa de desconto Taxa de Desconto (TMA) fixada pela CAIXA, financiadora deste tipo de

projeto de investimento e, por sua vez, maior do que a taxa mínima de atratividade apurada para este empreendimento (TMA), para o risco β (0,27) do modelo CAPM, de 5,15%, significando que este investimento, além de rentável, tem um prêmio adicional de risco, ou seja, o seu risco é maior em 1,40 %, do que o risco livre da economia nacional, proporcional ao risco deste investimento em relação ao risco da Bolsa de Valores de São Paulo.

7.3.2 Análise econômico-financeira para a ETE do Jaracaty

7.3.2.1 Fluxo de caixa

Tabela 50 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II - ETE do Jaracaty - CAEMA

Custo de Equipamentos (CIG)

Descrição do equipamentos	UM	QT	P.UNIT. (R\$)	P.TOTAL (R\$)
1 - Motogerador do fabricante CPH, modelo CHP-60, potência elétrica 60 kVA / 48 kW.	CJ	1	176.000,00	176.000,00
2 - Sistema de tratamento do biogás, com filtração e compressão, contendo unidade de condensação e dessulfurização, fabricado pela indústria ALBRECHT, para 396,2 kg/dia de CH ₄ .	CJ	1	208.080,00	208.080,00
3 - Sistema de remoção de siloxanos contendo um reator de siloxanos, do fabricante português AtlasSeis	CJ	1	182.067,60	182.067,60
4 - Gasômetro para armazenagem do biogás (a pressão de até 10 bar).	Cj	1	407.309,20	407.309,20
5 - Secador térmico rotativo de lodo da Albrecht Bruthus F 5.2.1 2 kW.	CJ	1	1.203.869,80	1.203.869,80
TOTAL CIG				2.177.326,59

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 51 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II - pagamentos dos investimentos - ETE do Jaracaty – CAEMA

PAGAMENTOS DOS INVESTIMENTOS

ANO	DESPESAS FINANCEIRAS (R\$)			DESPESAS DE MANUTENÇÃO & OPERAÇÃO (R\$)	TOTAL DAS DESPESAS COM O INVESTIMENTO (R\$)
	AMORTIZAÇÕES	JUROS	TOTAIS		
1	93.543,97	30.639,60	224.183,56	87.093,06	311.276,63
2	99.156,61	125.026,96	224.183,56	91.012,25	315.195,82
3	105.106,00	119.077,56	224.183,56	95.107,80	319.291,37
4	111.412,36	112.771,20	224.183,56	99.387,65	323.571,22
5	118.097,10	106.086,46	224.183,56	103.860,10	328.043,66
6	125.182,93	99.000,63	224.183,56	108.533,80	332.717,37
7	132.693,91	91.489,66	224.183,56	113.417,82	337.601,39
8	140.655,54	83.528,02	224.183,56	118.521,63	342.705,19
9	149.094,87	75.088,69	224.183,56	123.855,10	348.038,66
10	158.040,57	66.143,00	224.183,56	129.428,58	353.612,14
11	167.523,00	56.660,56	224.183,56	135.252,86	359.436,43
12	177.574,38	46.609,18	224.183,56	141.339,24	365.522,81
13	188.228,84	35.954,72	224.183,56	147.699,51	371.883,07
14	199.522,57	24.660,99	224.183,56	154.345,99	378.529,55
15	211.493,93	12.689,64	224.183,56	161.291,56	85.475,12
16	0,00	0,00	0,00	168.549,68	168.549,68
17	0,00	0,00	0,00	176.134,41	176.134,41
18	0,00	0,00	0,00	184.060,46	184.060,46
19	0,00	0,00	0,00	192.343,18	192.343,18
20	0,00	0,00	0,00	200.998,63	200.998,63

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 52 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II - receitas dos investimentos - ETE do Jaracaty – CAEMA

RECEITAS INCREMENTAIS			
ANO	CONSUMO DE ENERGIA ECONOMIZADO (R\$ 1,00)	CUSTO DO TRANSPORTE COM A REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO (R\$ 1,00)	RECEITAS TOTAIS (R\$ 1,00)
1	233.064,56	51.851,15	284.915,70
2	261.102,22	53.988,29	315.090,51
3	292.512,82	56.213,51	348.726,3
4	327.702,11	58.530,45	386.232,57
5	367.124,68	60.942,89	428.067,57
6	411.289,78	63.454,77	474.744,55
7	460.767,94	66.070,17	526.838,11
8	516.198,32	68.793,38	584.991,70
9	578.296,98	71.628,82	649.925,80
10	647.866,11	74.581,13	722.447,24
11	725.804,40	77.655,13	803.459,53
12	813.118,67	80.855,83	893.974,50
13	910.936,84	84.188,45	995.125,29
14	1.020.522,54	87.658,43	1.108.180,98
15	1.143.291,41	91.271,44	1.234.562,84
16	1.280.829,36	95.033,36	1.375.862,72
17	1.434.913,14	98.950,33	1.533.863,47
18	1.607.533,19	103.028,75	1.710.561,93
19	1.800.919,43	107.275,27	1.908.194,70
20	2.017.570,03	111.696,81	2.129.266,85

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.3.2.2 Valores presentes e total

Tabela 53 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - arranjo II - fluxo de caixa do investimento - ETE do Jaracaty – CAEMA
FLUXO DE CAIXA DO INVESTIMENTO COM A COOGERAÇÃO DE ENERGIA

ANO	DESPESA S TOTAIS (R\$ 1,00) Saída	RECEITA INCREMENTAL (R\$ 1,00) Entrada	RESULTADOS LIQUIDOS (R\$ 1,00) Fluxos	VALORES PRESENTES ANUAIS (R\$ 1,00)	VALORES PRESENTES ACUMULADOS (R\$ 1,00)
0			- 2.177.326,59	- 2.177.326,59	- 2.177.326,59
1	311.276,63	284.915,70	- 26.360,92	- 29.260,63	- 2.206.587,22
2	315.195,82	315.090,51	- 105,31	- 129,75	- 2.206.716,96
3	319.291,37	348.726,33	29.434,97	40.256,17	- 2.166.460,79
4	323.571,22	386.232,57	62.661,35	95.124,34	- 2.071.336,45
5	328.043,66	428.067,57	100.023,91	168.546,11	- 1.902.790,34
6	332.717,37	474.744,55	142.027,18	265.649,70	- 1.637.140,64
7	337.601,39	526.838,11	189.236,72	392.885,74	- 1.244.254,90
8	342.705,19	584.991,70	242.286,51	558.358,41	- 685.896,49
9	348.038,66	649.925,80	301.887,14	772.238,44	86.341,95
10	353.612,14	722.447,24	368.835,10	1.047.278,11	1.133.620,06
11	359.436,43	803.459,53	444.023,10	1.399.453,05	2.533.073,11
12	365.522,81	893.974,50	528.451,69	1.848.762,13	4.381.835,24
13	371.883,07	995.125,29	623.242,22	2.420.224,15	6.802.059,40
14	378.529,55	1.108.180,98	729.651,43	3.145.119,41	9.947.178,81
15	385.475,12	1.234.562,84	849.087,72	4.062.536,19	14.009.715,00
16	168.549,68	1.375.862,72	1.207.313,04	6.411.911,99	20.421.626,99
17	176.134,41	1.533.863,47	1.357.729,05	8.003.938,64	28.425.565,62
18	184.060,46	1.710.561,93	1.526.501,47	9.988.743,15	38.414.308,78
19	192.343,18	1.908.194,70	1.715.851,51	12.462.819,33	50.877.128,11
20	200.998,63	2.129.266,85	1.928.268,22	15.546.299,15	66.423.427,26

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.3.2.3 Taxas de lucratividade interna de retorno

Tabela 54 - Cálculo da Análise Resultados das técnicas de análise dos investimentos na cogeração de energia para o Arranjo – II – ETE do Jaracaty – CAEMA

TAXA DE DESCONTO (TMA)	11,00	%
VPL DO PROJETO	406.624,32	R\$
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	12,37	%
TAXA DE LUCRATIVIDADE (TL)	31,51	R\$
TEMPO DE PAYBACK	7,28	anos

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Este investimento na cogeração de energia, para o arranjo II, na ETE do Jaracaty, o VPL resultou positivo em R\$ 406.624,32, gerando um ganho deste valor em relação ao custo de oportunidade acumulado no período, com uma taxa de retorno do capital investido (TIR) de 12,37 %, maior do que a taxa desconto (TMA), garantindo a atratividade (TMA) do investimento e se pagando,

também, em 7 anos e 3 meses, com uma lucratividade de R\$ 31,51 por cada R\$ 1,00 investido. Desta forma, a implantação deste investimento se demonstra viável.

7.3.3.4 Retorno mínimo exigido (TMA)

Tabela 55 - Cálculo da taxa de risco e análise de risco dos investimentos na cogeração de energia com o aproveitamento do biogás – arranjo II - ETE do Jaracaty – CAEMA

RAZÃO ENTRE O RISCO E RETORNO PELO CAPM			
	%	%	OBSERVAÇÃO
TIR	12,16		
TMA (TAXA DE DESCONTO)	11,00	1,16	RENTÁVEL
TMA_{min} (TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE)	5,15	1,40	TMA MÍNIMA COM PRÊMIO DE RISCO AJUSTADA, MENOR QUE TAXA DE DESCONTO

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Já para este investimento em cogeração de energia, no Arranjo II, na ETE – Vinhais, a Taxa de Retorno (TIR) de 12,16 %, é maior que a taxa de desconto Taxa de Desconto (TMA) fixada pela CAIXA, financiadora deste de projeto de investimento para o setor de saneamento e, por sua vez, maior do que a taxa mínima de atratividade apurada para este empreendimento (TMA), para o risco β (0,27) do modelo *CAPM*, de 5,15 %, provando que este investimento, além de rentável, tem um prêmio adicional de risco, ou seja, o seu risco é maior em 1,40 %, do que o risco livre da economia nacional, proporcional ao risco deste investimento em relação ao risco da Bolsa de Valores de São Paulo.

7.3.3 Análise econômico-financeira para a ETE do Bacanga

7.3.3.1 Fluxo de caixa

Tabela 56 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – Arranjo II - ETE do Bacanga – CAEMA

Custo de Equipamentos (CIG)				
Descrição dos equipamentos	UN	QT	P.UNIT	P.TOTAL
1 - Motogerador da CPH, modelo CPH-60, para biogás, potência elétrica 60 kVA / 48 kW.	Cj	1	176.000,00	176.000,00
2 - Sistema de tratamento do biogás, com filtração e compressão, contendo unidade de condensação, dessulfurização, fabricado pela indústria Awite, para 123,20 m³/dia de CH ₄ .	Cj	1	208.080,00	208.080,00
3- Sistema de remoção de siloxanos com reator de siloxanos, fabricado pela indústria portuguesa AtlasSeis, para 123,20 m³/dia de CH ₄ .	Cj	1	182.067,60	182.067,60
4- Gasômetro para armazenagem do biogás, a pressão de até 10 bar, com compressor das marca ALBRECHT.	Cj	1	397.221,04	397.221,04
5 - Secador térmico rotativo de lodo da Albrecht Bruthus F 5.2.1 2 kW	Cj	1	974.767,83	974.767,83
TOTAL CIG				1.938.136,47

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 57 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás – arranjo II - pagamentos dos investimentos - ETE do Bacanga – CAEMA

PAGAMENTOS DOS INVESTIMENTOS

ANO	DESPESAS FINANCEIRAS (R\$)			DESPESAS DE MANUTENÇÃO & OPERAÇÃO (R\$)	TOTAL DAS DESPESAS COM O INVESTIMENTO (R\$)
	AMORTIZAÇÕES	JUROS	TOTAIS		
1	83.267,70	116.288,19	199.555,89	77.525,46	277.081,35
2	88.263,76	111.292,13	199.555,89	81.014,10	280.569,99
3	93.559,59	105.996,30	199.555,89	84.659,74	284.215,63
4	99.173,16	100.382,73	199.555,89	88.469,43	288.025,32
5	105.123,55	94.432,34	199.555,89	92.450,55	292.006,44
6	111.430,97	88.124,92	199.555,89	96.610,83	296.166,71
7	118.116,82	81.439,06	199.555,89	100.958,31	300.514,20
8	125.203,83	74.352,06	199.555,89	105.501,44	305.057,33
9	132.716,06	66.839,83	199.555,89	110.249,00	309.804,89
10	140.679,03	58.876,86	199.555,89	115.210,21	314.766,10
11	149.119,77	50.436,12	199.555,89	120.394,67	319.950,55
12	158.066,95	41.488,93	199.555,89	125.812,43	325.368,31
13	167.550,97	32.004,92	199.555,89	131.473,99	331.029,87
14	177.604,03	21.951,86	199.555,89	137.390,32	336.946,20
15	188.260,27	11.295,62	199.555,89	143.572,88	343.128,77
16	0,00	0,00	0,00	150.033,66	150.033,66
17	0,00	0,00	0,00	156.785,17	156.785,17
18	0,00	0,00	0,00	163.840,51	163.840,51
19	0,00	0,00	0,00	171.213,33	171.213,33
20	0,00	0,00	0,00	178.917,93	178.917,93

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 58 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - arranjo II - receitas dos investimentos - ETE do Bacanga – CAEMA

RECEITAS INCREMENTAIS

ANO	CONSUMO DE ENERGIA ECONOMIZADO (R\$ 1,00)	CUSTO DO TRANSPORTE COM A REDUÇÃO DO VOLUME DO LODO (R\$ 1,00)	RECEITAS TOTAIS (R\$ 1,00)
1	81.301,59	51.851,15	133.152,74
2	91.082,17	53.988,29	145.070,46
3	102.039,36	56.213,51	158.252,87
4	114.314,69	58.530,45	172.845,15
5	128.066,75	60.942,89	189.009,64
6	143.473,18	63.454,77	206.927,95
7	160.733,00	66.070,17	226.803,17
8	180.069,18	68.793,38	248.862,56
9	201.731,50	71.628,82	273.360,32
10	225.999,80	74.581,13	300.580,94
11	253.187,58	77.655,13	330.842,71
12	283.646,05	80.855,83	364.501,88
13	317.768,67	84.188,45	401.957,12
14	355.996,24	87.658,43	443.654,67
15	398.822,58	91.271,44	490.094,02
16	446.800,94	95.033,36	541.834,30
17	500.551,09	98.950,33	599.501,42
18	560.767,39	103.028,75	663.796,14
19	628.227,71	107.275,27	735.502,98
20	703.803,50	111.696,81	815.500,32

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.3.3.2 Valores presentes e total

Tabela 59 - Cálculo dos investimentos anuais e dos custos de produção do biogás - arranjo II - fluxo de caixa do investimento - ETE do Bacanga – CAEMA
FLUXO DE CAIXA DO INVESTIMENTO COM A COOGERAÇÃO DE ENERGIA

ANO	DESPESAS TOTAIS (R\$ 1,00)	RECEITA INCREMENTAL (R\$ 1,00)	RESULTADO S LIQUIDOS (R\$ 1,00)	VALORES PRESENTES ANUAIS (R\$ 1,00)	VALORES PRESENTES ACUMULADOS (R\$ 1,00)
	Saída	Entrada	Fluxos		
0			-1.938.136,47	-1.938.136,47	-1.938.136,47
1	277.081,35	133.152,74	-143.928,61	-159.760,76	-2.097.897,23
2	280.569,99	145.070,46	-135.499,54	-166.948,98	-2.264.846,21
3	284.215,63	158.252,87	-125.962,76	-172.270,57	-2.437.116,78
4	288.025,32	172.845,15	-115.180,17	-174.851,61	-2.611.968,39
5	292.006,44	189.009,64	-102.996,80	-173.555,59	-2.785.523,98
6	296.166,71	206.927,95	-89.238,77	-166.913,49	-2.952.437,48
7	300.514,20	226.803,17	-73.711,03	-153.035,90	-3.105.473,37
8	305.057,33	248.862,56	-56.194,77	-129.502,97	-3.234.976,34
9	309.804,89	273.360,32	-36.444,57	-93.226,54	-3.328.202,89
10	314.766,10	300.580,94	-14.185,16	-40.277,63	-3.368.480,52
11	319.950,55	330.842,71	10.892,16	34.329,44	-3.334.151,08
12	325.368,31	364.501,88	39.133,56	136.906,83	-3.197.244,25
13	331.029,87	401.957,12	70.927,24	275.430,36	-2.921.813,89
14	336.946,20	443.654,67	106.708,47	459.960,55	-2.461.853,35
15	343.128,77	490.094,02	146.965,25	703.168,40	-1.758.684,95
16	150.033,66	541.834,30	391.800,64	2.080.811,78	322.126,84
17	156.785,17	599.501,42	442.716,25	2.609.853,33	2.931.980,17
18	163.840,51	663.796,14	499.955,63	3.271.486,13	6.203.466,30
19	171.213,33	735.502,98	564.289,65	4.098.629,66	10.302.095,96
20	178.917,93	815.500,32	636.582,39	5.132.325,51	15.434.421,47

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

7.3.3.3 Taxas de lucratividade interna de retorno

Tabela 60 - Cálculo da análise de resultados das técnicas de análise dos investimentos na cogeração de energia para o arranjo – II – ETE do Bacanga – CAEMA

TAXA DE DESCONTO (TMA)	11,00	%
VPL DO PROJETO	-2.063.413,94	R\$
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	0,17	%
TAXA DE LUCRATIVIDADE (TL)	8,96	R\$
TEMPO DE <i>PAYBACK</i>	PROJETO INVIÁVEL	

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Por fim, obtivemos um VPL negativo, para o investimento em cogeração de energia do arranjo II, na ETE do Bacanga indicando que este investimento apresenta uma perda de R\$ 2.063.413,94 em relação ao custo de

oportunidade acumulado, no período de 20 (vinte) anos, existindo alternativas melhores, de investimento no mercado do que esta. Concluimos que o mesmo não tem viabilidade econômica financeira, dispensando a sua análise de risco.

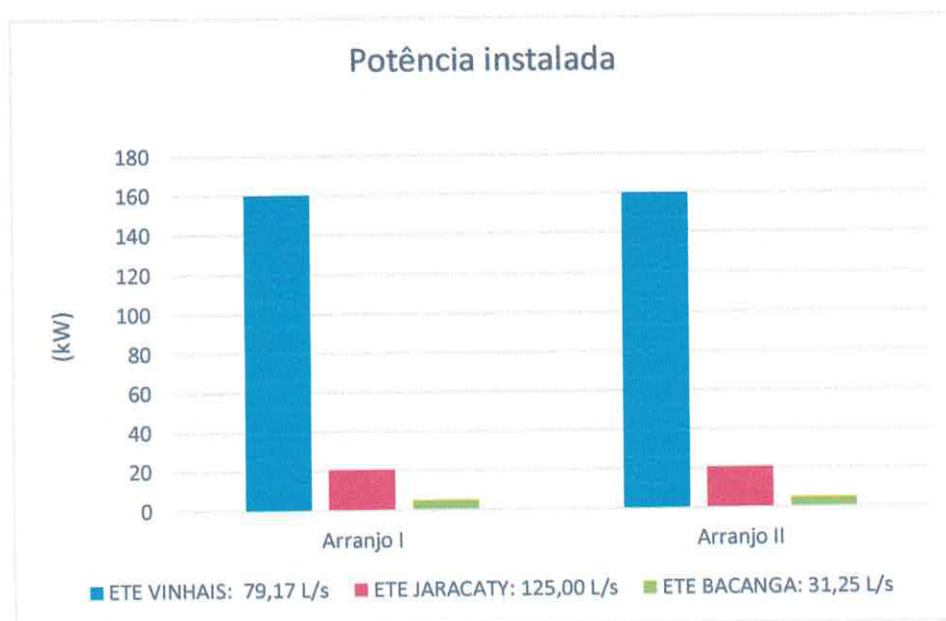
8 DISCUSSÃO

É de se esperar que a viabilidade da cogeração de energia elétrica a partir do biogás produzido pelo processo de digestão dos esgotos domésticos, nas estações de tratamento de esgotos – ETEs, esteja diretamente relacionada à tarifa de energia elétrica paga no tipo de consumo do setor do serviço público de saneamento básico no Brasil, daí termos, também, avaliado os resultados obtidos no Capítulos 6 e 7 deste estudo, sob o aspecto da geração da energia elétrica e potências instaladas das ETEs de diversas capacidades de tratamento.

8.1 Aspectos Energéticos

Apresentamos uma síntese dos principais resultados obtidos no presente trabalho. Destacamos, inicialmente, os resultados concernentes ao aspecto energético nos gráficos mostrados a seguir. O primeiro indicador energético é a potência instalada por capacidade operacional de tratamento e por arranjo técnico, para cada ETE objeto deste trabalho, cujos resultados são apresentados no Gráfico 1, a seguir.

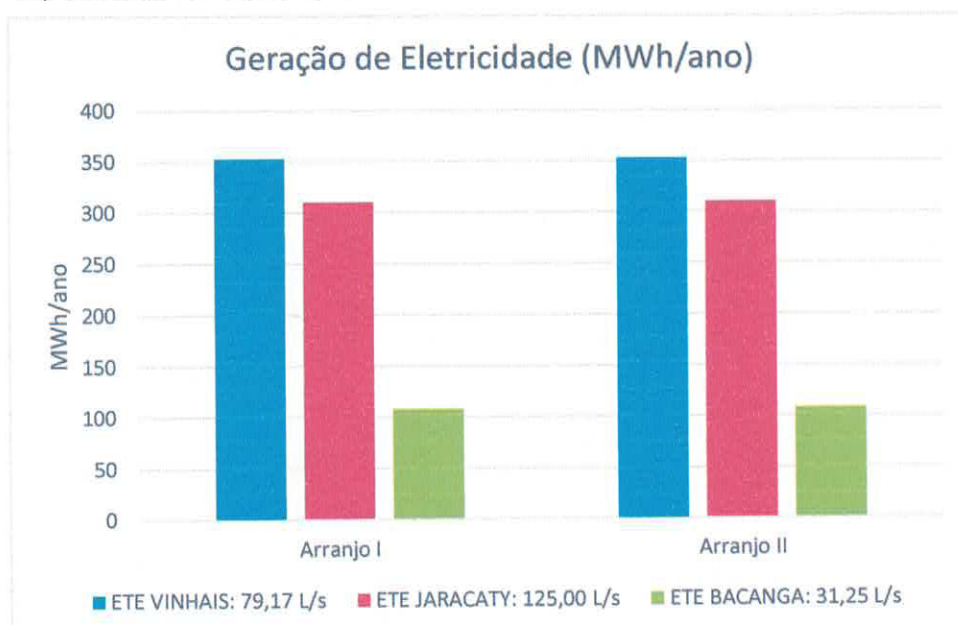
Gráfico 1 – Potência instalada por arranjo técnico e de acordo com a capacidade de tratamento da ETE



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

O segundo indicador importante é o de geração de eletricidade, para o qual apresentamos, no Gráfico 2, abaixo, os resultados em MWh/ano por cada ETE estudada, segundo as suas capacidades de tratamento operacional e os arranjos técnicos adotados.

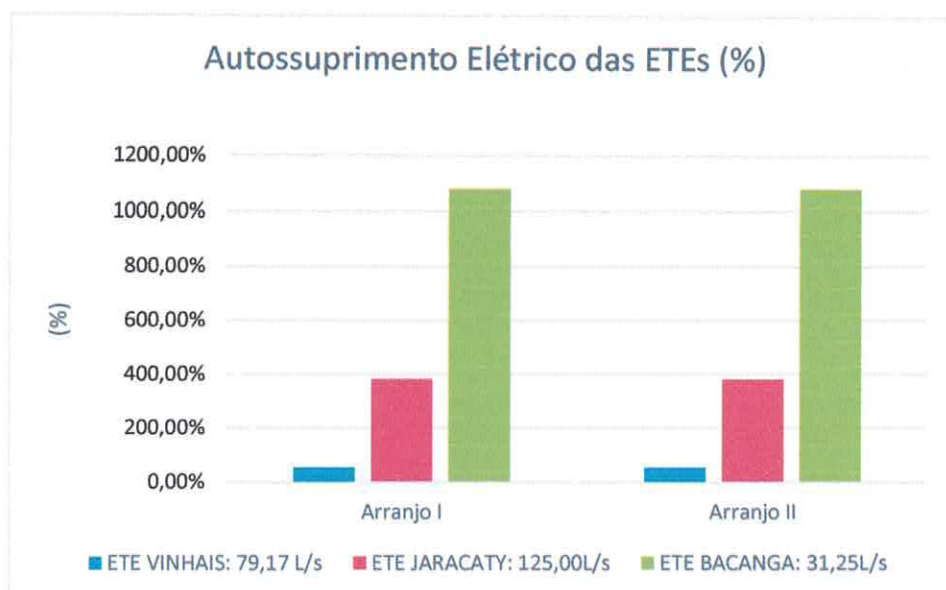
Gráfico 2 – Geração de energia elétrica por arranjo técnico, de acordo com a capacidade de tratamento da ETE



Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Por fim, apresentamos o indicador de autossuprimento de energia elétrica, que representa a relação entre a energia elétrica gerada a partir do biometano e o consumo de energia elétrica pela ETE em todos os processos de tratamento anaeróbico dos esgotos domésticos. Está demonstrado no Gráfico 3, da página seguinte, para cada ETE estudada, com sua respectiva capacidade de tratamento operacional e nos dois arranjos técnicos adotados.

Gráfico 3 – Autossuprimento de energia elétrica por arranjo, de acordo com a capacidade de tratamento da ETE



Fonte:

Elaborado pelo autor, 2019

Cabe também, destacar que o auto suprimento elevado da ETE – Jaracaty de 380,46 %, para os dois arranjos técnicos de cogeração de energia, além de estar relacionado com a baixa utilização da potência instalada nesta ETE e consequente baixo consumo de energia elétrica para a sua operação, implica na forma “on grid” de conexão às instalações de transmissão da concessionária de distribuição de energia elétrica, como estabelecido pela Resolução Normativa da ANEEL⁵⁷, diferentemente da instalação da ETE – Vinhais, com auto suprimento de energia elétrica de 54,52%, que deve ser instalada em regime de emergência.

No presente trabalho, também, analisamos os parâmetros do custo de instalação e do custo nivelado (LCOE) para cada arranjo e para capacidade de tratamento de cada estação de tratamento de esgotos - ETE estudada. apresentamos nas Tabelas 62 e 63 seguintes, os resultados obtidos para cada arranjo de cogeração de energia e para cada ETE.

⁵⁷ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELETRICA – ANEEL. Resolução Homologatória ANEEL nº 424 de 17 de dezembro de 2010. Aprova a Revisão 2 dos Módulos 1, 2, 3, 5, 6, e 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 130, v. 147, n. 244. 22 de dezembro de 2010. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010424.pdf>. Acesso em: 20. mar.2020.

Tabela 61 - Custo de instalação por escala e arranjo (R\$/kW)

ETE	VAZÃO TRATADA (L/s)	CUSTO DE INSTALAÇÃO (R\$/kW)	
		ARRANJO	
		Tipo I	Tipo II
VINHAIS	79,17	52.257,11	38.762,74
JARACATY	125,00	55.108,42	54.433,16
BACANGA	31,25	92.458,55	64.604,55

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 62 - Custo nivelado por escala e arranjo (R\$/MWh)

ETE	VAZÃO TRATADA (L/s)	LCOE (R\$/MWh)	
		ARRANJO	
		Tipo I	Tipo II
VINHAIS	79,17	834,98	619,36
JARACATY	125,00	802,72	792,89
BACANGA	31,25	0,80	2.023,25

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Observamos que acima da capacidade de tratamento de 79 L/s (ETEs Vinhais e Jaracaty), todos os dois arranjos técnicos de cogeração de eletricidade, apresentam valores do custo de instalação e do custo nivelado (*LCOE*) equiparáveis com os praticados no mundo, para projetos de biogás, que variam de 5.140,30 a 35.134,10 R\$/kW e 192,91 a 976,62 R\$/MWh (REN, 2019), como mostramos nas Tabelas 64 e 65 e na Figura 21 das páginas seguintes, respectivamente. Sendo que o investimento em cogeração de energia para a ETE do Bacanga, com capacidade de tratamento abaixo de 79 L/s, apresenta esses custos, com valores muito mais elevados do que os mesmos custos do mercado internacional.

Desta forma, este último investimento é inviável, também, sob o aspecto de geração de energia elétrica.

Tabela 63 - Custo de instalação total internacional (USD/kW)
Custo total de instalação para geração de bioenergia (2018 USD/kW)

5º percentil	1.279,00
95º percentil	8.742,00
Média ponderada	2.105,00

Fonte: Adaptado pelo autor de INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA, 2019.⁵⁸

Tabela 64 - Custo nivelado (LCOE) internacional, para bioenergia (USD/kW)

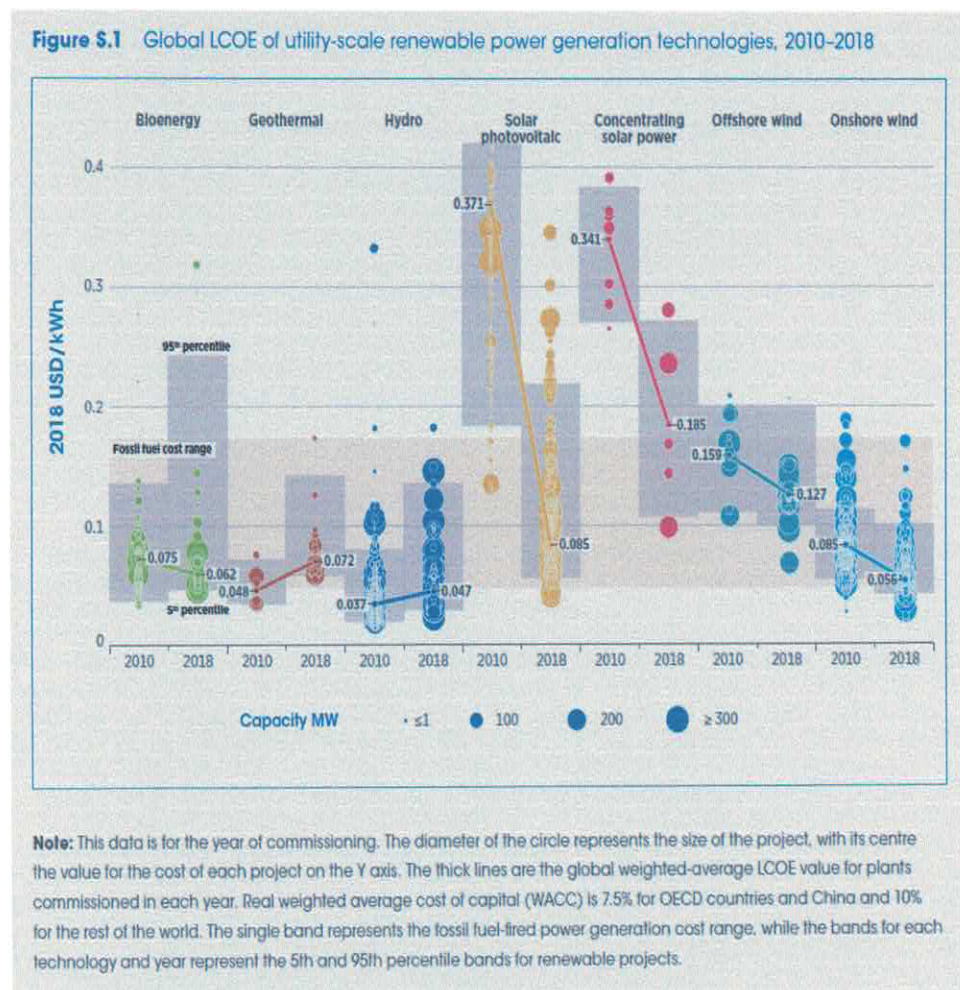
LCOE (2018)	Bioenergia (R\$/MWh)
5º percentil	192,91
95º percentil	976,62
Média ponderada	245,16

Fonte: Adaptado pelo autor de INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY- IRENA, 2018.⁵⁹

⁵⁸ INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY- IRENA, 2018, passim.

⁵⁹ INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY IRENA, op.cit., p.29 e 30.

Figura 17 - LCOE global, por escala de serviços de tecnologias de geração de energia renovável



Fonte: Adaptado pelo autor de INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY -- IRENA, 2019.⁶⁰

⁶⁰ INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA, 2019, passim.

8.2 Aspectos econômico-financeiros

Os indicadores da análise econômico-financeiros e os parâmetros de análise de risco dos investimentos em cogeração de energia de fonte biogásosa, para cada arranjo técnico e para cada ETE estudada, são apresentados de forma resumida, com seus resultados apurados no Capítulo 7 deste trabalho, nas Tabelas 64 e 65 seguintes.

Os resultados apresentados neste item são comentados comparativamente, com as correspondentes interpretações, indicando os parâmetros que podem ter variado de acordo com a realidade de cada ETE e sua localização, e influenciado a escala mínima de viabilidade das ETEs. Os parâmetros principais, considerados na análise de viabilidade, para todos os arranjos técnicos de cogeração de energia, foram: produção do biogás por vazão afluente de esgotos; tarifa de energia elétrica economizada; custo de transporte da disposição final do lodo e taxas e impostos sobre os equipamentos (IPI e Imposto de Importação).

Tabela 65 – Parâmetros econômico-financeiros por arranjo técnico e de acordo com a ETE do Vinhais

INDICADORES	UN	ETE VINHAIS	
		ARRANJO I	ARRANJO II
TAXA DE DESCONTO (TMA)	%	11,00	11,00
VPL DO PROJETO	R\$	101.32,60	1.566.674,84
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	%	11,29	13,62
TAXA DE LUCRATIVIDADE (TL)	R\$	29,13	42,42
TEMPO DE <i>PAYBACK</i>	anos	8,27	6,26

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 66 – Parâmetros econômico-financeiros por arranjo técnico e de acordo com a ETE do Jaracaty

INDICADORES	UM	ETE JARACATY	
		ARRANJO I	ARRANJO II
TAXA DE DESCONTO (TMA)	%	11,00	11,00
VPL DO PROJETO	R\$	347.966,37	406.624,32
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	%	12,16	12,37
TAXA DE LUCRATIVIDADE (TL)	R\$	31,01	31,51
TEMPO DE <i>PAYBACK</i>	anos	8,26	7,28

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 67 – Parâmetros econômicos financeiros por arranjo técnico e de acordo com a ETE do Bacanga

INDICADORES	UM	ETE BACANGA	
		ARRANJO I	ARRANJO II
TAXA DE DESCONTO (TMA)	%	11,00	11,00
VPL DO PROJETO	R\$	-3.878.125,18	-2.063.413,94
TAXA INTERNA DE RETORNO (TIR)	%	-5,72	0,17
TAXA DE LUCRATIVIDADE (TL)	R\$	3,54	8,96
TEMPO DE <i>PAYBACK</i>	Anos	PROJETO INVIÁVEL	PROJETO INVIÁVEL

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Os investimentos em cogeração de energia, tendo como fonte o biometano produzido pelos digestores do tipo RAFA, nas três ETEs estudadas só tem viabilidade econômico-financeira, para uma escala de capacidade de tratamento de 79 L/s, nos dois arranjos técnicos adotados de esgotos domésticos. A contribuição de esgotos tratados é um parâmetro com grande influência na viabilidade econômico-financeira e técnica, como foi visto no item anterior. No que pese, as três ETEs estudadas apresentarem capacidades de tratamento de final de plano (30 anos) maiores que 200 L/s, em razão de ausência de redes coletoras, interceptores, elevatórias e emissários, para que a contribuição afluyente aos reatores anaeróbios pudesse, operados a sua capacidade instalada, produzir quantidade de biogás que viabilizasse a geração de energia elétrica e térmica.

Outro fator limitante na produção do biogás foi a baixa DBO e consequente DQO da contribuição de esgotos afluyente às ETEs, verificada nos

dados fornecidos pela CAEMA, que diagnosticamos como possível causa, um tempo de detenção dos esgotos, no poço de sucção da elevatória do esgoto bruto das ETEs, superior ao da Norma – NBR12208,⁶¹ provocando uma biodigestão primária aeróbia nestes dispositivos; e reduzindo a DBO dos esgotos afluentes aos reatores anaeróbios do tipo RAFA, alterando as suas eficiências e reduzindo a produção de biogás e do lodo desaguado, que inviabiliza o aproveitamento da energia térmica gerada pelas microturbinas e pelos motogeradores a biogás, na secagem térmica do lodo desaguado.

A baixa utilização da potências elétricas instaladas, foi outro fator limitante das viabilidades técnicas e econômico-financeiras, na cogeração de energia pelas ETEs estudadas. Uma vez que, a operação de motores e equipamentos elétricos de elevada potência nominal a baixas demandas, além de diminuir a vida útil dos mesmos, aumenta os custos de depreciação e, no caso deste trabalho, influiu na precificação dos custos do consumo de energia elétrica no cálculo do auto suprimento de energia da ETEs, levando a resultados inconsistentes e irreais.

Considerando os fatores acima elencados, apenas as duas estações de tratamento (com capacidade de tratamento de mais de 79 L/s), das três estudadas, tiveram suas viabilidades econômico-financeiras demonstradas para os dados fornecidos pela CAEMA. Sendo que a ETE do Bacanga com menor capacidade operacional de tratamento ($Q_{\text{méd}} = 31,25 \text{ L/s}$), apresentou valores de do VPL negativos, para os dois arranjos técnicos de cogeração de bioenergia, tendo, portanto, a sua viabilidade econômico-financeira inviável, conforme demonstram os resultados mostrados na Tabela 66. Por outro lado, a ETE do Jaracaty, com maior capacidade operacional de tratamento ($Q_{\text{méd}} = 125 \text{ L/s}$), apresentou para o Arranjo I maiores indicadores econômicos financeiros: R\$ 347.966,37; 12,16 % e R\$ 31,01 por cada real investido; respectivamente VPL, TIR e Lucratividade, do que a ETE – Vinhais ($Q_{\text{méd}} = 79 \text{ L/s}$ de capacidade operacional de tratamento), com R\$ 101.392,60; 11,26 % e R\$ 29,13 por cada real investido e quase o mesmo tempo de *Payback*: 8,26 e 8,27 anos,

⁶¹ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.208**: Projeto de estações elevatórias de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

respectivamente, significando que esses investimentos se pagam em 8 anos e 3 meses.

Já para o arranjo II, com motogeradores de eletricidade a biogás nacionais, os indicadores econômicos financeiros, para a ETE do Vinhais, foram o inverso dos para o Arranjo I: R\$ 1.566.674,84; 13,62 %; R\$ 42,42 por cada real investido, respectivamente VPL, TIR e Lucratividade, maiores do que mesmos indicadores calculados para a ETE do Jaracaty: R\$ 406.624,32; 12,37 %; R\$ 31,51 por cada real investido e tempo de Payback de 6,26 anos para a ETE Vinhais menor que o para a ETE do Jaracaty. Cotejando estes resultados com os custos por potência instalada dos investimentos em cogeração para os dois arranjos técnicos adotados (Tabela 62), verificamos que este fator influenciou, inversamente, nos indicadores econômico-financeiros obtidos para estas duas ETEs, uma vez que os equipamentos da ETE do Jaracaty apresentam, devido a menor produção de biogás, apresentam custos de investimento ociosos, para a suas capacidades nominais de geração de energia: 49 kW/ 50 kW/48 kW e 43 kW/45 kW/48 kW, respectivamente: potência de eletricidade disponibilizada; potência da microturbina a biogás disponível no mercado internacional e potência do motogerador a biogás disponível no mercado nacional, das ETEs Vinhais e Jaracaty (como observado nas tabelas de Cálculo da Energia Bruta Produzida e da Potência Elétrica Disponibilizada e nas dos Custos dos Equipamentos - CIG), assim também como, nos custos dos equipamentos, para a capacidade demandada de secagem térmica dos lodos desaguados, em relação a capacidade mínima de secagem disponível no mercado nacional: 9,5 kWh/15 kWh/195 kWh/h/391kWh/h; para as ETEs Vinhais e Jaracaty, respectivamente (igualmente, nas tabelas do Cálculo da demanda de energia para a secagem da torta de lodo desaguada e nas dos Custos dos Equipamentos - CIG).

Por fim, analisamos o risco dos investimentos em cogeração de energia para os dois arranjos técnicos das duas ETEs, cujos cálculos dos indicadores de viabilidade econômico-financeira e técnica comprovaram as suas viabilidades e cuja síntese apresentamos nas Tabelas 67 e 68 a seguir.

Tabela 68 – Taxas de risco dos investimentos na cogeração de energia com o aproveitamento do biogás nas ETEs da CAEMA

TAXAS DE RISCO

INDICADORES	(%)	Prêmio de Risco Ajustado (%)
Taxa de risco da economia (Selic) – Rf	9,00	
Taxa livre de risco (IBOVESPA) - Rm	3,75	
Retorno mínimo exigido – TMA	5,15	1,40

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Tabela 69 – Taxas de risco dos investimentos na cogeração de energia com o aproveitamento do biogás para os dois arranjos nas ETEs da CAEMA

RAZÃO ENTRE O RISCO E RETORNO PELO CAPM

INDICADORES	ETEs		OBSERVAÇÃO
	VINHAIS	JARACATY	
	(%)	(%)	
TIR	11,29	12,16	RENTÁVEL
TMA (TAXA DE DESCONTO)	11,00	11,00	
TMA _{min} (TAXA MÍNIMA DE ATRATIVIDADE)	5,15	5,15	TAXA _{min} COM PRÊMIO DE RISCO AJUSTADO MENOR QUE TAXA DE DESCONTO

Fonte: Elaborado pelo autor, 2019

Observamos que as Taxas Internas de Retorno – TIR (11,29 % e 12,16 %, respectivamente para as ETEs do Vinhais e do Jaracaty) dos investimentos em cogeração de bioenergia, para os dois arranjos técnicos adotados, são maiores do que as Taxas Mínima de Atratividade - TMA_{min} (5,15 %), incluso o prêmio de risco ajustado, calculado de 1,40 % para as duas ETEs estudadas, com viabilidade econômico-financeira. Isto significando que a rentabilidade e o prêmio de risco ajustado pelo método *CAPM* adotado neste trabalho. Esses investimentos no mercado econômico nacional, são mais vantajosos do que de outros investimentos da mesma natureza e de iguais valores monetários no mercado financeiro brasileiro. Sendo que entre os investimentos para a ETE do Jaracaty, que trata uma vazão média ($Q_{\text{méd}} = 125$ L/s) maior do que a da ETE – Vinhais ($Q_{\text{méd}} = 79$ L/s) e produz um maior volume de biogás, é um pouco mais vantajosa (0,87%) em relação ao investimentos no Setor de Saneamento Básico nos mercados supra mencionados do que a ETE do Vinhais.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A viabilidade econômico-financeira e técnica de cogeração de energia a partir do gás metano das ETEs, com reatores do tipo RAFA instalados e operados pela CAEMA, escopo deste trabalho, foi demonstrada a nível de estudo de concepção, para os dois arranjos técnicos de cogeração de energia adotados, para uma escala de vazão média com escala mínima de 79 L/s de vazão média tratada.

Os resultados deste trabalho, somado ao conhecimento e estudo de outros investimentos em cogeração de bioenergia pelas cinco plantas já instaladas no Brasil, entre elas as de geração do biometano, para uso veicular da ETE de Franca - SP (500L/s), operada pela SABESP e visitada pelo autor, assim também, como a ETE de Ribeirão Preto – SP (926 L/s), operada pela empresa privada Ambient Serviços Ambientais de Ribeirão Preto S/A e da ETE de Arrudas, em Sabará – MG (1.907 L/s), na Região Metropolitana de Belo Horizonte – pioneira no sistema de cogeração no país, demonstram também, que a cogeração de energia, tendo como fonte o subproduto do tratamento de esgotos domésticos: o lodo cru, será cada vez mais, uma alternativa ambiental vantajosa, não só para a queima do CH₄, já prevista em Norma da ABNT, do metano – GEE de maior impacto no efeito estufa – mas também, para o descarte. A destinação adequada e uso do lodo gerado, na agricultura e em outros setores da economia, como a da construção civil, como o do projeto do aproveitamento do metano gerado pela digestão anaeróbia, para a secagem térmica e vitrificação do lodo, a altas temperaturas, ETE de Barueri – SP (14.000 L/s), na Região Metropolitana de São Paulo, também, foi visitada pelo autor.

Apontamos, à luz dos resultados obtidos, os principais pontos que devem ser melhor estudados e avaliados pela concessionária de saneamento básico proprietária e operadora desses ativos (CAEMA), com o fim de melhorar a eficiência dos processos de tratamento anaeróbico e da gestão operacional dos mesmos, objetivando o aproveitamento do biogás e do lodo gerado pelo tratamento dos esgotos domésticos, em suas ETEs, de forma econômica, energética e ambientalmente auto sustentável, sobretudo, em um cenário futuro de elevação dos preços das tarifas do fornecimento de energia elétrica, com peso significativo na estrutura dos custos operacionais dos serviços de saneamento.

O primeiro fator preponderante, para aumentar a utilização da capacidade instalada e a eficiência de tratamento das ETEs, é a qualidade e a variabilidade da

carga de matéria orgânica afluenta à ETE, medida através da DBO. No caso do nosso estudo, verificamos medidas de DBO afluenta e efluentes às ETEs abaixo da concentração típica desse parâmetro de 300 mg/L, para esgotos domésticos, indicando possíveis elevados tempos de detenção da contribuição de esgotos no poço de sucção das ETEs, o que pode ser corrigido com a implantação de boias com controles eletrônicos de níveis para volumes dimensionados para o tempo máximo de detenção dos esgotos nesses poços. Ou, por outro lado, indicar falhas nos procedimentos de coleta, armazenagem e transporte das amostras para as análises laboratoriais deste parâmetro. Recomendamos, portanto, que este aspecto seja examinado, em função dos histogramas das vazões afluentes à ETE, associado a frequência e aos procedimentos de coleta e análise de amostras previstos no Plano de Controle e Processo de Operação das ETEs.

A determinação do volume do lodo a ser descartado periodicamente, cujo parâmetro de medição é a quantidade de biosólidos em SST/kgDQO_{afluenta}, é outro fator que influencia na geração do biogás e do lodo excedente do reator UASB, impactando na ineficiência da digestão anaeróbia e, consequentemente, na subutilização dos equipamentos de desidratação e de secagem do lodo descartado. Nas ETEs, objeto do nosso estudo, não foram constatados dados de análises laboratoriais dos parâmetros de medição de Sólidos Sedimentáveis (SS) e nem de Sólidos Suspensos Totais (SST). Não obstante, a redução da produção de lodos de esgotos domésticos seja uma característica de processos anaeróbicos de biodigestão, a análise e medição desses parâmetros nos esgotos efluentes dos RAFA(s) são necessários para o controle e eficiência do processo de produção do biogás e da quantidade lodo excedente, a fim de que se possa ajustar as potências e capacidades dos motores e equipamentos elétricos e dispositivos mecânicos e hidráulicos, levando a maior rentabilidade e viabilidade econômico-financeira operacional dessas ETEs. Desta forma, recomendamos que sejam elaborados Planos de Controle Operacional das ETEs com a medição desses parâmetros, indicando a frequência de amostragem e valores médios de operação projetados, objetivando a gestão econômica e técnica do processo da digestão anaeróbica dos esgotos tratados.

Outros fatores importantes na produção do biogás são a variação do pH e as baixas temperaturas. A geração do metano se dá na fase metanogênica, na qual as bactérias mesofílicas/metanogênicas, na faixa de temperatura de (20 e 40 °C), produzem o metano, sendo o controle da temperatura no interior dos digestores

anaeróbios, também, medidas e controladas. A redução do pH e da alcalinidade, com a concentração de ácidos voláteis, implica na redução da geração do biogás, portanto, esses dois parâmetros devem também ser objeto do Planos de Controle Operacional da ETEs, supra mencionado. O monitoramento e controle da eficiência da produção do metano, relacionado à redução do pH, pode ser feito monitorando-se visualmente a queima da chama no queimador de biogás ou com a implantação de um sistema de medição instalado nas campanulas de captação do biogás, avaliando e correlacionando com outros parâmetros operacionais a sua produção.

Como as ETEs são dimensionadas em função das vazões médias, da concentração de sólidos (SST ou SSV) e da carga orgânica (DBO ou DQO) afluentes às mesmas, no início e final de plano, porém, durante a fase de operação, esses parâmetros das vazões médias afluentes às ETEs se somam aos das vazões de recirculação de sobrenadantes dos digestores, adensadores de lodo, e da massa líquida resultante dos flotadores e secadores do lodo desaguado, recirculando inúmeras vezes gerando uma massa de biossólidos com parâmetros de (DBO ou DQO) e de concentração de sólidos (SST ou SSV), significativamente, maiores do que os das vazões médias afluentes de entrada nas ETEs. Deste modo, uma vez que esse procedimento não era escopo deste estudo, para uma melhor determinação da DBO e dos SST ou SSV dos lodos digeridos, descartados e desaguados, objetivando-se o cálculo mais preciso da produção do biogás e do lodo a ser desidratado, recomendamos para os futuros trabalhos de cogeração de bioenergia nessas ETEs, a elaboração do Balanço de Massas dos parâmetros acima citados, em todas as fases do processo de tratamento dos esgotos domésticos, até se obter a soma de todas as massas finais de cada etapa do processo com todos os seus parâmetros bioquímicos e físicos.

Por fim, as ETEs são projetadas como parte de um Sistema de Esgotamento Sanitário, que tem como uma das características fundamentais a integralidade dos serviços de esgotamento sanitário, princípio este consignado no marco regulatório nacional do Saneamento Básico (Lei nº 11.445 de 11/fev./2008), ou seja esses investimentos para serem eficientes e atingirem as finalidades para as quais são realizados, tem que ser implantados, em todas as suas etapas: coleta, afastamento, tratamento e destino final adequado. Na realidade, o que observamos, não só no caso do presente estudo, mas a nível nacional, é uma subutilização das ETEs, que custaram vultosos investimentos para serem construídas, ao mesmo tempo

em que as projeções de população atendida e suas vazões médias correspondentes, de final de plano já terem sido ultrapassadas. Para que a alternativa de cogeração de bioenergia, em atendimento aos compromissos internacionais estabelecidos na AGENDA 21 e no Protocolo de Paris de limitar a emissão de GEE até 2030, assumidos pelo Brasil, cabe aqui recomendar que a CAEMA envie esforços para buscar e realizar investimentos na ampliação das redes, de interceptores, emissários e elevatórias, aumentando as contribuições dos esgotos afluentes a essas ETEs com capacidades ociosas, gerando perdas econômicas e financeiras não contabilizadas, que poderiam viabilizar mais ainda outras alternativas e arranjos técnicos de cogeração de bioenergia.

REFERÊNCIAS

- ¹ REIS, Lineu Belico dos; FADIGAS, Eliane A. F. Amaral e CARVALHO, Cláudio Elias. **Energia, recursos naturais e a prática do desenvolvimento sustentável**. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2012. Ibid., p. 83. *ibid.*, p. 30.
- ² BRAGA, Benedito *et al.* **Introdução a Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005. Ibid., p.174. *ibid.*, p. 30.
- ³ NUNES, José Alves. **Tratamento Biológico de Águas Residuárias**. 3.ed. Aracaju: Gráfica Editora J. Andrade, 2012. Passim., p.34. Passim., p. 39. Passim., p. 40. Passim., p. 52.
- ⁴ GODLOVE, Christopher. Global Methane Initiative. In: SEMINÁRIO DE SUSTENTABILIDADE DE ESTAÇÕES DE TRATAMENTO (CD), 1., 2011, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES, 2011.
- ⁵ BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde – FUNASA. **Gestão econômico-financeira no setor de saneamento**. 2. ed. – Brasília: Funasa, 2014. Ibid., p. 140. Ibid., p. 32.
- ⁶ UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. Kyoto protocol to the United Nations. Washington (2007). Disponível em: <https://unfccc.int/>. Acesso em: 04 nov. 2019.
- ⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.209**: Projeto de estações de tratamento de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 2011. Passim., p. 41.
- ⁸ JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda. **Tratamento de esgotos domésticos**. 8. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017. Pasim., p. 67.
- ⁹ CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. Manual de Fomento do Programa Saneamento para Todos tem. SUFUG/GEAVO. Versão 3.18 Vigência: 23 maio de 2019.
- ¹⁰ INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA. Renewable Power Generation Costs in 2018. Abu Dhabi (2019). Disponível em: www.irena.org/publications. Acesso em: 05 mar. 2020. Passim., p. 112. Op. cit., p. 29 e 30. p. 98. Passim., p. 113.
- ¹¹ VALENTE, Victor Bustani. **Análise de viabilidade econômica e escala mínima de uso do biogás de reatores anaeróbios em Estações de Tratamento de Esgoto no Brasil**. 2015. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <http://antigo.ppe.ufRJ.br/ppe/production/tesis/bustani.pdf>. Acesso em: 20 mar. 2020. Passim., p. 66. Passim., p. 75.
- ¹² AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. (Brasil). Resolução ANP nº 685, de 29.de junho de 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. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, 2017. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2017/junho&item=ranp-685-2017>. Acesso em: 20 mar. 2020. Passim., p. 50.

- ¹³ ALBRECHT. Catálogo de produtos. Secador Indireto Bruthus F. Joinville, SC, 2019. Passim., p. 69.
- ¹⁴ AWITE. Catálogo de produtos. Dessulfurização biológica com o Awidesulf. São Paulo, 2019.
- ¹⁵ SISTEMAS DE ENERGIA PARA INDÚSTRIA E SERVIÇOS LTDA - ATLASSEIS. Catálogo de produtos. Reactor Siloxanos. Portugal, 2019.
- ¹⁶ MOURA, Félix Antônio. **Viabilidade econômica da geração de energia através do biogás produzido em uma estação de tratamento de esgotos**. 2013. TCC (Graduação em Engenharia Ambiental) - Centro Universitário Barão de Mauá, Ribeirão Preto, 2013. 46p.
- ¹⁷ CAPSTONE TURBINE CORPORATION. Catálogo de produtos. Reactor Silo Microturbinas Capstone. Chatsworth, Califórnia, 2019. Passim., p. 65.
- ¹⁸ CHP BRASIL. Catálogo de produtos. Gerador de energia a gás CPH60. Rio de Janeiro, 2019. Passim., p. 62.
- ¹⁹ HILSDORF, Jorge Wilson *et al.* **Química tecnológica**. 1. ed.. São Paulo: Editora Cengage Learning, 2016.
- ²⁰ COMPANHIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL DO MARANHÃO – CAEMA. Dados relativos ao período do mês de outubro/2019. Passim., p. 55. Passim., p. 56.
- ²¹ SOUZA, Arlindo Antônio de *et al.* Micro-Cogeração: Tecnologia, Desafios e Oportunidades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS, 2., 2003. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2003. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/2/8037.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2020...
- ²² BRUNO, J. C., A. CORONAS, A. Hinestrosa y. A. Estado actual de la tecnología de las microturbinas de gás. **Energua**, Universidad Rovira i Virgili, Espanha, 2002. Disponível em: https://jrguezs.webs.ull.es/tecnologia/bibliografia/micro_tg.pdf. Acesso em: 10 mar. 2020
- ²³ LOBATO, Livia Cristina da Silva. **Aproveitamento energético de biogás gerado em reatores UASB tratando esgoto doméstico**. 2011. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Belo Horizonte, 2011. Disponível em:

- <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/189D.PDF>. Acesso em: 04 fev. 2020. Passim., p. 70. Passim., p. 71. Passim., p. 72.
- 24 CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. (Brasil). Resolução nº 375 de 29 de agosto de 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://siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=5956>. Acesso em: 04 fev. 2020.
 - 25 COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. (Brasil). Manual técnico: aplicação de lodos de sistemas de tratamento biológico em áreas agrícolas - critérios para projeto e operação. Ago.1999. p. 4.230. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 05 fev. 2020.
 - 26 JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSOA, Constantino Arruda. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 8. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2017. p. 818-8220. Passim., p. 68.
 - 27 DAVID, Ailton Checoni. **Secagem Térmica de Lodos de Esgotos**: Determinação da Umidade de Equilíbrio. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia)- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.
 - 28 SPERLING, Marcos Von; FERNANDES, Fernando; ANDREOLI, Cleverson V. **Lodo de Esgotos**: Tratamento e disposição final. 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2014. Passim., p. 70. Passim., p. 71.
 - 29 CENTRO DE ESTUDOS EM ECONOMIA DA ENERGIA DOS TRANSPORTES E AMBIENTE – CEEETA. Tecnologias de Micro-Geração e Sistemas Periféricos, Lisboa, 2001. Disponível em: <file:///C:/Users/win%207/Downloads/TecnoMicroGeraCEEETA.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2020.
 - 30 MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Empresa de Pesquisa Energética – EPE. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017 ano base 2016. Brasília, 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 15.mar.2020.
 - 31 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Homologatória ANEEL nº 2.594 de 20 de agosto de 2019. Homologa o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2019 da Companhia Energética do Maranhão - CEMAR, a vigorar a partir de 28 de agosto de 2019, e dá outras providências. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 164, p. 50, 20 de agosto de 2019. Disponível em: [file:///C:/Users/win%207/Downloads/INPDFViewer%20\(1\)%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/win%207/Downloads/INPDFViewer%20(1)%20(1).pdf). Acesso em: 12.mar.2020.
 - 32 LORA, Electo Eduardo S., JAMIL, Haddad. **Geração Distribuída**: Aspectos Tecnológicos, Ambientais e Institucionais. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora InterCiência, 2006.

- ³³ MEHRAYIN, Kourosh. **Microturbines and their use in small scale cogeneration. Presentation**. Bowman Power Systems Inc. January, 17th, 2002. Disponível em: encurtador.com.br/gwDOZ. Acesso em: 10 mar. 2020.
- ³⁴ OLÍVIO, Rodolfo L. de Faria. **Análise de Investimentos**. 1. ed. Campinas –SP: Empresas. Editora Alínea, 2008
- ³⁵ BANCO CENTRAL DO BRASIL. Comitê de Política Monetária – COPOM. 229^a Reunião do CMN. (2020). Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/copom>. Acesso em: 16 mar. 2020.
- ³⁶ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Homologatória ANEEL nº 424 de 17 de dezembro de 2010. Aprova a Revisão 2 dos Módulos 1, 2, 3, 5, 6, e 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: seção 1, p. 130, v. 147, n. 244. 22 de dezembro de 2010. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010424.pdf>. Acesso em: 20. mar.2020.
- ³⁷ ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12.208**: Projeto de estações elevatórias de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.