

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS DE ENERGIA

JONAS ABILIO SESTREM JUNIOR

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DE RISCO DE INVESTIMENTO EM SISTEMAS DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA A PARTIR DE BIOGÁS PRODUZIDO EM ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO DOMÉSTICO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2019

JONAS ABILIO SESTREM JUNIOR

**METODOLOGIA DE ANÁLISE DE RISCO DE INVESTIMENTO EM SISTEMAS DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA A PARTIR DE BIOGÁS PRODUZIDO EM ESTAÇÕES
DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO DOMÉSTICO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica” - Área de Concentração: Sistemas de Energia.

Orientador: Prof. Ulisses Chemin Netto, Dr.

Coorientador: Prof. Diego Issicaba, PhD.

CURITIBA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Sestrem Junior, Jonas Abilio

Metodologia de análise de risco de investimento em sistemas de geração distribuída a partir de biogás produzido em estações de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico [recurso eletrônico] / Jonas Abilio Sestrem Junior.-- 2019.

1 arquivo eletrônico (184 f.) : PDF ; 4,66 MB.

Modo de acesso: World Wide Web.

Texto em português com resumo em inglês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia. Área de Concentração: Automação e Sistemas de Energia, Curitiba, 2019.

Bibliografia: f. 177-184.

1. Sistemas de energia elétrica - Dissertações. 2. Geração distribuída de energia elétrica. 3. Biogás. 4. Saneamento. 5. Águas residuais - Purificação - Tratamento anaeróbio. 6. Investimentos - Análise. 7. Administração de risco. 8. Estudos de viabilidade. 9. Processo decisório. 10. Monte Carlo, Método de. 11. Métodos de simulação. I. Chemin Netto, Ulisses, orient. II. Issicaba, Diego, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Sistemas de Energia. IV. Título.

CDD: Ed. 23 -- 621.31

TERMO DE APROVAÇÃO DE DISSERTAÇÃO

A Dissertação de Mestrado intitulada “**Metodologia de análise de risco de investimento em sistemas de geração distribuída a partir de biogás produzido em estações de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico**”, defendida em sessão pública pelo candidato **Jonas Abilio Sestrem Junior**, no dia 02 de setembro de 2019, foi julgada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, área de concentração Automação e Sistemas de Energia, e aprovada em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Ulisses Chemim Netto – Presidente – UTFPR
Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti – ISAE/ Sanepar
Prof. Dr. Mauro Augusto da Rosa – UFSC

A via original deste documento encontra-se arquivada na Secretaria do Programa, contendo a assinatura da Coordenação após a entrega da versão corrigida do trabalho.

Curitiba, 02 de setembro de 2019.

Carimbo e Assinatura do(a) Coordenador(a) do Programa

AGRADECIMENTOS

Quero agradecer a Deus, o meu Pai, por me criar, dar o fôlego da vida e me permitir viver os meus sonhos. Quero agradecer a Jesus Cristo meu Senhor e Salvador, por me proporcionar, através de seu sacrifício na Cruz, acesso livre ao meu Pai. Também quero agradecer ao meu Amigo Espírito Santo por me consolar e me guiar em toda a verdade. Que esta etapa vencida me capacite a servir melhor ao meu próximo.

Aos meus pais Jonas e Maria Izabel pelo amor incondicional, pelo seus conselhos e orientações, e por não medirem esforços para que eu pudesse chegar até aqui. Agradeço aos meus irmãos Janaína e Jefferson pelo apoio, mesmo que as vezes de muito longe. Agradeço ao meu avô Paulo por sempre me amar, apoiar, aconselhar, e despertar em mim desde a tenra idade um amor pela engenharia.

Quero fazer um agradecimento muitíssimo especial para a minha amada esposa Talitha por ter sido sempre amável, paciente, incentivadora e carinhosa. Agradeço por ter “segurado as pontas” durante todo o período da realização do mestrado.

Agradeço a minha filha Beatriz que nasceu durante a realização desta pós-graduação e me trouxe junto com o seu sorriso e amor, uma nova forma de compreender a vida.

Ao Professor Diego Issicaba, por acreditar no meu sonho, pela oportunidade oferecida, tempo dedicado, definição do tema a ser estudado, amizade, companheirismo e por todo o apoio e suporte dado durante a fase de elaboração desta obra.

Ao Prof. Dr. Leandro Alberto Novak e ao Prof. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti pelo incentivo e apoio durante a realização do Mestrado.

Ao meu mentor Prof. Dr. Jerry Myoshi Kato pelas palavras de apoio e incentivo.

Aos meus apascentadores Edson Pereira da Silva e Bruno Santos Lucena pelos conselhos, pastoreamento, amizade e orações.

Aos meus amigos de longa data que sempre estiveram do meu lado apoiando e torcendo por mim.

E a todos que de alguma forma influenciaram, direta ou indiretamente, na elaboração desta dissertação, o meu muito obrigado.

“Não andem ansiosos por coisa alguma, mas em tudo, pela oração e súplicas, e com ação de graças, apresentem seus pedidos a Deus. E a paz de Deus, que excede todo o entendimento, guardará o coração e a mente de vocês em Cristo Jesus”
Carta do Apóstolo Paulo aos Filipenses, Capítulo 4, versículos 6 e 7. NVI

RESUMO

SESTREM JR., Jonas Abilio. **Metodologia de análise de risco de investimento em sistemas de geração distribuída a partir de biogás produzido em estações de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico**. 2019. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2019.

O setor de saneamento é eletro-intensivo e a recuperação energética do biogás proveniente do tratamento anaeróbio do esgoto visando à geração distribuída de energia elétrica surge como uma alternativa para a promoção da sustentabilidade. No entanto, com o intuito assegurar investimentos prudentes, faz-se necessário respaldar as tomadas de decisão acerca do assunto em análises de viabilidade técnico-econômica e de risco. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma metodologia para a estimativa do risco associado a investimentos em unidades de geração distribuída de energia elétrica a partir da recuperação do biogás produzido em estações de tratamento anaeróbio de esgoto (ETE). A metodologia é probabilística e combina a estimativa da produção de biogás a partir do tratamento do esgoto, a geração distribuída de energia elétrica por meio da conversão do biogás, a avaliação de valor do investimento em termos de risco (VaR – *Value at Risk* e CVaR – *Conditional Value at Risk*), análise de sensibilidade, bem como a simulação de Monte Carlo. Para tanto, inicialmente, elaborou-se uma planilha contendo uma função de conversão, a qual possibilita converter os dados de vazão e demanda química de oxigênio (DQO) do esgoto que chega em uma ETE em taxas de produção de biogás e de metano. Para tanto, implementou-se um método que considera as rotas de conversão de DQO em reatores anaeróbios, bem como as perdas inerentes ao processo, o qual foi proposto por Lobato (2011). A partir das taxas de produção de metano, estimou-se a quantidade de energia elétrica que pode ser gerada anualmente em uma ETE, assumindo para tal a conversão em um grupo moto gerador. Na sequência, utilizou-se a simulação de Monte Carlo para amostrar os valores de entrada da função de conversão e simular uma distribuição representativa da produção de metano e do custo evitado com energia elétrica na ETE a partir da conversão do biogás. Para estimar o custo evitado, foi realizada uma análise utilizando a estimativa das modalidades das bandeiras tarifárias baseado em seu histórico de utilização. Por fim, esses dados foram comparados com os custos de

investimento (CAPEX) e de operação inerentes à unidade de geração distribuída de energia elétrica. Assim, determinou-se um histograma com dados de valor presente líquido (VPL), bem como estimou-se o risco do investimento utilizando as ferramentas de análise VaR e CVaR. O método desenvolvido foi aplicado inicialmente em uma ETE de médio porte, localizada no Brasil, visando consolidá-lo. Após aplicou-se em outras três ETEs com características similares. Para tanto, efetuou-se o tratamento de uma série histórica de dados de vazão e de DQO do esgoto que chega à ETE, a qual foi concebida ao longo de um ano. Os resultados obtidos indicaram que a geração distribuída a partir do biogás proveniente dessas ETEs possui uma margem de risco aceitável, justificando a realização do investimento para três delas.

Palavras-Chave: Biogás, Saneamento, Geração Distribuída, Valor Presente Líquido, *Value at Risk*, *Conditional Value at Risk*

ABSTRACT

SESTREM JR., Jonas Abilio. **Risk analysis methodology for investment in distributed generation systems from biogas produced in anaerobic domestic sewage treatment plants.** 2019. 180 f. Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Energia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Curitiba, 2019.

Sanitation sector is electro-intensive and the energy recovery of biogas from anaerobic sewage treatment for distributed generation of electricity emerges as an alternative for the promotion of sustainability. In order to ensure prudent investments, it is necessary to support decision-making on the subject in technical-economic feasibility and risk analysis. In this context, this paper presents an innovative method capable of estimating the risk associated with investments in distributed electricity generation units from the recovery of biogas produced in anaerobic wastewater treatment plants (AWWTP). The method is probabilistic and combines the estimation of biogas production from AWWTP with the distributed generation of electricity through biogas conversion, the value at risk investment (VaR) and CVaR assessment (Conditional Value at Risk), sensitivity analysis as well as Monte Carlo simulation. A spreadsheet containing a transfer function was initially elaborated, enabling the conversion of the flow and COD data from the AWWTP into biogas and methane production rates. To that end it was utilized the method proposed by Lobato (2011) that considers all routes of COD conversion and losses in the anaerobic reactor. From methane production rates, it was estimated the amount of electricity that could be generated annually in a AWWTP, considering a motor generator group. The Monte Carlo simulation was then used to sample the input values of the transfer function and to simulate a representative distribution of methane production and the avoided electricity cost at the AWWTP from biogas conversion. Finally, these data were compared to the investment and operating costs (CAPEX) of the distributed electricity generation unit. Thus, a histogram with net present value (NPV) data was designed, and the investment risk was estimated using the VaR and CVaR analysis tools. The developed method was initially applied in a medium-sized WWTP located in Brazil. After consolidating the method, it was applied to three other similar AWWTPs. To this end, an yearly basis historical series of sewage flow and COD data arriving at the WWTP was processed. The results indicated that the distributed generation of

electricity from biogas from these AWWTP has an acceptable risk margin, justifying the investment for three of them.

Keywords: Biogas, Sanitation, Distributed Generation, Net Present Value, Value at Risk, Conditional Value at Risk

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Opções de uso do biogás como fonte de energia.....	36
Figura 2.2 – Fluxograma típico de um sistema de reator anaeróbio de manta de lodo.....	39
Figura 2.3 – Desenho esquemático de um UASB.....	42
Figura 2.4 – Esquema de balanço de DQO ao longo do processo de digestão anaeróbia	44
Figura 2.5 – Representação esquemática das rotas de conversão de DQO e dos fluxos de metano em reatores UASB.....	45
Figura 2.6 – Curvas de vazão do biogás em função do tempo para um intervalo de quatro e de trinta dias	46
Figura 2.7 – Ciclo de Brayton básico.....	51
Figura 2.8 – Fluxograma de geração de energia na ETE CRUSP.....	57
Figura 2.9 – Fluxograma de geração de energia na ETE Arrudas.....	58
Figura 2.10 – Conjunto moto gerador da ETE Jacuípe II.....	59
Figura 2.11 – Mapa Ilustrativo da Planta da Usina da CS Bioenergia	60
Figura 2.12 – Fluxograma de geração de energia na ETE Ibitité	61
Figura 2.13 – Fluxograma de processo para geração de energia elétrica na ETE Ouro Verde – Foz do Iguaçu.....	62
Figura 2.14 – Tela do Sistema Supervisório da ETE Ouro Verde – Foz do Iguaçu.....	63
Figura 2.15 – Diagrama Unifilar da ETE Ouro Verde – Foz do Iguaçu.....	64
Figura 2.16 – Representação simplificada de uma sequência de eventos durante um período de tempo T	68
Figura 2.17 – VaR para distribuições gerais.....	73
Figura 2.18 – Distribuição de probabilidade normal cumulativa.....	75
Figura 2.19 – Conditional Value at Risk	77
Figura 3.1 - Curva e equação ajustada de concentração de DQO	86
Figura 3.2 – Fluxograma da metodologia de análise de viabilidade técnico-econômica, e do risco de investimento para sistemas de GD a partir do biogás gerado em Estações Anaeróbias de Esgoto Doméstico	106
Figura 4.1 – Distribuição de Probabilidade dos dados de Vazão de Esgoto (afluente) e DQO (afluente)	114

Figura 4.2 – Comparativo entre Frequências Observadas e Teóricas de probabilidade dos valores de Vazão e DQO do afluente	115
Figura 4.3 – Densidade de Probabilidade dos valores de Vazão e DQO do afluente.....	116
Figura 4.4 – Distribuições acumuladas dos valores de de Vazão e DQO do afluente.....	116
Figura 4.5 - Distribuição de probabilidade dos valores de Produção diária de CH ₄ (Nm ³ /d).....	119
Figura 4.6 – Comparativo entre Frequências Observadas e Teóricas de probabilidade dos valores de produção de CH ₄	120
Figura 4.7 – Densidade de Probabilidade dos valores de produção de CH ₄	121
Figura 4.8 – Distribuições acumuladas dos valores de produção de energia elétrica.....	121
Figura 4.9 - Distribuição de probabilidade dos valores de Produção diária de energia elétrica (kWh/d).....	123
Figura 4.10 – Comparativo entre Frequências Observadas e Teóricas de probabilidade dos valores de produção de Energia Elétrica	124
Figura 4.11 – Densidade de Probabilidade dos valores de produção de Energia Elétrica	124
Figura 4.12 – Distribuições acumuladas dos valores de produção de energia elétrica.....	125
Figura 4.13 - Distribuição de probabilidade da Produção Mensal de Energia Elétrica	126
Figura 4.14 - Distribuição de probabilidade de Custo Evitado / Ganho com a geração de energia elétrica	129
Figura 4.15 - Distribuição de probabilidade e curva de probabilidade acumulada dos VPL.....	133
Figura 4.16 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$), VaR 95% (R\$) e CVaR 95% (R\$) em relação a variação da Aplicação (R\$).....	136
Figura 4.17 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$), VaR 95% (R\$) e CVaR 95% (R\$) em relação a variação da Duração do Projeto (anos).....	137
Figura 4.18 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$), VaR 95% (R\$) e CVaR (R\$) em relação a variação dos Custos Operacionais (R\$)	138
Figura 4.19 – Dados de Produção de CH ₄ e Energia Elétrica – Cenário 1	140

Figura 4.20 – Dados de Produção de CH ₄ e Energia Elétrica – Cenário 2.....	141
Figura 4.21 - Distribuição de probabilidade dos valores de produção de CH ₄ – Cenário 1.....	142
Figura 4.22 - Distribuição de probabilidade dos valores de produção de Energia Elétrica – Cenário 1.....	143
Figura 4.23 - Distribuição de probabilidade dos valores de produção de CH ₄ – Cenário 2.....	144
Figura 4.24 - Distribuição de probabilidade dos valores de produção de Energia Elétrica – Cenário 2.....	145
Figura 4.25 – Estimativa de Produção de CH ₄ e Energia Elétrica – Cenário 1	146
Figura 4.26 – Estimativa de Produção de CH ₄ e Energia Elétrica – Cenário 2	146
Figura 4.27 - Histograma dos dados de Vazão de Esgoto (afluente) das ETES 1, 2, 3 e 4	148
Figura 4.28 - Histograma dos dados de DQO média (afluente) – ETES 1, 2, 3 e 4	150
Figura 4.29 – Comparativo entre os valores de Produção Média Diária de CH ₄ (Nm ³ /d) e dos dados de Vazão e DQO médio – ETES 1, 2, 3 e 4.....	151
Figura 4.30 - Distribuição de probabilidade dos valores de Produção diária de CH ₄ (Nm ³ /dia) – ETES 1, 2, 3 e 4.....	152
Figura 4.31 – Comparativo entre os valores de Produção Diária de Energia Elétrica e dos dados de Vazão e DQO médio – ETES 1, 2, 3 e 4.....	153
Figura 4.32 - Distribuição de probabilidade dos valores de Produção Diária de Energia Elétrica (kWh/dia) – ETES 1, 2, 3 e 4	154
Figura 4.33 – Comparativo entre os valores de Produção Média Mensal de Energia Elétrica (kWh/mês) e dos dados de Vazão e DQO médio – ETES 1, 2, 3 e 4	156
Figura 4.34 - Distribuição de probabilidade dos valores de Produção de Energia Elétrica Mensal (kWh/mês) – ETES 1, 2, 3 e 4.....	157
Figura 4.35 – Comparativo entre os valores de Custo Evitado / Ganho Médio e dos dados de Vazão e DQO médios – ETES 1, 2, 3 e 4	158
Figura 4.36 - Distribuição de probabilidade dos valores de Custo evitado/Ganho com a geração de Energia Elétrica Mensal (kWh/mês) – ETES 1, 2, 3 e 4	159
Figura 4.37 – Comparativo entre os valores de VPL Médio e dos dados de Vazão e DQO médios – ETES 1, 2, 3 e 4	160

Figura 4.38 - Distribuições de Probabilidade e Curvas de Probabilidade Acumulada dos VPL – ETEs 1, 2, 3 e 4	161
Figura 4.39 – Comparativo entre os valores de VaR 95% / CVaR 95% e dos dados de Vazão e DQO médios – ETEs 1, 2, 3 e 4	163
Figura 4.40 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$) em relação a variação da Aplicação (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4.....	164
Figura 4.41 – Curvas de sensibilidade do VaR 95% (R\$) em relação a variação da Aplicação (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4	165
Figura 4.42 – Curvas de sensibilidade do CVaR 95% (R\$) em relação a variação da Aplicação (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4.....	166
Figura 4.43 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$) em relação a variação da Duração do Projeto (anos) – ETEs 1, 2, 3 e 4.....	167
Figura 4.44 – Curvas de sensibilidade de VaR 95% (R\$) em relação a variação da Duração do Projeto (anos) – ETEs 1, 2, 3 e 4.....	168
Figura 4.45 – Curvas de sensibilidade de CVaR 95% (R\$) em relação a variação da Duração do Projeto (anos) – ETEs 1, 2, 3 e 4.....	169
Figura 4.46 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$) em relação a variação dos Custos Operacionais (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4.....	170
Figura 4.47 – Curvas de sensibilidade de VaR 95% (R\$) em relação a variação dos Custos Operacionais (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4.....	171
Figura 4.48 – Curvas de sensibilidade de CVaR 95% (R\$) em relação a variação dos Custos Operacionais (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4.....	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Características de diferentes tipos de gases	37
Tabela 2.2 – Poder calorífico de alguns gases combustíveis	38
Tabela 2.3 – Dados de entrada considerado no modelo.....	47
Tabela 2.4 – Análise comparativa das principais alternativas para o uso do biogás para geração combinada de eletricidade e calor	53
Tabela 2.5 – Comparação entre as principais alternativas de cogeração de eletricidade e calor	54
Tabela 2.6 – Comparação entre as principais alternativas de cogeração de eletricidade e calor	54
Tabela 2.7 – Descrição dos equipamentos da instalação – ETE CRUSP	57
Tabela 3.1 - Cenários de estimativas para determinação de produção de biogás e energia elétrica.....	85
Tabela 3.2 – Análise dos valores de Vazão e DQO em função do dia da semana.....	87
Tabela 4.1 – Resumo dos parâmetros estatísticos da série da vazão de afluente.....	113
Tabela 4.2 – Resumo dos parâmetros estatísticos da série do DQO do afluente ...	113
Tabela 4.3 – Resumo dos tipos de variáveis e suas quantidades de amostras aleatoriamente geradas	117
Tabela 4.4 – Resumo dos parâmetros estatísticos da geração aleatória dos valores médios de vazão do afluente	118
Tabela 4.5 – Resumo dos parâmetros estatísticos da geração aleatória dos valores médios de DQO do afluente.....	118
Tabela 4.6 – Resumo dos parâmetros estatísticos resultado dos cálculos aleatórios de produção diária CH ₄ – 1.800.000 amostras.....	118
Tabela 4.7 – Resumo dos parâmetros estatísticos resultado dos cálculos aleatórios de produção diária CH ₄ – 5.000 amostras.....	120
Tabela 4.8 – Resumo dos parâmetros estatísticos resultado dos cálculos aleatórios de produção diária energia elétrica – 1.800.000 amostras	122
Tabela 4.9 – Resumo dos parâmetros estatísticos resultado dos cálculos aleatórios de produção diária energia elétrica – 5.000 amostras.....	123
Tabela 4.10 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série de produção de energia elétrica.....	125

Tabela 4.11 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série de custo evitado / ganho com geração de energia elétrica	128
Tabela 4.12 – Resumo das distribuições de probabilidade e parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias dos custos operacionais mensais.....	130
Tabela 4.13 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série dos valores de LAJIR mensal e anual.....	131
Tabela 4.14 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série dos valores de FCO.....	131
Tabela 4.15 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série dos valores de VPP ..	132
Tabela 4.16 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série de VPLs gerados	134
Tabela 4.17 - Resumo dos parâmetros estatísticos das séries da vazão média do efluente – ETEs 1, 2, 3 e 4	148
Tabela 4.18 - Resumo dos parâmetros estatísticos das séries da vazão de efluente – ETEs 1, 2, 3 e 4	149
Tabela 4.19 - Resumo dos dados de Produção diária de CH ₄ – ETEs 1 ,2, 3 e 4...	151
Tabela 4.20 - Resumo dos dados de Produção diária de Energia Elétrica – ETEs 1, 2, 3 e 4	153
Tabela 4.21 - Resumo do dimensionamento dos Grupos Moto Gerador e dos Gasômetros.....	155
Tabela 4.22 - Resumo dos parâmetros estatísticos das séries de Produção de Energia Elétrica Mensal – ETEs 1, 2 ,3 e 4.....	156
Tabela 4.23 - Resumo dos parâmetros estatísticos das séries de Custos Evitados / Ganho com a Geração de Energia Elétrica Mensal – ETEs 1, 2, 3 e 4 ..	158
Tabela 4.24 - Resumo dos parâmetros estatísticos das séries de VPLs – ETEs 1, 2, 3 e 4	160
Tabela 4.25 - Resumo dos valores de VaR e CVaR – ETEs 1, 2, 3 e 4.....	162

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

BRICS – Conjunto de países emergentes formado por Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul

CENBIO – Centro Nacional em Referência em Biomassa

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental

CNPJ – Cadastro Nacional da Pessoa Jurídica

COPASA – Companhia de Saneamento de Minas Gerais

COPEL – Companhia Paranaense de Energia

CP – Controlador Programável

CPF – Cadastro da Pessoa Física

CMPC – Custo Médio Ponderado de Capital

CSLL – Contribuição Social sobre o Lucro Líquido

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

EEE – Estação Elevatória de Esgoto

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

GMG – Grupo Moto Gerador

IEE – Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo

INEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética

IRPJ – Imposto de Renda de Pessoa Jurídica

LAJIR – Lucro antes de Juros e Imposto de Renda

LENHS – Laboratório de Eficiência Energética e Hidráulica em Saneamento

MCI – Motor de Combustão Interna

PAC – Programa de Aceleração do Crescimento

PAC 2 – Programa de Aceleração do Crescimento 2

PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

RALF – Reator Anaeróbio de Leito Fluidizado

SAA – Sistema de Abastecimento de Água

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SANEPAR – Companhia de Saneamento do Paraná

SEE – Sistema de Energia Elétrica

SES – Sistema de Esgotamento Sanitário
SIN – Sistema Interligado Nacional
SPE – Sociedade de Propósito Específico
SSC – Sistema de Supervisão e Controle
SV – Sólidos Voláteis
UASB – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente.
USP – Universidade de São Paulo
UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VPI – Valor Presente do Investimento
VPL – Valor Presente Líquido
VPP – Valor Presente do Projeto
WACC – Weighed Average Cost of Capital

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	OBJETIVOS	27
1.1.1	Objetivo Geral	27
1.1.2	Objetivos Específicos.....	27
1.2	JUSTIFICATIVA	28
1.3	SÍNTESE DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA	29
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	32
2	REFERENCIAL TEÓRICO	34
2.1	TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO DOMÉSTICO	34
2.1.1	O Biogás.....	34
2.1.2	Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo.....	38
2.1.3	Critérios de produção de biogás	43
2.2	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS	48
2.2.1	Tecnologias para Conversão Energética do Biogás	49
2.2.2	Análise comparativa entre tecnologias	52
2.2.3	Geração de Energia Elétrica em ETEs.....	54
2.2.4	Aproveitamento energético do biogás gerado em ETEs no Brasil.....	64
2.3	MÉTODOS DE ANÁLISE PARA O DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO	65
2.3.1	Simulação De Monte Carlo	65
2.3.2	Métodos Para Análise De Risco	69
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	77
3	METODOLOGIA DESENVOLVIDA	79
3.1	MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA ELÉTRICA.....	79
3.1.1	Elaboração de função de conversão	79
3.1.2	Adequações realizadas na função de conversão	85
3.1.3	Análise dos valores de Vazão e DQO em função dos dias da semana.....	87
3.2	METODOLOGIA	87
3.2.1	Etapa 1 – Produção de CH ₄	88

3.2.2	Etapa 2 – Produção de Energia Elétrica.....	91
3.2.3	Etapa 3 – Análise de viabilidade técnica-econômica através da ferramenta VPL.....	94
3.2.4	Etapa 4 – Análise de Risco do Investimento e Sensibilidade.....	104
3.2.5	Fluxograma Resumo da Metodologia.....	105
3.3	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	106
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	108
4.1	DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA ETE ESTUDADA.....	108
4.1.1	Processo de tratamento e características operacionais da ETE estudada.....	108
4.1.2	Sistema elétrico e de automação da ETE.....	111
4.1.3	Dados energéticos da ETE.....	112
4.2	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA.....	113
4.2.1	Etapa 1 – Produção de CH ₄	113
4.2.2	Etapa 2 – Produção de Energia Elétrica.....	122
4.2.3	Dimensionamento do Grupo Moto Gerador e Gasômetro.....	127
4.2.4	Etapa 3 – Análise de viabilidade técnica-econômica através da ferramenta VPL.....	128
4.3	ANÁLISE DO RISCO DO PROJETO POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS VAR E CVAR E DA SENSIBILIDADE DO PROJETO.....	134
4.3.1	Análise de Risco - VaR.....	134
4.3.2	Análise de Risco - CVaR.....	135
4.3.3	Análise de Sensibilidade.....	135
4.4	ANÁLISE DE CENÁRIOS DE PRODUÇÃO DE CH ₄ E ENERGIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE AMOSTRAGEM DOS DADOS DE ENTRADA DA FUNÇÃO DE CONVERSÃO.....	138
4.4.1	Cálculo de Produção de CH ₄ e Energia Elétrica.....	139
4.5	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ESTUDADA EM OUTRAS ETES.....	147
4.5.1	Análise dos dados de vazão médios do efluente – ETES 1, 2, 3 e 4 147	
4.5.2	Análise dos dados de DQO médios do efluente – ETES 1, 2, 3 e 4.....	149
4.5.3	Análise dos dados de Produção Diária de CH ₄ – ETES 1, 2, 3 e 4.....	150

4.5.4	Análise dos dados de Produção Diária de Energia Elétrica – ETEs 1, 2, 3 e 4	152
4.5.5	Dimensionamento dos Grupos Moto Geradores e Gasômetros – ETEs 1, 2, 3 e 4	154
4.5.6	Análise dos dados de Produção Mensal de Energia Elétrica – ETEs 1, 2, 3 e 4	155
4.5.7	Análise dos dados de Custos Evitados / Ganho com a Geração de Energia Elétrica mensal – ETEs 1, 2, 3 e 4	157
4.5.8	Análise dos VPLs – ETEs 1, 2, 3 e 4	159
4.5.9	Análise dos VaR e CVaR – ETEs 1, 2, 3 e 4.....	162
4.5.10	Análise de Sensibilidade – ETEs 1, 2, 3 e 4.....	163
4.6	SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	172
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	174
5.1	CONCLUSÃO.....	174
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	176
	REFERÊNCIAS	177

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de constantes investimentos em infraestrutura produz o bem-estar à população de um país. A escassez desses investimentos em uma nação pode desencadear uma série de problemas afetando a sua riqueza (AFONSO, 2000, p. 1). Em função disso, nos últimos anos o governo federal tem se preocupado com os problemas de falta de infraestrutura em diversas áreas, com o chamado "Custo Brasil" e com o baixo desempenho de crescimento quando comparado com outros países do BRICS durante os anos de 2001 a 2006. Uma das ações criadas pelo governo federal neste âmbito foi o PAC, que no ano de 2007 propôs investir 503,9 bilhões de reais em obras de infraestrutura, sendo previstos investimentos em infraestrutura logística (rodovias, ferrovias, portos, hidrovias e aeroportos), infraestrutura energética (geração e transmissão de energia elétrica, refino de petróleo e gás) e infraestrutura social e urbana (habitação e saneamento, transporte urbano e recursos hídricos) (BRASIL, 2010, p. 5). Em 2011, o governo federal lançou o PAC 2 com a pretensão de investir mais 955 bilhões de reais nas áreas supracitadas, incluindo ainda investimentos na área de saúde e educação básica (BRASIL, 2011, p. 30).

Além dos investimentos e financiamentos que estão sendo realizados no setor de saneamento ambiental, faz-se importante que cada empresa, autarquia ou secretaria administre os seus correspondentes sistemas de forma eficiente. Conforme a lei federal 11.445 de 05/01/2007, que estabelece diretrizes para o saneamento básico, um dos princípios fundamentais para o serviço público de saneamento básico é a eficiência e sustentabilidade econômica (BRASIL, 2016). Para que as empresas responsáveis pela gestão e operação de sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário alcancem a eficiência e a sustentabilidade econômica é fulcral que sejam aproveitados ao máximos os recursos disponíveis. Além disso, os serviços públicos de saneamento básico devem ter asseguradas a sua sustentabilidade econômico-financeira, mediante a cobrança por diversos serviços descritos na lei federal acima descrita. Essa cobrança visa fomentar: o estímulo ao uso de tecnologias modernas e eficientes, compatíveis com os níveis exigidos de qualidade, continuidade, e segurança na prestação de serviços; a inibição do consumo supérfluo e o desperdício de recursos; e, a geração dos recursos necessários para a realização dos investimentos, objetivando o cumprimento das metas e objetivos do serviço.

Uma das formas para incrementar a eficiência e a sustentabilidade econômica dessas empresas é incentivar que os equipamentos instalados nessas unidades de saneamento possuam níveis aceitáveis de eficiência energética e hidráulica, pois tais instalações são projetadas e implantadas para operarem por décadas. Caso essa premissa não seja respeitada, uma concepção de projeto que não tenha como objetivo encontrar eficiência adequada poderá causar prejuízos à organização que irá operar o sistema. Isso poderá dificultar o acúmulo de recursos para investimentos em ampliação do sistema, pagamentos de obrigações e obtenção de lucro aceitável. A saber, as despesas em 2017 com energia elétrica no setor de saneamento representam em média 13,1% (R\$ 5.259,4 milhões) (BRASIL, 2019) dos valores de custeio das empresas responsáveis pelos sistemas de saneamento.

É importante ressaltar que o setor de saneamento é eletro-intensivo, representa 3% do consumo de energia elétrica no mundo, e está entre 2 e 3% do consumo de energia elétrica do Brasil (GOMES, 2010). Ademais, a energia elétrica é utilizada para o funcionamento de: conjuntos motobomba que realizam o recalque de água bruta, tratada e, de esgoto; sistemas de aeração (sopradores, misturadores) para realizar o tratamento de esgoto e de outros equipamentos elétricos necessários para realizar o tratamento de água. Conforme descrito em (MME, 2011, pg. 87), as despesas com energia elétrica em 2007 no setor de saneamento atingiram R\$ 2,58 bilhões, sendo que nos 4000 municípios atendidos com sistemas de saneamento o custo com energia elétrica representa: 15,65% - primeira maior despesa, 36,57% - segunda maior despesa, 33,70% - terceira maior despesa e 14,08% - quarta maior despesa.

Para manter os investimentos e dar prosseguimento a universalização do saneamento no Brasil, é necessário ampliar os sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário e, conseqüentemente, o consumo de energia elétrica nesses sistemas. Além disso, faz-se necessário atender o crescimento vegetativo da população. Logo, a longo e médio prazo o sistema elétrico brasileiro precisará suprir essa demanda. Para tanto, a matriz de energia elétrica brasileira precisará ser diversificada, pois caso existam problemas com estiagem, crise do petróleo, quebra de safra, bem como outros imprevistos nas fontes de energia elétrica, com a diversidade destas, as conseqüências para a sociedade podem ser menos malélicas.

Conforme ANEEL (2019), atualmente a matriz de energia elétrica brasileira é proveniente de fontes hídricas (60,541%), fóssil (14,908%), eólica (8,665%),

biomassa (8,536%), importação (4,695%), solar (1,209%) e nuclear (1,144%). Em função da necessidade da busca da diversificação nessa matriz, há esforços por parte da União e da sociedade em efetuar mudanças. O Ministério de Minas e Energia prevê para 2023 as seguintes participações das fontes de geração: fontes hídricas (63,4%), fóssil (14,5%), eólica (11,5%), biomassa (7,1%), solar (1,8%) e nuclear (1,7%) (BRASIL, 2014, pg. 94).

Em 2017, o consumo de energia elétrica no Brasil foi distribuído nas seguintes classes: industrial (35,8%), residencial (28,8%), comercial (18,9%), rural (6,0%), poder público (3,2%), serviço público (3,3%), iluminação pública (3,3%) e próprio (0,7%) (EPE,2014). Conforme a EPE (2014), em 2050 a projeção do consumo de energia elétrica no Brasil (incluindo a autoprodução), terá a seguinte característica por classe: industrial (37,5%), comercial (26,6%), residencial (21,4%) e outros (14,6%). Considerando um cenário brasileiro de consumo de energia elétrica, similar ao nível de crescimento mundial, é possível prever que o consumo de energia elétrica irá se elevar de 140000 TWh em 2015 para 225000 TWh em 2030 (BRASIL, 2007, p.212). É importante frisar que, a classe “serviço público” inclui os serviços das subclasses de tração elétrica e água, esgoto e saneamento (EPE, 2014, p. 199).

Além da redução do consumo de energia elétrica por meio da eficiência energética nas instalações de saneamento, é possível explorar os potenciais energéticos provenientes de estações de tratamento de esgoto (ETEs) que utilizam o processo anaeróbio. Conforme SILVA (2015), no tratamento anaeróbio é produzido gás combustível, comumente chamado de biogás. Este biogás pode ser utilizado como combustível para: caldeiras, motores de combustão interna ou turbinas e sistemas de secagem térmica.

Segundo Chernicharo e Possetti (2015 apud NOYOLA *et al.*,2006), o biogás é uma mistura de gases gerado durante a digestão anaeróbia da matéria orgânica, sendo que sua composição pode variar em função do tipo da matéria orgânica, condições físico-químicas no interior do digestor e da presença de ânions, como sulfatos e nitratos. Além disso, o biogás gerado a partir de reatores que tratam o esgoto doméstico apresenta na sua composição 70 a 80% v/v de metano, sendo que o potencial energético do biogás está relacionado com a presença de metano em sua composição. A equivalência energética do biogás (1 m³) comparada com outros gases é: 0,61 - Gasolina, 1,54 (Lenha), 0,79 (Etanol). Em função da demanda energética mundial estar ainda fundamentada na utilização de combustíveis fósseis e não

renováveis, é necessário que outras fontes de energia sejam exploradas. Uma das fontes para o suprimento da demanda é o biogás. A utilização do biogás pode oferecer: benefícios ambientais, pois pode reduzir as emissões de metano para atmosfera; e econômicos e energéticos, sendo que é um recurso energético local e renovável. Na União Europeia a produção de biogás foi responsável pela geração de 14,6 TWh, sendo o Reino Unido o principal produtor de biogás e a Alemanha o principal gerador de eletricidade (Chernicharo e Possetti, 2015).

Conforme Lobato (2011), a produção de biogás diária em Estações de Tratamento Anaeróbio de esgoto doméstico é dependente da vazão e da concentração da DQO do afluente da estação, bem como dos cenários de produção que tratam de principalmente perdas do CH_4 durante o processo de tratamento, concentração de sulfato no afluente, eficiência de remoção da DQO e de sulfato, bem como outras grandezas. Em função dessas variáveis, a produção do biogás pode variar principalmente devido a quantidade de chuvas ocorridas na bacia atendida pela ETE, características construtivas, de operação e manutenção da Estação, bem como as características do esgoto. Devido as estas incertezas, torna-se necessário determinar os fatores que são determinantes para a produção do biogás.

Uma das formas para utilizar o biogás, diversificar a matriz elétrica brasileira, gerar energia elétrica e aumentar a sustentabilidade ambiental, econômica e financeira das empresas de saneamento básico é a utilização da geração distribuída em suas instalações. Geração Distribuída (GD) é a geração de energia localizada próxima ao consumidor final, cuja instalação objetiva atendimento prioritário a este, podendo ou não gerar excedentes energéticos comercializáveis para além das instalações do consumidor final (EPE, 2016, p.62).

Este tipo de geração tem crescido no Brasil e em junho de 2019 atingiu a potência instalada de 1GW, com 114.300 unidades consumidoras que recebem créditos pela energia gerada. A fonte mais utilizada é a solar fotovoltaica (870MW), seguida pelas CGHs (81,3MW) (ANEEL, 2019).

A motivação do aumento de adesões de consumidores foi incentivada pela publicação da Resolução Normativa ANEEL nº 482 de 17 de abril de 2012, modificada pelas Resoluções Normativas ANEEL nº 687/2015 e nº 786/2017, da ANEEL que estabelece condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição, o sistema de compensação de energia elétrica, bem como outras providências relativas ao assunto.

Vale ressaltar que conforme a Resolução Normativa, microgeração distribuída é a central geradora que possui potência instalada menor ou igual a 75 kW e minigeração distribuída é a central geradora que possui potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada ou demais fontes renováveis de energia elétrica. Conforme regulamentação ANEEL, além de estar conectada à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras. O supracitado sistema de compensação de energia elétrica é um sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa (ANEEL, 2015). Visando padronizar o acesso dos consumidores a micro e a minigeração distribuída, a ANEEL, por meio da revisão 5 do módulo 3 do PRODIST, definiu responsabilidades e procedimentos para o acesso ao sistema de distribuição incluindo etapas para a viabilização do acesso, critérios técnicos e operacionais, requisitos de projetos, implantação de novas conexões, sistema de medição e contratos (ANEEL, 2012).

Conforme Cardoso Moreira (2017), atualmente são encontradas no Brasil as seguintes ETEs que possuem o aproveitamento do biogás para geração distribuída de energia elétrica, sendo elas:

- ETE Ouro Verde – Companhia: Sanepar / PR;
- ETE Arrudas – Companhia: COPASA / MG;
- ETE Ribeirão Preto – Companhia: DAERP / Ribeirão Preto – SP;
- ETE Jacuípe II - Companhia: EMBASA / BA;
- ETE Barueri – Companhia: SABESP / SP;
- ETE Belém – Companhia: CS Bioenergia S.A. / PR;
- ETE Ibité – Companhia: COPASA / MG.

Vale ressaltar que o sistema de geração de energia elétrica na ETE Barueri teve caráter experimental operando apenas no período de pesquisa e estudos (SILVA, 2015, apud COSTA, 2006).

A ETE Ouro Verde está adequada à Resolução Normativa 482/2012 da ANEEL (CARDOSO MOREIRA, 2017). Segundo o Engenheiro Gustavo Rafael

Collere Posseti¹, a Central Elétrica da CS Bioenergia é um exemplo de minigeração que opera em paralelo permanente com a rede da COPEL.

A utilização do biogás produzido nas ETEs para geração de energia elétrica ou térmica é uma das formas de torná-las sustentáveis, tendo em vista que este combustível pode ser utilizado como fonte de renda ou como meio de redução dos seus custos operacionais. Para que essa ação seja vantajosa às empresas que operam SES, é de extrema importância que as decisões de investimento na implantação de sistemas de recuperação energética (eletricidade ou calor) sejam pautadas em análises de viabilidade técnica e econômica, bem como nos levantamentos dos riscos econômicos que o empreendimento oferece.

Baseado em todas as informações supracitadas, a contribuição a ser obtida no término desta pesquisa de mestrado é definir metodologia de análise de viabilidade técnica-econômica e de risco para aplicação em sistemas de geração distribuída em ETEs anaeróbias que tratam esgoto doméstico.

1.1 OBJETIVOS

Na sequência são apresentados o objetivo geral, bem como os objetivos específicos deste trabalho.

1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver procedimentos e metodologias de análise de viabilidade técnica-econômica, e de análise de risco, aplicáveis aos estudos de implantação de sistemas de geração distribuída de energia elétrica a partir do biogás gerado em estações de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar um método utilizando critérios probabilísticos e estocásticos de produção diária de biogás e energia elétrica em uma Estação de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Doméstico, baseado nos dados históricos de vazão e concentração do afluente da ETE;

¹ Gustavo Rafael Collere Possetti é Engenheiro Ambiental e atualmente é Gerente da Gerência Pesquisa e Inovação da Sanepar, informação verbal, Curitiba, 23 de setembro de 2019.

- Determinar metodologia de utilização de amostragem de bandeiras tarifárias na estimação do custo evitado com energia elétrica da ETE, em função do seu histórico de utilização.
- Desenvolver metodologia de análise de viabilidade técnica-econômica, e de análise de risco, de projetos de sistemas de geração distribuída de energia elétrica através do biogás gerado em Estações de Tratamento Anaeróbio de Esgoto doméstico, utilizando análise de VPL e de sensibilidade, técnicas de análise de avaliação de risco condicional (VaR e CVaR) de investimento e simulação de Monte Carlo;
- Desenvolver um estudo de caso de análise de viabilidade técnica-econômica, e de risco de investimento, para quatro Estações de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Doméstico que participaram do Projeto Medições de Biogás em Reatores Anaeróbios (BRASIL, 2016).

1.2 JUSTIFICATIVA

Algumas das obrigações das empresas de saneamento no Brasil são: o atendimento do Plano Municipal de Saneamento Básico, realizar investimentos para ampliação e melhorias em seus sistemas de abastecimento de água e esgotamento sanitário, operar e manter esses sistemas, atendimento às normas de qualidade de água e de emissões de efluente das ETEs. Para isto, faz-se importante que a empresa possua um sistema de gestão eficiente e preze pela excelência em seus processos.

Para que a gestão eficiente seja implantada nestas empresas, um dos quesitos necessários é o combate ao desperdício e uso eficiente dos recursos. A energia elétrica é um dos principais insumos das empresas de saneamento, figurando entre o primeiro e quarto lugar nas despesas.

Ademais, faz-se importante utilizar de forma otimizada recursos disponíveis e viabilizar a utilização de recursos ainda não utilizados. Um destes recursos é o aproveitamento energético do biogás produzido a baixo custo nas ETEs. Esse biogás pode ser utilizado para secagem térmica de lodo produzido na própria ETE, bem como pode ser aproveitado para gerar energia elétrica.

Tendo em vista que grande parte das ETEs anaeróbias no Brasil podem ser enquadradas como micro e minigeração distribuída é importante que sejam realizados

estudos que analisem a viabilidade técnica-econômica, e de análise de riscos do investimento considerando uma análise probabilística de geração de energia elétrica.

Há uma necessidade crescente que a SANEPAR possua profissionais que congreguem conhecimentos nas especialidades de geração de energia elétrica, tratamento anaeróbio de esgoto e produção de biogás, análise de viabilidade técnica-econômica, bem como análise de riscos de investimentos.

Torna-se importante também estudar em qual cenário e em quais condições a implantação de micro e minigeração distribuída torna-se viável tanto técnica-econômica, levando em conta o perfil do setor de saneamento.

Vale ressaltar que as pesquisas para esta dissertação foram baseadas nos dados disponibilizados pelo Projeto Medições de Biogás em Reatores Anaeróbios (BRASIL, 2016). Em função disto, visando dar robustez a metodologia estudada, foi possível realizar simulações para mais de uma ETE.

Em função do projeto ter como âmbito estudar metodologia de análise de viabilidade e de risco do investimento para implantação de geração distribuída em ETEs a partir do biogás, a execução do mesmo é aderente aos tópicos preferenciais do Programa de Pós-Graduação em Sistema de Energia da UTFPR, na temática de processamento de energia proveniente de fontes renováveis de energia. Em função da SANEPAR estar pesquisando alternativas para aumentar a eficiência energética de suas instalações e melhorar seus processos, é importante ressaltar que este projeto possuiu apoio técnico e financeiro da SANEPAR através da Assessoria de Pesquisa e Desenvolvimento.

1.3 SÍNTESE DA METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Para a elaboração desta dissertação foram desenvolvidas pesquisas bibliográficas sobre biogás gerado em ETEs anaeróbias, tecnologias de conversão energética do biogás, sistemas implantados de geração de energia elétrica através do biogás de ETEs no Brasil e no Mundo, bem como ferramentas de análise de risco (VaR e CVaR) e métodos de simulação de Monte Carlo Não Sequencial.

Para desenvolvimento da metodologia de viabilidade e de análise de risco, foram analisados o Modelo de Produção de CH₄ proposto por Lobato (2011), o *Software* de Produção de Biogás Probio 1.0, os dados históricos de produção de biogás disponibilizados pelo Projeto Medições de Biogás em Reatores Anaeróbios

(2016), e a variação dos dados de vazão e DQO médios do afluente da ETE em função dos dias da semana.

Após de analisar estes dados, através de uma planilha eletrônica em Microsoft Excel 2013[®], foi desenvolvida uma função de conversão para determinar a produção diária de CH₄ da ETE. Para esta função de conversão, foram definidos como dados de entrada, os valores médios diários de vazão e DQO do afluente desta Estação, disponibilizados pelo Projeto Medições de Biogás em Reatores Anaeróbios (2016). Além disto, o modelo requer que sejam utilizados os dados de um de três cenários de produção (Pior, Normal e Melhor).

Ao analisar os dados médios de vazão e DQO do afluente da ETE, foram elaborados histogramas que representaram os históricos de suas frequências, durante aproximadamente um ano. Com estas informações, foram determinadas quais das distribuições de probabilidade conhecidas mais se pareciam com os dados de campo. Em relação ao cenário de produção de CH₄, por se tratar de análise de viabilidade e de risco investimento, conservadoramente optou-se pelo cenário Pior. Vale observar que ao definir qualquer um dos cenários, é necessário utilizar na função de conversão os valores das oito grandezas definidos para este fim.

Para a análise de viabilidade econômica optou-se em utilizar a ferramenta VPL, e para análise do risco de investimento, optou-se em utilizar as ferramentas VaR e CVaR. Para realizar a análise de risco através destas ferramentas foi necessário que fosse elaborado um histograma de frequência anual de VPLs. De acordo com isto, definiu-se o tamanho da amostra aleatória de cada grandeza utilizada no estudo.

Para tal, visando ter confiabilidade no processo de análise de risco do investimento, foi necessário utilizar uma amostra de 5000 valores anuais para construção de um histograma de VPLs, considerando dezoito anos como duração aproximada do empreendimento. Para auferirmos este montante, foi necessário estimar 5.000 valores aleatórios de Fluxo de Caixa Operacional e de investimento cada. O Fluxo de Caixa é contabilizado por ano, porém as receitas com ganho / custo evitado com energia elétrica, bem como os custos de operação e manutenção da planta são contabilizadas mensalmente, foi necessário adotar 60.000 amostras aleatórias destas grandezas. Para obtermos 60.000 amostras com custo evitado / ganho com energia elétrica, foi necessário levantar 60.000 amostras aleatórias de produção mensal de energia elétrica. Conseqüentemente foi definida necessidade de levantar 1.800.000 amostras diárias produção de energia elétrica e CH₄. Para termos

esta quantidade de resultados, foi necessário obtermos 1.800.000 amostras aleatórias de valores médios diários de vazão e DQO do afluente da ETE, geradas a partir dos parâmetros de suas distribuições normalizadas encontradas. Além do mais, cada uma das oito variáveis relativas ao cenário de produção, recebeu 1.800.000 amostras aleatórias baseada na distribuição normal.

De posse das 1.800.000 amostras aleatórias referentes aos dados de entrada, através da função de conversão, foram determinadas 1.800.000 amostras diárias do volume médio CH₄ e energia elétrica. Para determinar as amostras de produção mensal de energia elétrica, através do conjunto de 1.800.000 amostras diárias, somou-se o conjunto de trinta valores aleatórios, na sequência que foram gerados, resultando em 60.000 destas amostras aleatórias.

A partir dos valores médios diários de produção de CH₄ e energia elétrica, foram dimensionados o volume do gasômetro e a potência do grupo moto gerador. Visando a análise das diferenças de comportamento de produção diária versus mensal, foram elaborados histogramas de frequência para representar as produções diárias do volume de CH₄ e energia elétrica, e a produção mensal desta energia.

Para determinar a viabilidade técnica-econômica, foi necessário inicialmente gerar 60.000 amostras do custo evitado / ganho com geração de energia da ETE. Para isto, foram geradas 60.000 amostras aleatórias de bandeiras tarifárias, baseadas na proporção histórica compreendida entre janeiro/2015 a maio/2019. Associando a contribuição das bandeiras tarifárias, com os valores das tarifas de consumo e as 60.000 amostras mensais de produção de energia elétrica, determinou-se estas amostras.

Para determinar o Fluxo de Caixa Operacional, foram geradas 60.000 amostras aleatórias (baseadas em distribuições triangulares) dos elementos que compõe os custos de operação e manutenção da central elétrica. Com os valores de receita e custos operacionais, foi possível determinar 60.000 valores de LAJIR. Para determinar as amostras do LAJIR anual, através do conjunto de 60.000 amostras mensais, somou-se o conjunto de doze valores aleatórios, na sequência que foram gerados. De posse das 5.000 amostras de Lucro Antes dos Juros e Imposto de Renda (LAJIR) anual e dos valores de Imposto de Renda de Pessoa Jurídica (IRPJ) e da Contribuição Social sobre o Lucro Líquido (CSLL), foi possível determinar 5.000 amostras aleatórias de Fluxo de Caixa Operacional.

Para determinar o Fluxo de Caixa do Investimento, optou-se em gerar 5.000 amostras aleatórias baseadas em distribuição triangular. O valor da moda da distribuição considerou investimentos em projeto, obra, aquisição de equipamentos, e serviços.

De posse das amostras dos Fluxos de Caixa de Investimento e Operacional, em conjunto com as amostras da duração do empreendimento (gerado a partir de distribuição triangular) e o custo do capital, foi possível determinar 5.000 amostras aleatórias de Valor Presente do Projeto (VPP) e Valor Presente do Investimento (VPI), e Valor Presente Líquido (VPL)

Através dos 5.000 valores de VPL foi possível: elaborar um histograma de frequência e uma curva de probabilidade acumulada; determinar a viabilidade do projeto associando a curva de probabilidade acumulada; determinar os valores os valores de VaR e CVaR para níveis de confiança de 95%, 99% e 99,5%, bem como efetuar análise de sensibilidade do projeto. Esta análise de viabilidade técnica-econômica, de risco de investimento, e sensibilidade, foi realizada em 4 ETEs distintas visando verificar a abrangência da metodologia proposta e procurando encontrar semelhanças em seus resultados.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este capítulo introdutório apresenta uma introdução ao tema, objetivos, justificativa, metodologia e estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta uma revisão acerca das tecnologias de produção de biogás em Estações de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Doméstico, geração de energia elétrica através do biogás produzido em ETEs, além de descrições de técnicas de análise de risco como *Value at Risk* (VaR) e *Conditional Value at Risk* (CVaR). Foram apresentadas também as técnicas de Monte Carlo sequencial e não sequencial.

O capítulo 3 relata a metodologia desenvolvida para análise de viabilidade técnica-econômica, e de risco de investimento para empregar em ETEs anaeróbia de esgoto doméstico. Para isso, foi apresentado a metodologia da função de conversão para produção diária de CH₄, adequações que foram realizadas na função de conversão em função do cenário estudado. Além do mais, foi apresentado o processo que contém a metodologia de análise de viabilidade e do risco de investimento.

O capítulo 4 apresenta os resultados de aplicação da metodologia para em quatro ETEs que se situam em diversos pontos do Brasil.

Por fim, o capítulo 5 apresenta considerações finais, incluindo conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo apresenta a descrição de um referencial teórico estendido cujo estudo e levantamento foram foco do trabalho. Na seção 2.1, descrevem-se as tecnologias de produção de biogás em Estações de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Doméstico. Na seção 2.2, apresentam-se processos e detalhes acerca da geração de energia elétrica através do biogás. Na seção 2.3, conceitos da simulação de Monte Carlo, e métodos de análise de risco e estimação de indicadores de desempenho são descritos. Considerações finais são apresentadas na seção 2.4.

2.1 TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO ANAERÓBIO DE ESGOTO DOMÉSTICO.

Nesta seção são tratadas as tecnologias de produção de biogás gerado em Estações de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Doméstico. Para isso, são comentadas as características do biogás, abordando sua composição química, aplicação como combustível, e poder calorífico. Também são apresentadas as características dos reatores UASB, informando onde são aplicados, vantagens e desvantagens da utilização, características construtivas, princípio de funcionamento. Para os critérios de produção de biogás, tratou-se de balanço de massa, rotas de conversão do biogás e modelo de produção de biogás.

2.1.1 O Biogás

Conforme CETESB (2006), o biogás é uma mistura gasosa resultante da degradação anaeróbia da matéria orgânica dos resíduos sólidos com aqueles depositados em aterros sanitários e dos efluentes industriais e esgotos domésticos tratados pelo processo anaeróbio. Essa mistura gasosa é formada principalmente por metano e dióxido de carbono, em média, em partes iguais. Quanto maior a fração de metano, mais energia por unidade de massa o biogás contém. Além da presença do metano no biogás, há ainda a presença de dezenas outras substâncias, tais como o gás sulfídrico, causador de mau cheiro, traços de siloxinas, que reduzem a vida útil dos equipamentos de uso energético, e vapor d'água, bem como outras substâncias.

Conforme Noyola et al (1988), o biogás quando é gerado por meio do tratamento anaeróbio de esgoto doméstico, é composto pela mistura de mistura de

metano (70–80%), nitrogênio (10–25%) e dióxido de carbono (5–10%), sendo muito influenciados pela temperatura operacional (Noyola et al., 1988).

O biogás pode também ser gerado em biodigestores, através do lodo do esgoto doméstico quando este é proveniente do tratamento aeróbio. É composto pela mistura de metano (60 a 75%), gás carbônico (25 a 35%), óxido de carbono (2 a 4%), e oxigênio, nitrogênio, hidrocarbonetos, gás sulfídrico, em menores quantidades (JORDÃO, 2011).

Conforme Machado (2011), sua formação é resultado da digestão anaeróbia, definida por um processo de fermentação que tem como objetivo a remoção de matéria orgânica, a formação de gases e a produção de biofertilizantes. Pode ser também produzido através de resíduos orgânicos como esterco, lodo de esgoto, lixo doméstico, resíduos agrícolas, efluentes industriais e plantas subaquáticas (quando não for resultado de digestão anaeróbia). Para este caso, torna-se necessária a utilização de um biodigestor. Este trabalho irá tratar do biogás produzido em sistemas anaeróbios.

Segundo Pecora (2006), a produção do biogás é dependente de diversos parâmetros da digestão anaeróbia, sendo eles: impermeabilidade do ar, natureza do substrato, composição dos resíduos, teor de água, temperatura e pH.

Devido ao metano ter solubilidade baixa, este é rapidamente separado da fase líquida. Na grande maioria das vezes o biogás produzido nas ETEs é queimado através de queimadores do tipo *flare*. Esta medida torna-se necessária uma vez que esse gás produz um impacto ambiental quando é emitido diretamente na atmosfera, podendo contribuir com o aumento do efeito estufa. Vale ressaltar que tendo o esgoto como fonte, o Brasil é o responsável pela emissão de 4% do metano no mundo (FRANÇA JUNIOR, 2008; JORDÃO, 2015).

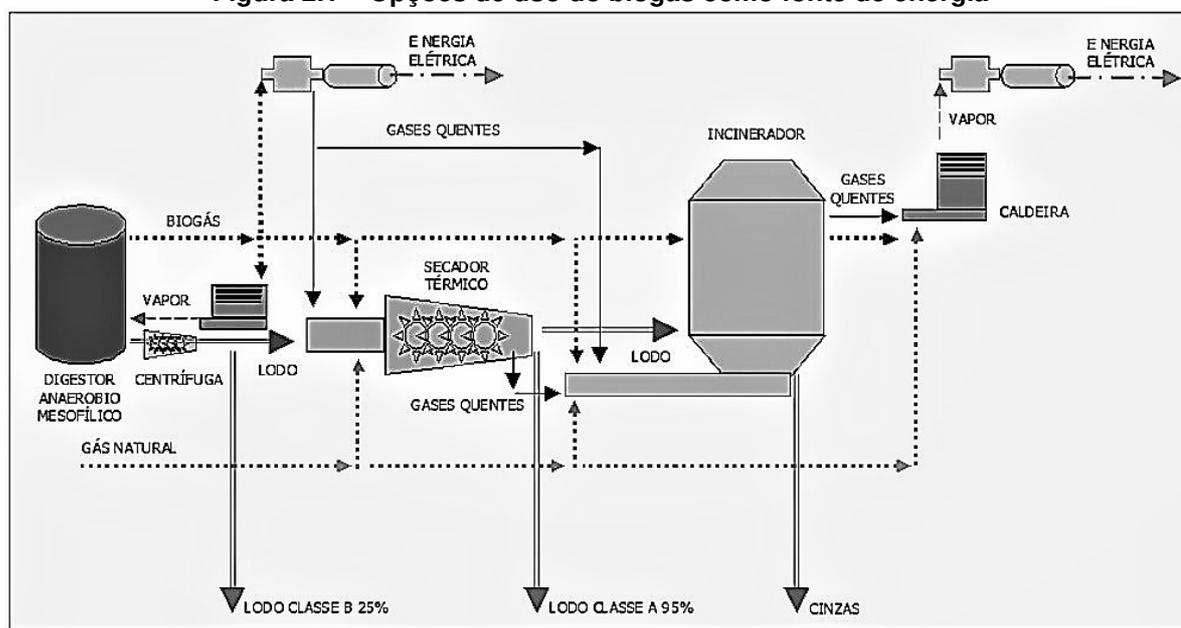
Conforme Brasil (2015), devido às fontes de energia estarem cada vez mais escassas e conseqüentemente seus custos estarem mais altos, não se justifica mais a simples queima do biogás nas ETEs. O biogás pode ser utilizado em múltiplas aplicações, como:

- produção de fluído quente ou vapor através de caldeiras;
- secagem de lodo de ETE com o objetivo de redução de volume e higienização do material, através de secadores rotativos diretos e indiretos, secadores de esteira diretos, secadores de caçamba diretos com misturadores internos, e secadores solar-térmicos;

- geração de energia elétrica para atendimento às ETEs de forma parcial, total, ou total com a utilização de excedente para compensação ou venda;
- geração conjunta de energia elétrica e térmica (cogeração);
- uso como combustível veicular;
- cessão do biogás a terceiros/injeção na rede de gás natural

Jordão (2011) trata das diversas utilizações para o biogás. Pode-se observar a partir da Figura 2.1, as diversas opções para utilização do biogás como fonte de energia calorífica e/ou energia elétrica.

Figura 2.1 – Opções de uso do biogás como fonte de energia



Fonte: Jordão (2011).

Seguem opções de utilização:

- ao se digerir o lodo e na sequência desidratá-lo com cerca de 25% de teor de sólidos, pode-se utilizá-lo como biossólido classe B;
- o biogás (opção A) gerado pode ser utilizado para geração de calor e vapor;
- o lodo quando desidratado (opção A), pode ser submetido por um processo de secagem térmica, e aproveitado como biossólido classe A (teor de sólidos de 90%);
- o secador térmico pode ter como combustível o biogás gerado;

- o lodo desidratado pode ser encaminhado ao um incinerador aproveitando como fonte de energia, o biogás e os gases aquecidos. As cinzas produzidas pelo incinerador (subproduto) podem ser utilizadas na construção civil;
- os gases quentes podem ser aproveitados, via trocador de calor, para aquecer e aumentar o rendimento dos digestores;
- em qualquer estágio do processo apresentado na Figura 9, após sofrer a devida purificação, o biogás pode ser utilizado para geração de energia elétrica, através fontes motrizes como motores de combustão interna, turbinas e células combustíveis. Os gases de escape dessas fontes motrizes podem ser utilizados como fonte de calor.
- ao se aproveitar os gases quentes da incineração e do biogás, é possível geração de vapor em caldeiras;
- quando o biogás é simplesmente queimado, o aproveitamento energético é zero.

Visando analisar a composição das características físicas e química do biogás produzido em ETEs anaeróbias (60% de CH₄), em comparação com o gás natural e gás de síntese, apresenta-se na Tabela 2.1 essas informações (BRASIL, 2015).

Tabela 2.1 – Características de diferentes tipos de gases
Fonte: Brasil (2015) apud. Wellinger & Lindberg (2000)

PARÂMETRO	UNIDADE	GÁS NATURAL	GÁS DE SÍNTESE	BIOGÁS (60% CH ₄)
Poder calorífico inferior*	MJ.m ⁻³	31,8	16,1	21,5
	kcal.m ⁻³	7.600	3.846	5.134
Densidade	kg.m ⁻³	0,82	0,51	1,21
Índice de Wobbe [inferior]	MJ.m ⁻³	39,9	22,5	19,5
Velocidade máxima de chama	m.s ⁻¹	0,39	0,7	0,25
Requisito teórico de ar	m ³ ar. m ⁻³ gás	9,53	3,83	5,71
Concentração máxima de CO ₂ após combustão	% [v]	11,9	13,1	17,8
Ponto de condensação	°C	59	60	60-160

(*) A elevada fração de nitrogênio no biogás de reatores anaeróbios deve-se ao N₂ dissolvido no esgoto doméstico afluente ao reator.

A partir da Tabela 2.1, observa-se que o biogás possui um poder calorífico superior ao gás de síntese (também conhecido como gasogênio), porém inferior ao gás natural. É importante citar que poder calorífico “indica a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor, quando submetido à

queima, sendo extremamente importante nos processos de tratamento térmico dos resíduos” (SOARES, 2011, p.9).

Para uma análise comparativa mais completa do poder calorífico do biogás, na Tabela 2.2, apresenta-se a comparação com outros oito gases combustíveis.

Tabela 2.2 – Poder calorífico de alguns gases combustíveis
Fonte: Brasil (2015) apud. Cosntant et. al (1989)

COMBUSTÍVEL	MJ.kg ⁻¹	MJ.Nm ⁻³	kWh.Nm ⁻³	EQUIVALÊNCIA COM O METANO
Metano	50,0	35,9	10,0	1,0
Gás natural	45,1	31,8	8,8	0,9
Biogás típico [60% CH ₄]	30,0	21,5	6,0	0,6
Butano	45,7	118,5	32,9	3,3
Propano	46,4	90,9	25,2	2,5
Metanol*	19,9	15.900	4.415,4	442,9
Etanol*	26,9	21.400	5.942,8	596,1
Gasolina*	45,0	33.300	9.247,4	927,6
Diesel*	42,1	34.500	9.580,7	961,0

(*) MJ.m⁻³ e kWh.m⁻³

Tendo conhecido as características do biogás, na sequência, serão apresentadas as características do reator UASB, tendo em vista que é o mais utilizado nos processos de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico.

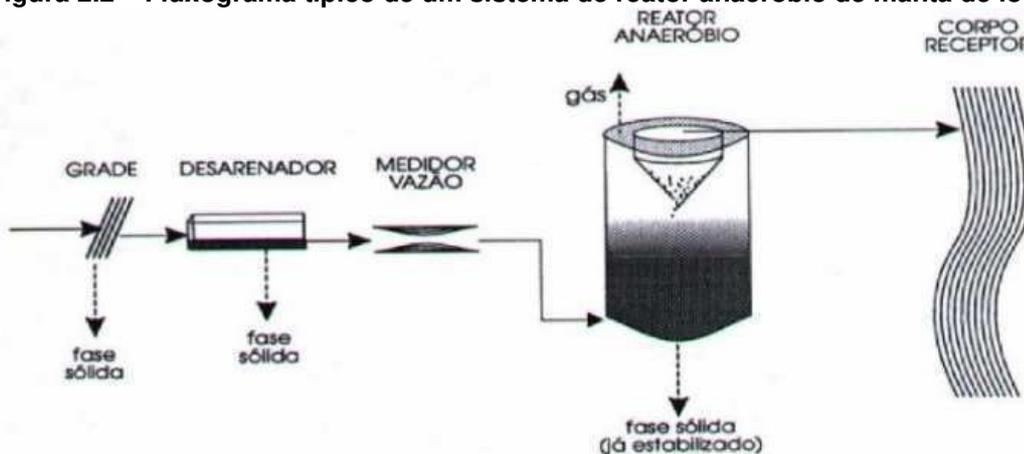
2.1.2 Reatores Anaeróbios de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo

Conforme Brasil (2015), o tratamento de esgoto realizado pelo método anaeróbio é bastante difundido pelas Companhias de Saneamento brasileiras, tendo em vista o seu baixo custo operacional. Na grande maioria dos casos, o tratamento é realizado através do equipamento chamado UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanke) (von SPERLING, 1996).

No Brasil foram cadastradas 2.344 ETEs, sendo que a tecnologia de tratamento via UASB é a mais predominante do país, seguida de Filtro (13%), Lagoa anaeróbia seguida de Lagoa facultativa (12%), e Reator anaeróbio seguido de tratamento terciário (12%) (BRASIL, 2016).

Conforme Von Sperling (1996), este modelo de reator (UASB) surgiu no final da década de 1970 na Holanda. Neste sistema a entrada do esgoto é realizado pelo fundo em fluxo ascendente, conforme representado na Figura 2.2, bem como dispunha de um sistema de separação de fases líquidas, sólidas e gasosas na parte superior com lodo suspenso formando flocos e grânulos.

Figura 2.2 – Fluxograma típico de um sistema de reator anaeróbio de manta de lodo



Fonte: Von Sperling (1996).

No início de sua aplicação era utilizado em esgotos com alta concentração de DBO e DQO (esgoto industriais).

Vale ressaltar que neste documento que Demanda Biológica de Oxigênio (DBO) representa a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica por decomposição microbiana aeróbia para uma forma inorgânica estável. Também pode ser considerada pela quantidade de oxigênio consumido durante um período de tempo, numa temperatura de incubação específica, sendo um período de cinco dias a uma temperatura de 20°C. O aumento de DBO de um corpo de água pode ser consequência do despejo de elementos com um alto teor de matéria orgânica, que pode causar o desaparecimento do oxigênio neste corpo. Esse parâmetro é importante na elaboração de projeto bem como na operação das ETEs. Sua unidade é mg/l (CETESB, 2009).

Importante citar que a Demanda Química de Oxigênio (DQO) representa a quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica de uma amostra por meio de um agente químico (dicromato de potássio). Os valores da DQO são maiores que os valores da DBO, devido ao teste ser realizado em um prazo menor. A concentração da DQO no corpo de água é resultado de despejos industriais. Esse parâmetro tem o objetivo de, junto com a DBO, verificar a biodegradabilidade dos

despejos (CETESB, 2009, pg. 10). A relação típica entre DQO/DBO em esgotos domésticos varia entre 1,7 a 2,5, e indica a presença de efluentes industriais no esgoto doméstico. As vantagens da utilização da DQO sobre a DBO são: tempo menor de análise (duas horas através do método do dicromato), englobando não somente a demanda de oxigênio satisfeita biologicamente (DBO), mas tudo o que é susceptível a demanda de oxigênio (sais minerais oxidáveis) (JORDÃO, 2011).

Conforme Jordão (2011), a partir da década de noventa, esse processo ganhou notoriedade no Brasil, onde diversas pesquisas foram realizadas acerca do assunto. Além de pesquisas, foram implantados reatores UASB de grande porte nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná, sendo que neste último, através da SANEPAR, adotou-se o sistema como padrão para as ETEs.

2.1.2.1 Aplicação do Reator UASB

O tratamento anaeróbio é uma solução clássica para estabilização de esgotos domésticos devido a:

- grande acumulação de biomassa no interior do reator, provocando o aumento do tempo de residência dos microrganismos (inclusive organismos de crescimento lento) seja maior que o tempo de detenção hidráulico;
- melhor contato entre a biomassa e despejo; e
- melhor atividade de biomassa.

Os parâmetros fundamentais para a aplicação desses reatores estão relacionados com fatores ambientais, climáticos e de alimento, geometria, bem como características técnicas. Além disso, esses parâmetros são aliados ao conceito de tempo de retenção de sólidos biológicos, e tempo de detenção hidráulico. Almeja-se sempre um grande tempo de retenção de sólidos, aliado com um baixo tempo de hidráulico. A eficiência do tratamento anaeróbio de esgoto domésticos é comprovadamente limitada. Experiências apontam que o DQO encontra-se na faixa de 40 a 75%, e a remoção do DBO está na faixa de 45 a 85% (variação é devida ao tempo de detenção hidráulica).

2.1.2.2 Vantagens e Desvantagens da utilização do Reator UASB

Conforme Campos et al. (1999), as principais vantagens da utilização deste sistema são:

- compacticidade;
- custos de implantação e operação reduzidos;
- baixa produção de lodo;
- consumo de energia elétrica baixo;
- rápido reinício de operação, mesmo após longas paralisações;
- boa desidratabilidade do lodo.

Além disto, conforme Brasil (2015) reúne em um só equipamento as funções de:

- decantador primário,
- reator biológico,
- decantador secundário, e
- digestor da biomassa formada.

Embora este sistema possua diversas vantagens, há aspectos negativos que são atribuídos a este sistema, sendo:

- possibilidade de emanção de maus odores;
- baixa capacidade do sistema em tolerar cargas tóxicas;
- elevado intervalo de tempo necessário para a partida do sistema.
- Necessidade de etapa de pós-tratamento.

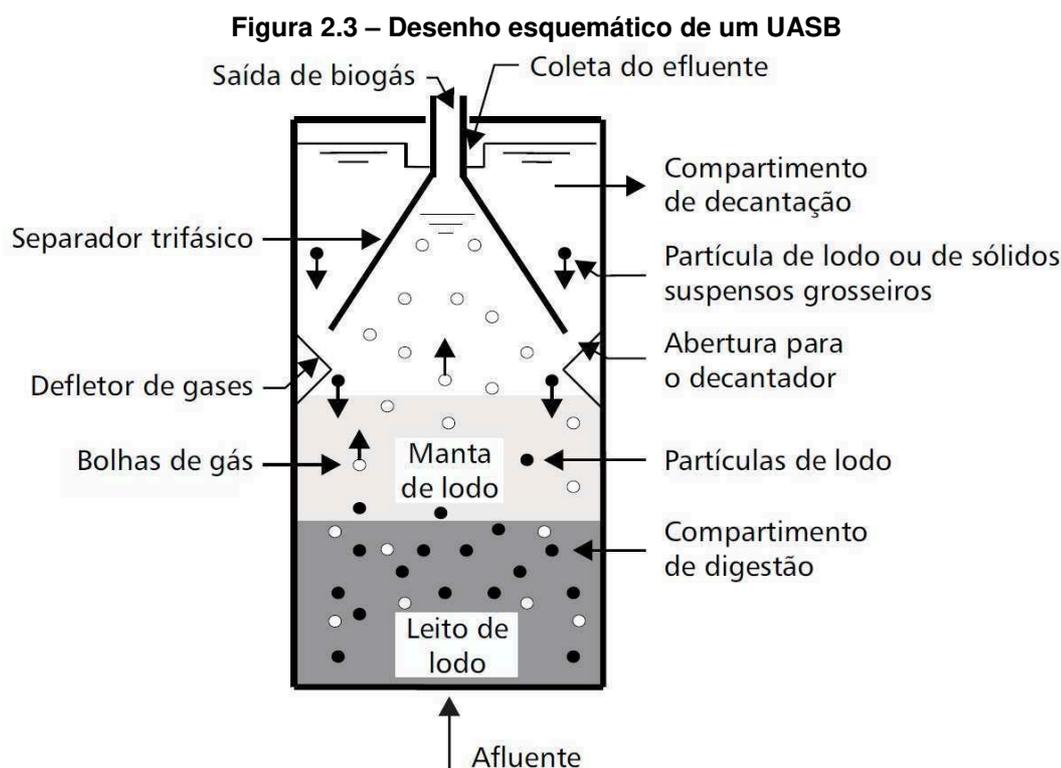
2.1.2.3 Características construtivas do Reator UASB

Conforme Jordão (2011), as principais partes constituintes de um UASB estão apresentadas na Figura 2.3, e são as seguintes:

- câmara de digestão: neste local encontram-se o leito de lodo e a manta de lodo, e é onde realiza-se a digestão anaeróbia do esgoto;
- defletor de gases (separador de fases): este dispositivo caracteriza uma zona de transição entre a zona de sedimentação e a câmara de coleta de gases, separando a fase sólida, da líquida e gasosa;
- zona de transição: local entre a compartimento de digestão e a zona de sedimentação superior;
- zona de sedimentação: ao entrar pela abertura da parte inferior do reator, o esgoto alcança os vertedouros de superfície com uma velocidade ascensional adequada para a sedimentação dos sólidos e flocos, os quais retornam pela abertura das paredes para a zona de transição e ao compartimento de

digestão. A parte líquida é recolhida com características de efluente clarificado;

- zona de acumulação de gases: os gases produzidos na fase de digestão são retidos em uma zona superior de acumulação, onde são coletados e pode ser enviados para a queima em *flares* ou eventualmente utilizados como combustível.



Fonte: Campos et al. (1999).

2.1.2.4 Princípio de Funcionamento do Reator UASB

Apresenta-se de forma resumida o princípio de operação deste reator.

Conforme Brasil (2015), antes do esgoto ser direcionado para este reator, torna-se necessários a realização de um tratamento preliminares compostos de remoção de detritos e areia. Na sequência o esgoto afluente adentra ao reator por meio através de um sistema de distribuição no instalado no fundo do reator, e é elevado (fluxo ascendente) para que entre em contato com o leito e a manta de lodo, e assim ocorra a digestão anaeróbia. Esta digestão é favorecida através do contato e mistura do esgoto sanitário com o lodo depositado no fundo do reator.

Após a digestão anaeróbia da matéria orgânica presente no esgoto, os seguintes subprodutos devem ser separados:

- efluente tratado,
- biogás; e
- lodo gerado.

Vale ressaltar que esta separação é realizada internamente ao reator e geralmente não necessita de energia elétrica para este fim.

Para isto a grande maioria do lodo, em função da sua densidade, fica depositado no fundo do reator. As partículas de lodo, que podem ser arrastadas para a parte de cima, em conjunto com o efluente e as bolhas de biogás entram em contato com o separador trifásico.

No entorno e acima do separador trifásico, encontra-se o compartimento de decantação, onde estas partículas de lodo, mais pesadas, são separadas do efluente líquido, retornando por gravidade ao fundo do reator.

As bolhas de gás se elevam na fase líquida até encontrarem a interface líquido-gás, presente no interior do separador trifásico. Nessa parte as bolhas se desprendem, formando uma fase gasosa, o biogás.

O defletor de gás é instalado abaixo das aberturas do separador trifásico, e tem a função de criar obstáculos para que as bolhas de gás formadas abaixo das aberturas do separador trifásico, sejam desviadas a fim de evitar que estas passem pelas mesmas aberturas e possam causar turbulências no compartimento de decantação.

Após este processo, o gás é conduzido para fora do reator através de tubulação que devem destiná-lo para tratamento ou aproveitamento energético. O efluente é conduzido para fora do reator é destinado ao corpo receptor ou para outros tratamentos complementares. O lodo, após de estabilizado, é encaminhado para o seu devido tratamento.

2.1.3 Critérios de produção de biogás

Para a determinação da taxa de produção de biogás em um sistema anaeróbio, é necessário que balanço de massa no interior do reator UASB seja considerado. Este balanço de massa diferencia quantitativamente a DQO dos substratos entre os três principais destinos do processo anaeróbio:

- Conversão de DQO em biogás;
- Conversão de DQO em biomassa;

- Permanência de DQO no efluente.

No balanço, a massa de DQO que entra com o esgoto e/ou com o lodo é igual à soma das massas de DQO convertidas em metano, de DQO convertida em biomassa anaeróbia, e de DQO presente no efluente.

Para simplificar este processo, a Figura 2.4 apresenta o balanço esquemático de DQO ao longo do processo de digestão anaeróbia.

Figura 2.4 – Esquema de balanço de DQO ao longo do processo de digestão anaeróbia

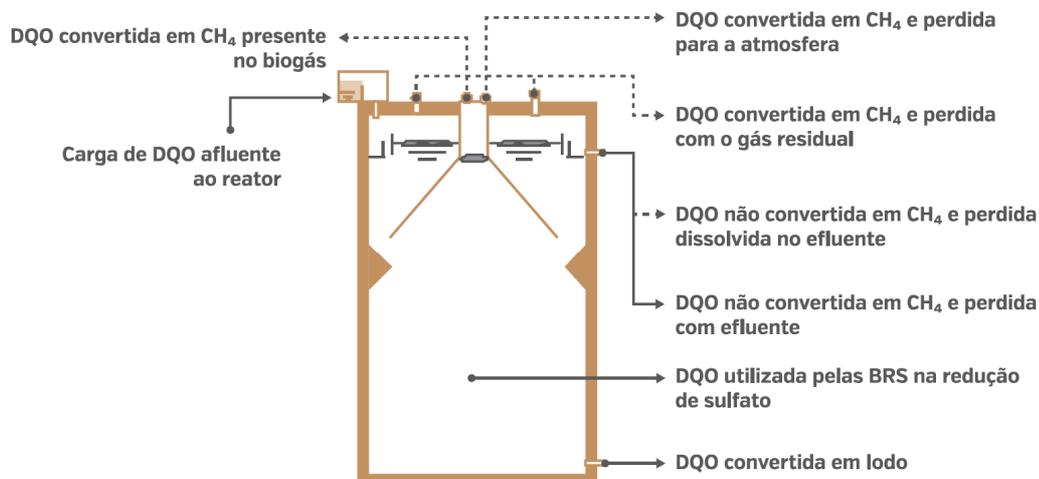


Fonte: Brasil (2015) apud Chernicharo (2007).

Para determinar a geração específica de biogás no processo de tratamento anaeróbio de esgoto, utiliza-se este tipo de balanço de DQO. Considera-se, para o tratamento realizado através de reatores UASB, as perdas de DQO no processo, ou seja, o metano dissolvido no afluente (BRASIL, 2015).

A Figura 2.5 explicita as rotas de conversão de DQO, e os fluxos de metano em reatores UASB.

Figura 2.5 – Representação esquemática das rotas de conversão de DQO e dos fluxos de metano em reatores UASB



Fonte: Brasil (2015) apud Lobato (2013).

Conforme Brasil (2015), estas rotas são divididas em quatro parcelas de DQO, sendo:

- DQO convertida em biogás/metano: metano presente no biogás captado, metano dissolvido no efluente, dependente principalmente da concentração de DQO no afluente e da temperatura, metano escapando com o gás residual, na captação de biogás, etc;
- DQO convertida em lodo/biomassa: biomassa retida no reator; biomassa carregada no efluente, por exemplo, por causa da carga hidráulica elevada, acidez ou outras inibições;
- DQO usada para a redução de sulfato, em caso de concentrações elevadas;
- DQO residual no efluente: DQO inerte e subprodutos (ácidos orgânicos).

A parcela que apresenta mais dificuldade de controlar e verificar é a do metano que sai dissolvida no efluente. Quando a concentração do DQO no afluente é muito reduzida, esta parcela de DQO pode ser significativa (BRASIL, 2015).

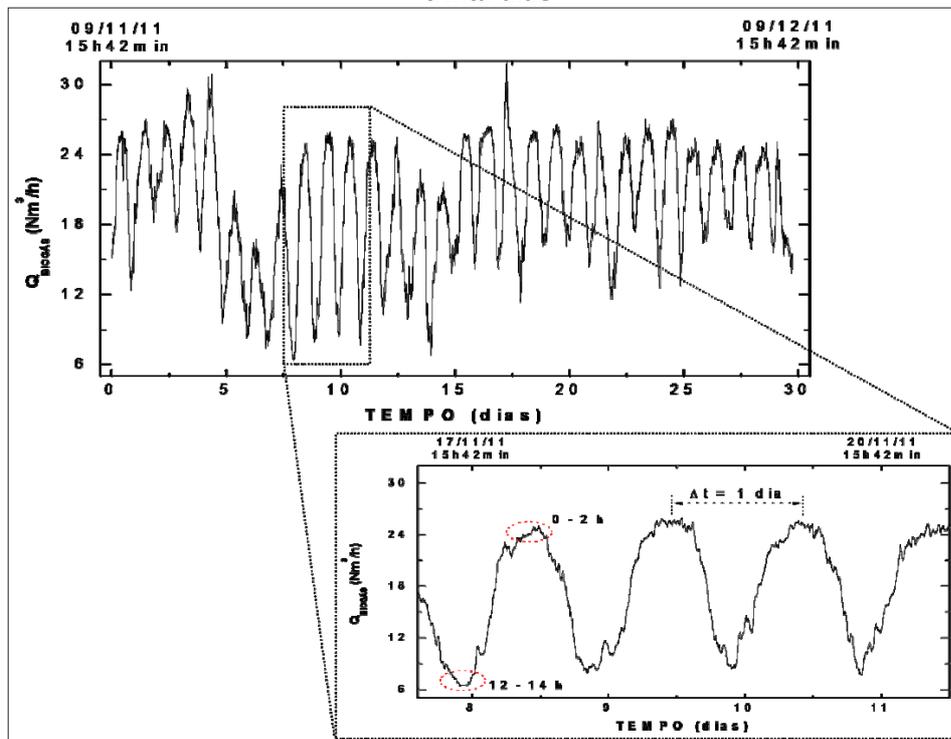
Em função destas perdas, Possetti et al. (2013) realizaram em quatro reatores UASB, medições em tempo real durante um intervalo de seis meses, de vazão, teor de metano, temperatura, e pressão manométrica do biogás gerado nestes reatores. Como resultados destas medições, observou-se que para estas características operacionais, a produção e desprendimento deste tipo de gás:

- seguem um comportamento temporal variável, periódico e não estacionário;
- são influenciados por eventos de chuva;

- são influenciados pelas características físico-químicas do afluente da ETE.

Conforme Figura 2.6, além do mais, as curvas de vazão de biogás apresentaram formatos padrões para um período de um dia, onde as vazões máximas foram medidas entre 0 a 2 horas e as mínimas entre 12 e 14 horas

Figura 2.6 – Curvas de vazão do biogás em função do tempo para um intervalo de quatro e de trinta dias



Fonte: Possetti et al. (2013)

Observou-se que o valor aferido em um intervalo de seis meses, foi 53% menor aproximadamente do que foi estimado em função das propriedades físico-químicas do meio líquido.

Em função das diferenças entre os valores calculados e os medidos em campo, e visando incrementar a confiabilidade do processo de determinação teórica de produção de biogás produzido em Estações de Tratamento Anaeróbios de Esgoto Doméstico, Lobato (2011) propôs um modelo matemático para o balanço de massa da DQO e do potencial de recuperação de energia em reatores UASB tratando esgoto doméstico. Neste modelo matemático foi considerado três cenários que resultam em resultados diferentes, sendo:

- a) pior situação. Neste cenário o potencial energético é menor, e refere-se a sistemas operando com esgoto mais diluído, concentrações de sulfato

maiores, menor eficiência de remoção de DQO e maiores índices de perda de metano;

- b) situação típica. Neste cenário são utilizados valores intermediários (entre a pior e a melhor situação) para os dados de entrada.
- c) melhor situação. Neste cenário o potencial energético é maior, e refere-se a sistemas operando com esgoto mais concentrado, menores concentrações de sulfato, maior eficiência de remoção de DQO e menores índices de perda de metano

Os dados de entrada deste modelo matemático são população contribuinte; contribuição per capita de esgoto (QPC); contribuição per capita de DQO (QPC_{DQO}); eficiência de remoção de DQO (E_{DQO}); concentração de sulfato no afluente (C_{SO_4}); eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4}); temperatura operacional do reator (T); percentual de CH_4 no biogás (C_{CH_4}).

Através da Tabela 2.3, apresenta-se os valores entrada do modelo matemático considerando os cenários considerados para este modelo matemático.

Tabela 2.3 – Dados de entrada considerado no modelo
Fonte: Lobato (2011)

Parâmetro	Unidade	Situação			Referências
		Pior	Típica	Melhor	
População contribuinte (Pop)	hab.	1.000 a 1.000.000			-
Contribuição per capita de esgoto (QPC)	$m^3.hab^{-1}.d^{-1}$	0,12 a 0, 22			von Sperling & Chernicharo (2005)
Contribuição per capita de DQO (QPC_{DQO})	$kg.hab^{-1}.d^{-1}$	0,09 a 0,11			von Sperling & Chernicharo (2005)
Eficiência esperada de remoção de DQO (E_{DQO})	%	60	65	70	von Sperling & Chernicharo (2005)
Concentração de sulfato no afluente (C_{SO_4})	$kgSO_4.m^{-3}$	0,08	0,06	0,04	Singh & Viraghavan (1998); Metcalf & Eddy (2003); Glória <i>et al.</i> (2008)
Eficiência de redução de sulfato (E_{SO_4})	%	80	75	70	Souza (2010)
Temperatura operacional do reator (T)	$^{\circ}C$	20 a 30			von Sperling & Chernicharo (2005)
Perda com o gás residual (p_W)	%	7,5	5,0	2,5	Souza & Chernicharo (2011)
Outras perdas (p_O)	%	7,5	5,0	2,5	Souza & Chernicharo (2011)
Perda com o efluente (p_L)	$kg.m^{-3}$	0,025	0,020	0,015	Souza & Chernicharo (2011)
Percentual de CH_4 no biogás (C_{CH_4})	%	70	75	80	von Sperling & Chernicharo (2005)

Para este método matemático, vale ressaltar que a variabilidade nos dados de entrada (Pop, QPC, QPC_{DQO} e T) foi incorporada à interpretação dos resultados do

modelo, através da Análise da Incerteza, onde foram realizadas 250 simulações para cada situação, utilizando a Simulação Monte Carlo. Em cada corrida do modelo é selecionado um conjunto diferente de valores dos dados de entrada sobre os quais existe incerteza. Devido a isto, os dados de entrada foram gerados aleatoriamente segundo a distribuição uniforme e dentro de faixas pré-estabelecidas.

É importante frisar que este método foi validado em reatores de escala piloto e de demonstração (localizados no Centro de Pesquisa e Treinamento em Saneamento (CePTS) – Belo Horizonte / MG) e em reatores UASB em escala Plena (ETE Laboreaux – Itabira / MG e ETE Onça – Belo Horizonte / MG). Para mais informações sobre esta modelo, consultar Lobato (2011).

Vale ressaltar que em relação a estimativa do balanço de massa da DQO, que considera as perdas de metano na fase líquida e gasosa, levando-se em conta saber o potencial do biogás produzido em UASBs, Lobato (2011) observou-se que: 48% da parcela de DQO aplicada a metano, em uma situação típica, aproximadamente 29% é efetivamente recuperado no separador trifásico. Além disto, este modelo proposto de estimativa permitiu que os resultados fossem mais realistas.

Conhecido as tecnologias de produção de biogás em estações de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico, na próxima seção serão tratados os processos de geração de energia elétrica através do biogás.

2.2 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS

A utilização do biogás para recuperação energética é possível através da combustão ou da geração combinada de eletricidade e calor. O biogás pode substituir até mesmo o gás natural diluído em caldeiras, porém algumas modificações são necessárias visando compensar seu poder calorífico e a sua utilização em maior volume.

Além da utilização em caldeiras, o biogás é utilizado como combustível em motores de combustão interna e turbinas a gás. Pode-se utilizá-lo também para geração de energia elétrica e térmica de forma combinada (cogeração), onde o calor residual pode ser utilizado como forma de vapor, bem como água quente e fria (SILVA, 2015).

Como o foco do trabalho é apresentar uma metodologia de análise de viabilidade técnica-econômica e de risco de investimento para geração distribuída de energia elétrica, serão tratadas nesta seção as tecnologias para conversão energética

do biogás, considerando as características de motores de combustão interna, turbinas e microturbinas, e as experiências de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado em ETEs no mundo e no Brasil.

2.2.1 Tecnologias para Conversão Energética do Biogás

Para o aproveitamento do biogás é necessária a conversão da energia química contida em suas moléculas em energia mecânica por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica deve ativar um motor ou uma turbina que por sua vez aciona um gerador de energia elétrica. Quando queimado, pode ser utilizado como combustível para caldeira e geração de energia através do ciclo Rankine.

Geralmente os equipamentos disponíveis no mercado para aquisição são fabricados para a utilização de biogás proveniente de dejetos de animais, sendo que para utilização de gás de esgotos, torna-se necessário conhecer o teor de metano da matéria orgânica, para que assim obtenha-se a melhor eficiência do conjunto moto gerador (SILVA,2015).

Os principais elementos motrizes utilizados para a geração de energia elétrica são os motores de combustão interna, as turbinas e as microturbinas. Na sequência serão apresentados com mais detalhes esses elementos.

2.2.1.1 Motores de combustão interna

O acionamento destes motores é realizado pela combustão que aciona pistões confinados em cilindros. Os ciclos de operação mais utilizados são do tipo Otto e Diesel. É possível realizar o aproveitamento do calor disponível nos escapamentos e dos fluídos de refrigeração.

No ciclo Diesel, a combustão ocorre pela compressão do combustível na câmara de compressão, porém no ciclo Otto, a combustão funciona através da explosão do combustível gerado por uma fagulha na câmara de combustão. Este ciclo baseia-se na expansão/resfriamento adiabático e aquecimento a volume constante. Este ciclo tem as seguintes fases:

1. a válvula de entrada de ar abre no tempo certo para permissão da entrada no cilindro da mistura de ar e combustível;

2. a vela realiza a ignição na mistura do cilindro, no qual tem-se a explosão;
3. a explosão é transferida ao pistão que desce e sobe em um movimento periódico, e os gases da explosão são eliminados pela válvula de saída do cilindro.

Para a utilização do biogás recomenda-se a utilização de motores com ciclo Otto. As vantagens da cogeração de energia através de motores a gás são o rápido arranque, fácil adaptação a variações das necessidades térmicas, alta eficiência mecânica e não necessita de constante vigilância. As desvantagens são a baixa vida útil, baixo rendimento térmico e elevados custos de manutenção. Sua aplicação é recomendada para atendimento de sistemas em situação de emergência, bem como de locais isolados (SILVA, 2015).

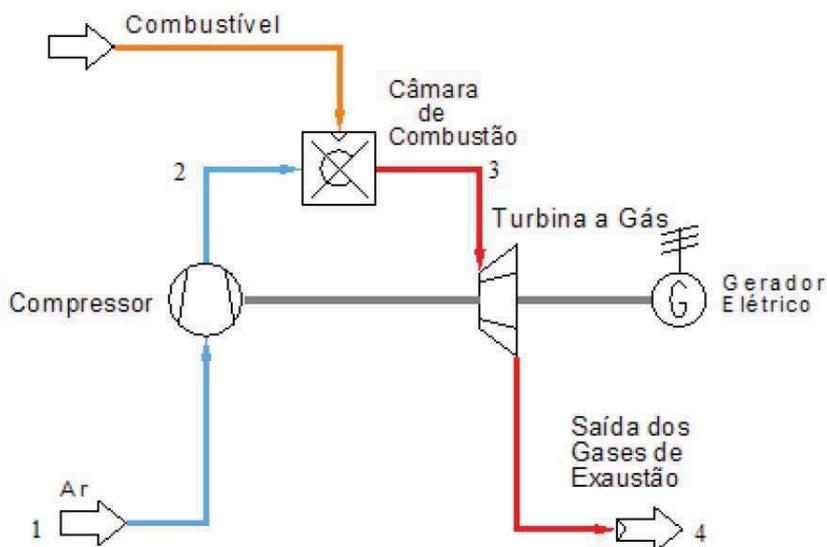
Encontram-se no Brasil diversos fabricantes de GMG que utilizam o biogás como combustível. Dentre deles pode-se citar as marcas Leão Energia, Biogás Motores Estacionários, Enermac, Fageo, Fockink, Trigás, Ceraçá, CHP Brasil. A maioria destas empresas utiliza equipamentos de fabricação nacional, bem como planos de operação e manutenção como parte de seu portfólio de serviços.

2.2.1.2 Turbinas

Conforme Silva (2015), esses equipamentos são constituídos de compressor de ar, câmara de combustão e a turbina de expansão, conforme mostrado na Figura 2.7. Seu ciclo de funcionamento é realizado da seguinte forma:

- a) a turbina aciona o compressor que comprime e eleva a pressão do ar;
- b) o ar é misturado ao combustível na câmara de combustão;
- c) a mistura é queimada em condição de pressão constante (regime contínuo), elevando a temperatura dos gases e introduzindo energia primária no sistema;
- d) na turbina o gás é expandido e extrai-se a energia mecânica para acionamento do compressor e da carga acoplada ao eixo.

Figura 2.7 – Ciclo de Brayton básico



Fonte: França Júnior (2008).

As características principais deste sistema são a produção de gases de exaustão em grandes volumes e temperaturas elevadas (melhoria do rendimento térmico do conjunto), no qual permite que o conjunto seja compacto, de fácil manutenção, permitindo automatização.

Vale citar que os combustíveis (líquidos ou gasosos) para o acionamento devem ser limpos visando não danificar os componentes da máquina.

2.2.1.3 Micro-turbinas

Trata-se de um sistema de geração reduzido o qual tem sua origem na tecnologia utilizada nas *Airborne Power Units* (APU). Sua composição é similar a turbina acima descrita, porém possui potência inferior a 250 kW. Este equipamento possui uma ampla capacidade de operar com diversos tipos de combustíveis líquidos e gasosos, e também pode ser utilizado para operar em cogeração através da utilização de equipamentos adicionais. Seu funcionamento é descrito na seguinte sequência:

- a) o ar é aspirado pelo compressor, tem sua pressão elevada e é comprimido;
- b) na sequência vai para a câmara de combustão onde o combustível é injetado e misturado ao ar;

c) a queima é controlada visando alcançar eficiência máxima e reduzidos níveis de emissão;

d) em alta pressão os gases aquecidos são encaminhados em alta velocidade para o interior da turbina, onde a expansão de palhetas da turbina provocam sua rotação em alta velocidade e produzindo assim trabalho;

e) os gases não aproveitados são expelidos para a atmosfera, podendo ser utilizados em cogeração, pois contém grande quantidade de energia térmica.

Suas vantagens consistem na manutenção fácil, arranque relativamente rápido, alta confiabilidade, dimensões compactas, isenção de vibrações, disponibilidade de energia térmica em altas temperaturas e redução de emissões (particularmente NO_x). Suas desvantagens são observadas na utilização deste sistema em processos com baixa necessidade térmica, tempo de vida reduzido e elevados custos de aquisição em comparação aos grupos moto gerador (SILVA, 2015).

O principal fabricante deste tipo de equipamento é a empresa Capstone Turbine Corporation, situada nos Estados Unidos da América. No Brasil há apenas uma empresa que a representa. Em Costa (2006), realizou-se um estudo apresentando as características de implantação, operação e manutenção desse tipo de turbina utilizando biogás gerado na ETE Barueri da SABESP.

2.2.2 Análise comparativa entre tecnologias

Visando complementar as informações tratadas até agora, utilizou-se a Tabela 2.4 elaborada por Lobato (2011), que tem o objetivo de destacar as vantagens e desvantagens da utilização de cada elemento motriz como fonte de energia mecânica para a geração de eletricidade.

Tabela 2.4 – Análise comparativa das principais alternativas para o uso do biogás para geração combinada de eletricidade e calor

Fonte: Lobato (2011)

Alternativa	Vantagens	Desvantagens
Motores de combustão interna	<ul style="list-style-type: none"> • Custo de aquisição moderado. • Tecnologia madura e largamente aplicada para a geração de energia a partir do biogás, especialmente em instalações com potência a partir de 800 kW. Nos EUA, cerca de 60% dos projetos de geração combinada de eletricidade e calor, a partir de biogás de aterros sanitários, utilizam motores de combustão interna (dados de 2003). • Grande diversidade de motores estacionários disponíveis no mercado, cobrindo uma grande faixa das aplicações (5 kW até 5MW) e ciclos de operação • Apresenta partida rápida, operação estável e são usualmente bastante confiáveis. • Normalmente operados com gás natural, mas podem ser ajustados para operar com propano ou biogás. • Grande potencial de recuperação de energia (elétrica + térmica). 	<ul style="list-style-type: none"> • Mais sujeitos à corrosão, embora a utilização de óleos lubrificantes possibilite alguma proteção contra os produtos ácidos da combustão.
Turbinas a gás	<ul style="list-style-type: none"> • Menos sujeitas à corrosão que os motores de combustão interna. • A elevada temperatura dos gases de exaustão possibilita a geração de vapor à alta pressão e elevada temperatura 480°C, ou a aplicação direta em processos industriais de aquecimento e de secagem. • Em um ciclo combinado de turbina a gás e a vapor, os gases de exaustão proveniente da turbina a gás alimentam uma caldeira que fornece vapor para o funcionamento da turbina a vapor, dessa forma existem duas fontes de energia elétrica, sendo a eficiência da ordem de 60-70%. 	<ul style="list-style-type: none"> • Elevado custo de aquisição, em função da necessidade de compressão elevada do gás. • Elevado custo operacional, em função da necessidade de compressão elevada do gás. • Demanda de gás com qualidade consistente. • Demanda de elevada pressão de gás na entrada.
Microturbinas	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentam vantagens em relação às outras alternativas de geração de energia a partir do biogás nos seguintes casos: baixa produção de biogás; biogás com baixo teor de metano; preocupação com emissão de NO_x; quando da utilização da eletricidade no próprio local de geração, em substituição à energia comprada da concessionária; quando o suprimento de eletricidade é não confiável e de preço elevado; quando houver necessidade de água quente no próprio local ou nas imediações. • Equipamentos portáteis e fáceis de serem modulados (uma ou múltiplas turbinas) para se adequar à produção de biogás e às necessidades locais. • Equipamentos compactos e com poucas partes móveis, requerendo dessa forma poucos cuidados com a operação e a manutenção. • Baixas emissões de NO_x, usualmente dez vezes inferiores às dos motores de combustão interna de melhor desempenho, e também inferiores às emitidas por queimadores (flares). • Capazes de operar com biogás de baixo conteúdo de metano (35 ou até mesmo 30%). • Configuração padrão do equipamento usualmente oferece um gerador de água quente (~ 95°C) a partir do calor desprendido no exaustor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eficiência inferior a motores de combustão interna e outros tipos de turbinas. Consomem cerca de 35% a mais de combustível por kWh gerado. • Susceptível à contaminação por siloxano. Alimentação com biogás de aterro usualmente requer nível mais elevado de pré-tratamento que o requerido por turbinas convencionais e outras formas de geração de energia elétrica. • Atualmente, poucos compressores de baixa vazão e elevada pressão encontram-se disponíveis para atender os requisitos das microturbinas sem a necessidade de adaptações caras. • Poucas informações disponíveis sobre a confiabilidade de longo termo e sobre os custos de operação e manutenção de microturbinas a biogás.

Na Tabela 2.5 é apresentado um resumo comparativo das três principais alternativas de cogeração de eletricidade e calor atualmente disponíveis no mercado: motores de combustão interna, turbinas e microturbinas.

Tabela 2.5 – Comparação entre as principais alternativas de cogeração de eletricidade e calor
Fonte: Lobato (2011)

Parâmetro	Principais alternativas		
	Motores de combustão interna	Turbinas	Microturbinas
Faixa de potência disponível no mercado (kW)	5 – 5.000	500 – 250.000	30 - 1000
Faixa usual de aplicação (kW)	800 - 3000	> 3.000	<1.000
Custo de implantação (US\$.kW ⁻¹)	900 - 1000	1000 - 1800	4000 - 5000
Custos de O&M* (US\$.kWh ⁻¹)	0,009 - 0,010	0,006 - 0,010	0,15 - 0,20
Taxa de geração de eletricidade e calor (kWh consumido por kWh gerado)	2,8 - 3,0	3,7 - 4,6	4,1 - 4,7
Eficiência elétrica (%)	33 - 36	22 - 27	22 - 33
Consumo de combustível (kWh.h ⁻¹ por kW instalado)	2,8 - 3,0	3,7 - 4,6	3,3 - 7,5
Pressão de alimentação do gás (atm)	< 0,2 - 3,0	6,5 - 11	3,7 - 5,8
Produção de gás de exaustão (kg.h ⁻¹)	6 - 7	15 - 20	23 - 37
Temperatura do gás de exaustão (C)	360 - 470	510	280 - 310
Recuperação total de calor (kWh por kW instalado)	1,10 - 1,28	1,56 - 2,08	3,2 - 3,6
Eficiência total de geração de eletricidade e calor (%)	75- 76	68 - 69	60- 73
Emissões de NOx** (ppm)	250-3000	35-50	<9

(*) Excluindo custos de combustível.

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

Conforme Lobato (2011), as principais características, vantagens e desvantagens de cada alternativa, foram ranqueadas de acordo com critérios considerados importantes no caso da geração de energia a partir do biogás produzido em reatores anaeróbios tratando esgoto doméstico, levando-se ainda em consideração a realidade dos países em desenvolvimento. Estas informações estão apresentadas na Tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Comparação entre as principais alternativas de cogeração de eletricidade e calor
Fonte: Lobato (2011)

Aspectos avaliados	Alternativa		
	Microturbinas	Motores de combustão interna	Turbinas
Aspectos econômicos	Custos de capital	+(a)	++++
	Custos de O&M	+	++++
	Consumo de combustível	+	+++
Eficiência	Geração de eletricidade	+	++
	Geração de calor	++++	+++
	Global	+++	++++
Confiabilidade	+	++++	++++
Simplicidade	+++	++++	+
Menor possibilidade de problemas ambientais	Geração de ruído	++++	+++
	Emissão NO _x	++++	+ /++++

++++: mais favorável +: menos favorável +, ++, +++: notas intermediárias, em ordem decrescente + /++++: variável de acordo com o modelo

(a) Pequena disponibilidade de compressores de baixa vazão e elevada pressão para atender os requisitos das microturbinas sem a necessidade de adaptações caras

2.2.3 Geração de Energia Elétrica em ETEs

Conforme Jordão (2011), nas ETEs localizadas nos Estados Unidos da América, o consumo de energia representa 30% do custo total de operação da ETE.

Geralmente, o consumo de energia elétrica em ETEs pode ser representado em função das seguintes aplicações, conforme representado abaixo:

- Aeração: 50%;
- Fase Sólida: 30%;
- Recalque final: 10%;
- Bombeamento interno: 5%
- Demais consumos: 5%.

Visando reduzir os custos operacionais com energia elétrica nos processos de tratamento de esgoto, deve-se utilizar o biogás gerado nestas estações sempre que mostrar-se viável (JORDÃO, 2011). Para que o projeto de geração de energia seja viável, torna-se necessária a conhecer o custo operacional para geração do biogás. Em plantas que utilizam o sistema UASB para tratamento de esgoto, o custo de produção do biogás varia de 0,03 a 0,05 US\$/Nm³ para plantas de médio porte, e 0,02 US\$/Nm³ para plantas de grande porte.

Vale ressaltar que a geração de energia elétrica em ETEs, pode vir a contribuir em diversos casos para a redução do consumo de eletricidade nestas estações, porém na maioria das vezes, o volume de biogás gerado não é suficiente para tornar a estação autossuficiente em energia elétrica.

Basicamente o custo da geração de energia elétrica em ETEs é composto pelo investimento na construção e manutenção do biodigestor, e pelo sistema responsável pela geração. Vale ressaltar que o biogás deve ser purificado antes de adentrar na unidade motriz e quanto menor o tempo de operação do biodigestor, maior será o custo da energia elétrica gerada (PECORA, 2006).

Na sequência deste trabalho serão expostas as experiências de geração de energia elétrica realizadas em ETEs no mundo e no Brasil.

2.2.3.1 Geração de energia elétrica em ETEs no Brasil

Neste item serão citadas as ETEs que no Brasil possuem geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do esgoto doméstico.

ETE Barueri (São Paulo)

Fruto de uma parceria entre o CENBIO, SABESP e FINEP, foi implantado em 2002 o projeto ENER-G-BIOG, junto a ETE Barueri, que visava realizar um estudo

comparativo entre o desempenho das tecnologias de microturbina e motor de combustão interna.

Vale ressaltar que a ETE Barueri é a maior estação da América Latina. Essa estação utiliza o processo de lodos ativados com mistura completa por ar difuso. Nesta ETE há um processo de digestão anaeróbia de lodos que produz um volume excepcional de biogás.

Para o projeto foi definida uma potência de 30 kW para a máquina motriz. Após a realização dos testes e ensaios, foi comprovado que a microturbina apresenta ganhos ambientais (emissão de NO_x) relevantes em relação ao motor de combustão interna, porém em relação ao custo de aquisição, a microturbina possui custo oito vezes superior aos motores convencionais (SILVA, 2015).

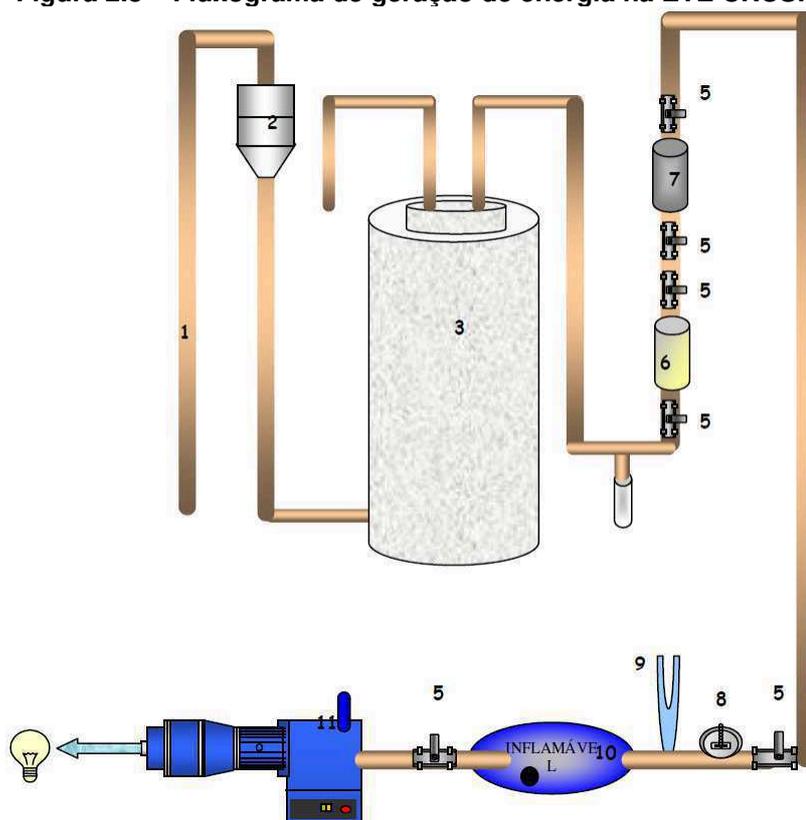
ETE CRUSP (São Paulo)

Uma parceria entre a USP, FINEP e CENBIO possibilitou a implantação, entre os anos de 2001 e 2005, de um sistema captação, purificação e armazenamento de biogás produzido por um reator UASB, capaz de realizar o tratamento do esgoto recebido do Conjunto Residencial da USP (CRUSP) e utilizar este biogás para geração de energia elétrica.

Esta ETE tem capacidade de tratamento de 3 m³/h e como parâmetro para produção de biogás foram utilizados os valores de DBO do esgoto. Foi utilizado um gasômetro com volume útil de 10m³ para armazenamento do biogás produzido pelo UASB e um motor de combustão interna de 18 kW. Como resultado deste projeto concluiu-se que a digestão anaeróbia foi eficiente no tratamento de esgotos e a geração de energia foi equivalente a 0,039% da energia consumida no sistema. Ao se realizar uma simulação, utilizando a máxima potência do motor, a energia gerada seria de 8,1% da energia consumida no sistema. Concluiu-se também que o porte da ETE é de fundamental importância para o aproveitamento do biogás para geração de energia (SILVA, 2015).

Conforme Pecora (2019), o fluxograma de geração de energia na ETE Arrudas está apresentado conforme a Figura 2.8. A tabela 2.7 representa a descrição dos equipamentos do fluxograma.

Figura 2.8 – Fluxograma de geração de energia na ETE CRUSP



Fonte: Pecora (2019) apud CENBIO (2004)

Tabela 2.7 – Descrição dos equipamentos da instalação – ETE CRUSP

Fonte: Pecora (2006) apud CENBIO (2004)

Equipamento	Número	Quantidade
Tubulação	1	1
Madidor de Vazão de Esgoto	2	1
Biodigestor	3	1
Acumulador de Água do Biogás	4	1
Válvula de esfera	5	6
Primeiro Compartimento do Sistema de Purificação do Biogás (Retirada de Umidade de H ₂ S)	6	1
Segundo compartimento do Sistema de Purificação do Biogás (Retirada de H ₂ S)	7	1
Medidor de Vazão de Biogás	8	1
Medidor de Pressão (Manômetro em U)	9	1
Gasômetro	10	1
Motor-Gerador	11	1

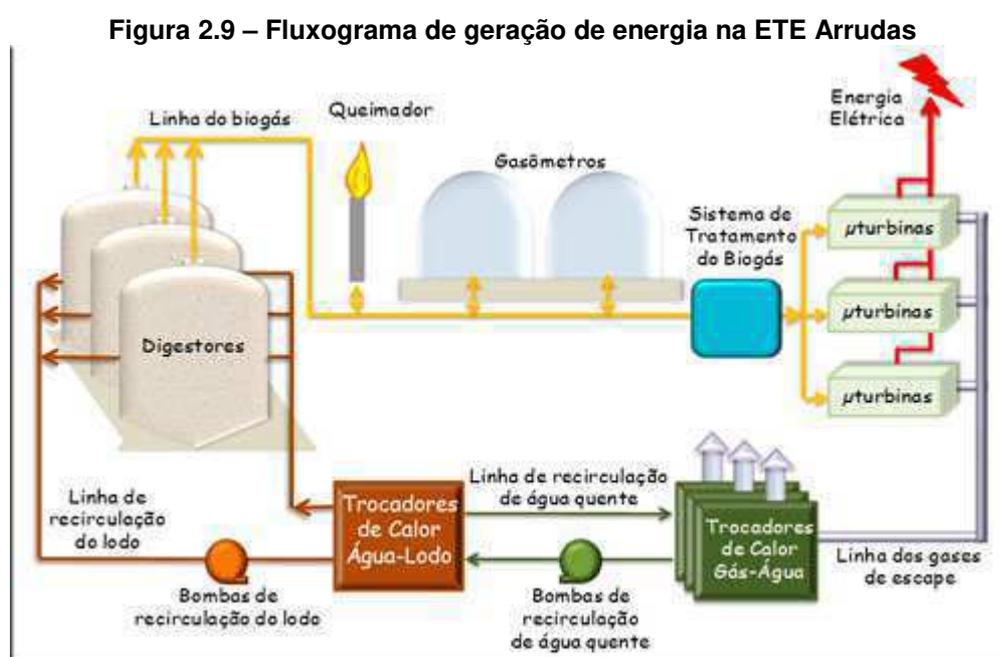
ETE Arrudas (Minas Gerais)

Visando o aproveitamento do biogás gerado nesta ETE para geração de energia elétrica, a COPASA implantou uma planta de cogeração composta por

gasômetros de armazenamento de biogás, sistema de tratamento do biogás e transporte deste a quatro microturbinas de 200 kW.

Esta ETE utiliza o processo de tratamento baseado em lodos ativados. Para aumentar a eficiência do sistema de geração, os gases dos escapes são direcionados a um sistema de troca de calor (gás-água) que fornece energia térmica para a secagem do lodo dos biodigestores. Ao ter sua temperatura média aumentada durante a digestão anaeróbia, há maior produção de biogás (SILVA, 2015).

Conforme COPASA (2019), o fluxograma de geração de energia na ETE Arrudas está apresentado conforme a Figura 2.9.



Fonte: COPASA (2019).

ETE Ribeirão Preto (São Paulo)

Esta ETE como seu nome já diz encontra-se na cidade de Ribeirão Preto, Estado de São Paulo. Sua proprietária é a Ambient Serviços Ambientais, responsável pelos serviços de esgotamento sanitário desta cidade. O processo de produção de biogás é realizado através de biodigestor de lodo, e este gás é utilizado para geração de calor e energia elétrica. O sistema de geração de energia elétrica é realizado através por dois grupos moto gerador de 750kW cada. A energia gerada é utilizada para autoconsumo, porém está encontra-se em paralelo com a rede da concessionária local de energia elétrica (CARDOSO MOREIRA, 2017).

ETE Jacuípe II (Bahia)

Esta ETE encontra-se na cidade de Feira de Santa, estado da Bahia. Sua proprietária é a Empresa Baiana de Águas e Saneamento S.A. – Embasa, responsável pela prestação de serviços de saneamento em diversas cidades deste estado. O processo de produção de biogás é realizado através de reator UASB, e este gás é utilizado para geração de energia elétrica. O sistema de geração de energia elétrica é realizado através de um conjunto moto gerador de 200kW. A energia elétrica gerada é utilizada para autoconsumo (CARDOSO MOREIRA, 2017).

Na Figura 2.10, representa-se as instalações do conjunto moto gerador da ETE Jacuípe II (EMBASA, 2016).

Figura 2.10 – Conjunto moto gerador da ETE Jacuípe II



Fonte: Embasa (2016).

CS Bioenergia (Paraná)

Esta central elétrica encontra-se na Curitiba, Estado do Paraná, e está ao lado da ETE Belém (Sanepar). Sua proprietária é a empresa CS Bioenergia, SPE entre a Sanepar (Companhia de Saneamento do Paraná) e a empresa Cattalini Bioenergia. O processo de geração de biogás é realizado através da codigestão do lodo da ETE Belém com resíduos orgânico, sendo este gás utilizado para geração de calor e energia elétrica. Seu sistema de geração de energia elétrica é composto por dois

conjuntos moto geradores de 1,4MW. A energia elétrica gerada é utilizada para autoconsumo e venda no mercado livre (CARDOSO MOREIRA, 2017).

Encontra-se na Figura 2.11 um mapa ilustrativo da Planta da Usina da CS Bioenergia.

Figura 2.11 – Mapa Ilustrativo da Planta da Usina da CS Bioenergia



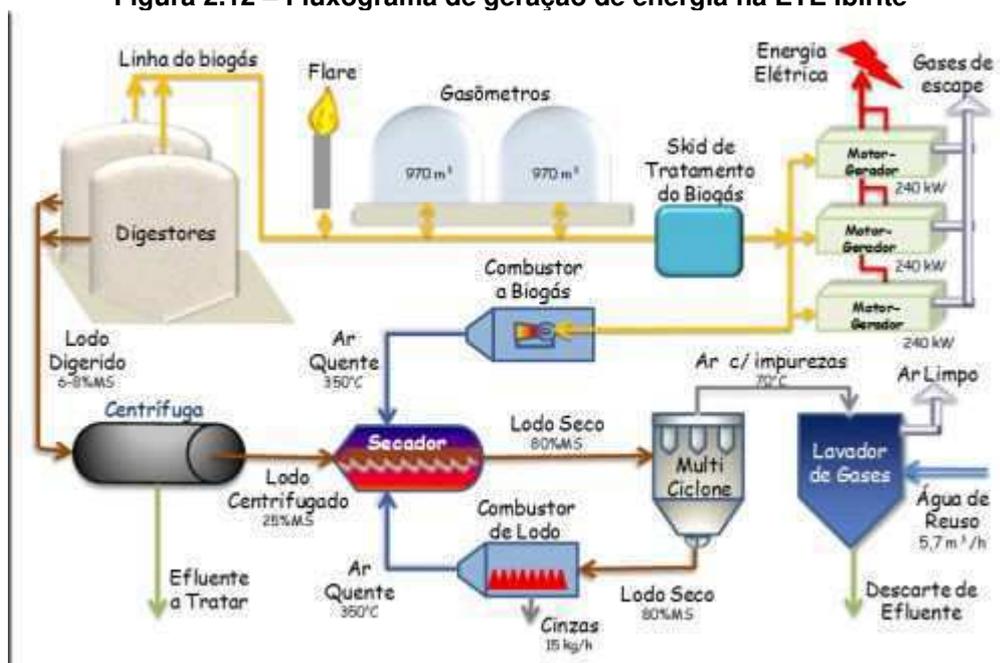
Fonte: AAT Consultoria e Engenharia Ambiental (2017).

ETE Ibirité (Minas Gerais)

Esta central elétrica encontra-se na Ibirité, Estado do Minas Gerais. Sua proprietária é a Companhia de Saneamento de Minas Gerais – COPASA MG. O processo de produção de biogás é realizado através de biodigestor de lodo, e este gás é utilizado para geração de calor e energia elétrica. O sistema de geração de energia elétrica é realizado através por três grupos moto gerador de 240kW cada. A energia gerada é utilizada para autoconsumo (CARDOSO MOREIRA, 2017).

Conforme COPASA (2019), o fluxograma de geração de energia na ETE Ibirité está apresentado conforme a Figura 2.12

Figura 2.12 – Fluxograma de geração de energia na ETE Ibirité



Fonte: COPASA (2019).

2.2.3.2 ETE Ouro Verde

A SANEPAR possui uma planta de geração de energia elétrica situada na ETE Ouro Verde, em Foz do Iguaçu, Paraná. Ela foi a primeira usina brasileira de geração distribuída de energia elétrica a ser cadastrada na ANEEL que utilizou o biogás produzido no tratamento anaeróbico de esgoto (BRASIL, 2016).

Características da ETE Ouro Verde

Esta estação começou a operar em 1997, e pode tratar 70 l/s de esgoto doméstico. O processo de tratamento é composto pelas etapas de:

- tratamento preliminar - remoção de sólidos grosseiro (gradeamento e desarenação);
- tratamento primário - degradação biológica através de um RALF.

O efluente do RALF é destinado ao Rio Paraná. Sua eficiência de tratamento na remoção de matéria orgânica é de 75% e um dos seus subprodutos é o lodo, que após a higienização tem aplicação na agricultura como fertilizante.

Outro subproduto é o biogás, cuja produção é estimada em 50 Nm³/dia. Este biogás é captado através de uma tubulação de PVC e forçado a passar por um sistema de filtragem composto de limalha de ferro, onde ocorre dessulfurização do gás. Após o gás ser filtrado, este é enviado para um gasômetro de cilindro horizontal

(manta plástica de PVC) com uma capacidade de 50 m³. Quando não se deseja armazenar o biogás no gasômetro ou deseja-se esvaziá-lo, o biogás é direcionado para um queimador tipo *flare*.

Geração de Energia Elétrica

Quando deseja-se gerar energia, este biogás é encaminhado a um grupo moto gerador de 30 kW. Na Figura 2.13 é apresentado o fluxograma do processo de geração de energia.

Figura 2.13 – Fluxograma de processo para geração de energia elétrica na ETE Ouro Verde – Foz do Iguaçu



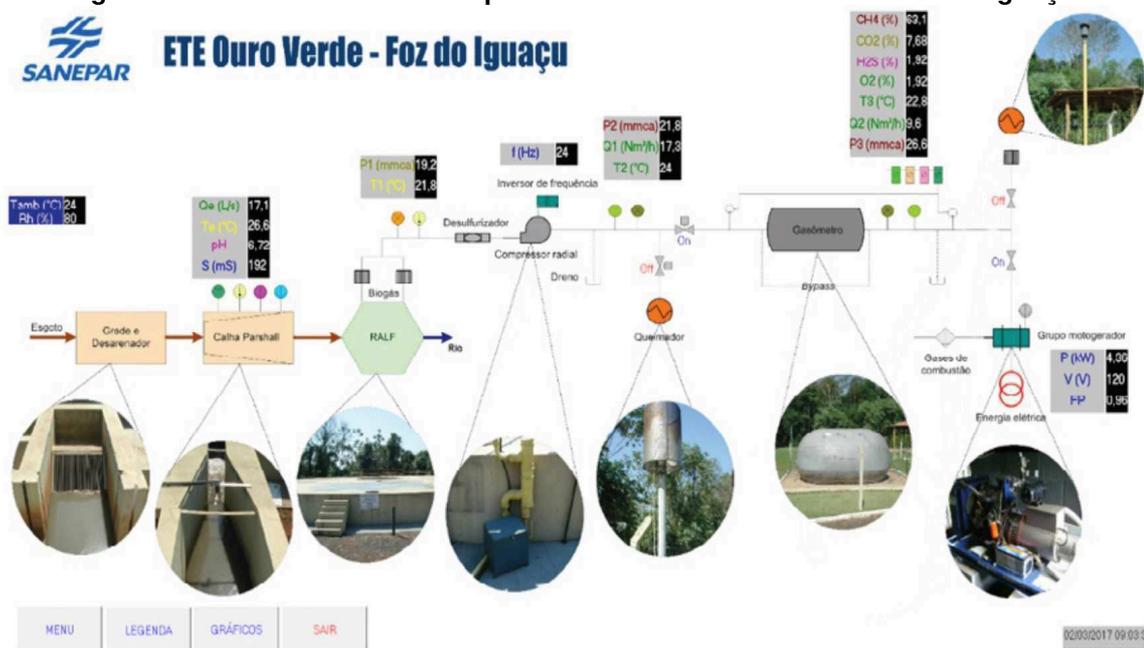
Fonte: Brasil (2016).

Além do grupo motogerador, o sistema de geração de energia elétrica é composto por um quadro que possui a função de monitoramento, controle e proteção desta central geradora, bem como atender aos requisitos necessário de conexão com a concessionária de energia elétrica. Junto a entrada de energia elétrica, encontra-se instalado um quadro de proteção e seccionamento, cuja função é isolar a ETE do SIN quando houver um problema na rede da concessionária ou grupo moto gerador não atenda os padrões de qualidade solicitados pela mesma.

Visando o monitoramento remoto desta ETE, encontra-se instalado um sistema que é responsável por monitorar os dados quantitativos e qualitativos de operação e geração de energia, conforme ilustrado na Figura 2.14. Esse sistema tem como objetivo avaliar a eficiência da ETE. Ademais, tem-se que em média o consumo de energia elétrica desta ETE é de 812 kWh/mês, sendo estimado que o sistema de geração seja capaz de produzir 3600 kWh/mês. Atualmente o sistema opera duas

horas por dia, em regime de batelada². Caso a operação fosse contínua, poderia disponibilizar um excedente energético de aproximadamente 2788 kWh/mês.

Figura 2.14 – Tela do Sistema Supervisório da ETE Ouro Verde – Foz do Iguaçu

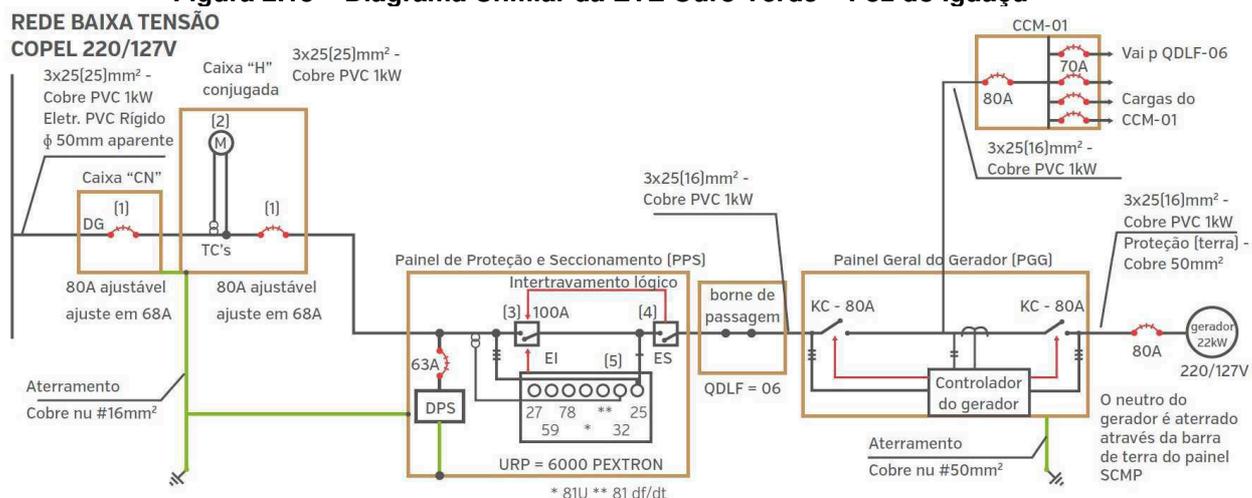


Fonte: Brasil (2016).

O sistema elétrico da ETE Ouro Verde está representado no diagrama unifilar geral mostrado na Figura 2.15. Neste diagrama, pode-se verificar os relés de proteção, intertravamentos, sistema de geração, cargas instaladas, além de outras informações pertinentes a instalação elétrica. Observa-se os requisitos de instalação e de proteção necessários para a conexão desta ETE a concessionária local de energia elétrica, conforme solicitado nas normas técnicas desta concessionária local (NTC 905200 - Acesso de Micro e Minigeração Distribuída ao Sistema da Copel - com compensação de energia) e nas resoluções 482/2012, 687/2015, 786/2017 e PRODIST da ANEEL.

²Regime ou processos por batelada levam a produção de quantidade finitas de materiais, submetendo materiais de entrada a uma sequência de atividades de processamento durante um período finito de tempo e utilizando um ou mais equipamentos. Esses processos possuem dados com características contínuas, porém separados por intervalos discretos que agregam informações por item (SILVA, SOUZA JÚNIOR, KOLANO, 2013).

Figura 2.15 – Diagrama Unifilar da ETE Ouro Verde – Foz do Iguaçu



Fonte: Brasil (2016).

2.2.4 Aproveitamento energético do biogás gerado em ETEs no Brasil

A situação em que se encontra o Brasil em relação ao aproveitamento do biogás gerado em ETEs, tanto na questão de produção, quanto na utilização energética é relativamente pequeno. As principais instalações destinadas a este fim encontram-se na maioria das vezes confinada ao eixo Sul e Sudeste.

O custo para este investimento continua muito alto, e a falta de segurança aos investidores em relação as análises de viabilidade econômica ainda afugenta os investidores.

Ao analisar quais os tipos de tratamento tornavam o aproveitamento energético do biogás mais viável, observou-se que o tipo baseado em Reatores UASB seguido de Lodos Ativados foi a alternativa que obteve os melhores resultados, seguido do tipo baseado em Lodos Ativados seguido de Digestor de Lodo.

Vale ressaltar, como informado anteriormente, que o biogás pode ser utilizado para geração de energia elétrica, como fonte de calor no processo de secagem de lodo da ETE, bem como pode ser utilizado através da cogeração de energia elétrica.

Analisando a utilização do biogás para fins de energia elétrica, deve-se observar a viabilidade do investimento condicionada ao cenário energético do país. Com o aumento dos custos com energia elétrica, a viabilidade do investimento neste sistema de geração é reforçada.

Considerando-se os Reatores Anaeróbios e Digestores de Lodo como unidades potenciais de geração de biogás, e ETEs que atendam a vazões superiores

a 250 l/s (população equivalente de 150.000 habitantes), identificou-se que esta configuração apresenta potencial de aproveitamento energético com consequente viabilidade econômica.

Baseado nestes parâmetros, o Ministério das Cidades através das Instruções normativas 39, de 24 de outubro de 2012, e de sua alteração 3, de 17 de março de 2016, define regulamentos para concessão de crédito no âmbito do Programa Saneamento para Todos, e integra o biogás como item financiável para ETEs com vazão média afluyente superior a 250 l/s.

2.3 MÉTODOS DE ANÁLISE PARA O DESENVOLVIMENTO DA DISSERTAÇÃO

Esta seção tem por fim a descrição de métodos de análise cuja aplicação será apresentada no desenvolvimento dos demais capítulos, a saber: métodos de Simulação de Monte Carlo Sequencial e Não Sequencial, bem como técnicas de análise de riscos como VaR (*Value at Risk*) e CVaR (*Conditional Value at Risk*).

2.3.1 Simulação De Monte Carlo

A simulação de Monte Carlo é um processo de simulação estocástica utilizado em inúmeros problemas associados aos sistemas de energia elétrica, como por exemplo no planejamento da expansão e planejamento da operação, uma vez que permite a determinação de indicadores de desempenho com base em modelos estocásticos de variáveis correspondentes à operação do sistema. Possui a capacidade de representar fenômenos complexos e eventos severos que influenciam a operação e custo/ganho esperado do sistema.

A simulação de Monte Carlo possui duas abordagens tradicionais, sendo uma sequencial e outra não sequencial. O que as difere é o tratamento dado às características cronológicas da simulação (DIAS, 2008). Demais abordagens, como por exemplo a pseudo-sequencial, estão fora do escopo deste trabalho.

2.3.1.1 Simulação de Monte Carlo Não Sequencial

Conforme Dias (2008), na simulação de Monte Carlo não sequencial os estados do sistema são selecionados a partir de amostragens no espaço de estados,

não se levando em conta a cronologia dos eventos. Quando esta simulação é aplicada ao sistema elétrico, cada componente do sistema possui um modelo estocástico que descreve os seus possíveis estados de operação além de taxas de transição entre estados.

Para Urán (2015), nesse processo de simulação o objetivo é amostrar um número suficiente de estados do sistema, através do uso de distribuições de probabilidade acumuladas. Tal processo difere de metodologias puramente analíticas, sendo que métodos probabilísticos não dependem da dimensão do espaço de estados do sistema elétrico desde que uma quantidade suficiente de amostras da operação do sistema seja amostrada.

De modo geral, a estimativa de uma quantidade desconhecida pode ser estimada pela equação do valor esperado, a qual é alimentada por NS amostras de estados operativos x_k avaliados por uma função teste representativa de um indicador de desempenho, como segue:

$$E[F] = \frac{1}{NS} \sum_{k=1}^{NS} F(x_k) \quad (2.1)$$

em que $F(x_k)$ é a função teste avaliada em x_k . O valor esperado do indicador de desempenho representa o índice de interesse para avaliação do sistema.

A variância do estimador é dada por:

$$V[E(F)] = \frac{V(F)}{NS} \quad (2.2)$$

em que $V(F)$ é a variância da função teste.

Para verificarmos quão precisa é a estimativa obtida a partir da simulação de Monte Carlo, calcula-se o coeficiente de variação β dado pela razão entre o desvio padrão da estimativa e o valor médio do índice estimado:

$$\beta = \frac{\sqrt{V[E(F)]}}{E[F]} \times 100\% \quad (2.3)$$

O algoritmo referente à simulação de Monte Carlo não sequencial está descrito a seguir:

1. Inicializar contador de amostras $NS = 0$;
2. Amostrar os estados das variáveis representativas do sistema a partir de suas correspondentes distribuições de probabilidade acumulada, e atualizar NS ;
3. Calcular a função F para cada estado x do sistema amostrado;
4. Estimar indicadores $E[F]$ utilizando (2.1);
5. Calcular o valor do coeficiente de variação β a partir de (2.3). Caso esse valor esteja dentro de um nível de tolerância aceitável, então se caracteriza o término do algoritmo. Caso contrário, deve-se retornar ao Passo 2.

A dificuldade desse tipo simulação é a representação de aspectos cronológicos de operação do sistema. Porém, sua convergência é mais rápida e apresenta menor necessidade de memória de armazenamento computacional em comparação com a simulação de Monte Carlo sequencial.

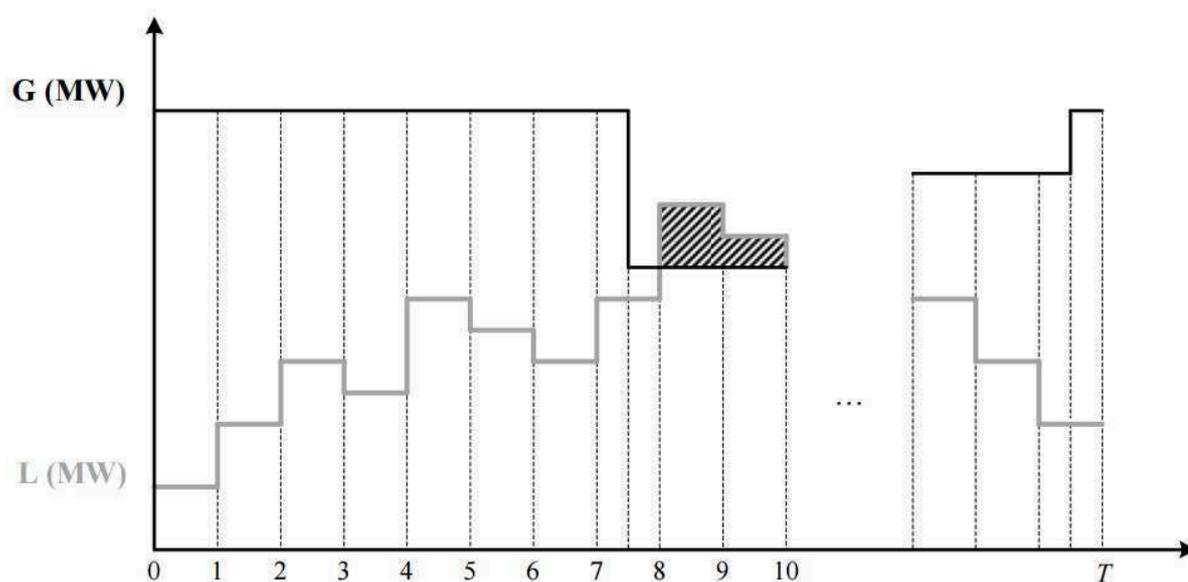
2.3.1.2 Simulação de Monte Carlo Sequencial

Conforme Carvalho (2013), as amostras da simulação de Monte Carlo sequencial fornecem estados sequenciais no tempo a partir de um relógio virtual ou fictício e, com o fluxo de tempo, sequências de eventos são sinteticamente geradas para criar a "história virtual" de um sistema. O método de simulação de Monte Carlo sequencial garante que dois estados consecutivos de um sistema podem diferenciar-se um do outro no estado de apenas um componente/variável. Uma vez que esta abordagem pode sequencialmente reproduzir o funcionamento de um sistema, é relativamente simples incluir todos os aspectos cronológicos do mesmo, como por exemplo modelos de carga espacialmente correlacionados, a flutuação capacidade de fontes renováveis de energia, as funções de danos ao cliente por área ou barramento, programações de manutenção programadas, e etc.

Neste tipo de simulação, a distribuição de probabilidade acumulada do tempo de residência em cada estado de interesse pode ser utilizada para amostrar tempos de residência de estados. A amostragem de séries temporais de recursos energéticos também é acoplada a linha temporal.

Por exemplo, a Figura 2.16 mostra como os estados do sistema são amostrados pelo método da simulação de Monte Carlo sequencial para a avaliação da adequação da capacidade de sistemas de geração. As áreas sombreadas nesta figura representam a energia reduzida devido a falhas de capacidade. Essa figura também demonstra que a transição de estado entre diferentes níveis de carga pode ser suportada em passos de tempo fixos, enquanto a duração dos estados de operação e falha de unidades geradoras não é fixa (depende da distribuição de probabilidade subjacente).

Figura 2.16 – Representação simplificada de uma sequência de eventos durante um período de tempo T



FONTE: Carvalho (2013).

Esta simulação permite a estimação de indicadores confiáveis para o planejamento da expansão e planejamento da operação de sistemas, sendo comumente adotada como referência para validação de outras metodologias (DIAS, 2008). Conforme Urán (2015), os estados amostrados preservam sua evolução histórica dependente do tempo, sendo seguido no processo de simulação o comportamento cronológico da variável analisada proporcionando, entretanto, um elevado dispêndio computacional.

As equações de estimativas e coeficiente de variação são idênticas àquelas da seção anterior, sendo que as amostras agora podem ser avaliadas pela sua ocorrência em nível anual, mensal, semanal, e etc. O algoritmo base da simulação de Monte Carlo sequencial está descrito a seguir:

1. Gerar uma sequência sintética anual de estados do sistema y_k ; pela aplicação de ciclos estocásticos falha/reparo, modelo de carga cronológico, além de séries cronológicas de recursos energéticos. Geralmente, assume-se que inicialmente todos os componentes estão operando adequadamente. A duração do componente no estado atual é amostrada por meio de distribuições de probabilidade e método da transformada inversa (RUBINSTEIN e KROESE, 2016). Por exemplo, para uma distribuição de tempo de residência em estado exponencial, a amostragem é dada por:

$$T = -\frac{1}{\lambda} \ln(U) \quad (2.4)$$

em que T é o tempo de permanência no estado atual de cada componente; λ é a taxa de falha do componente entre o estado atual e o seguinte; e U é um número aleatório amostrado distribuído uniformemente no intervalo $[0, 1]$;

2. Avalie cronologicamente cada estado do sistema na sequência y_n e acumule os valores de interesse para a atualização de funções teste;

3. De modo a obter os índices de desempenho, calcule a função teste $F(y_k)$ com os valores acumulados;

4. Estime o valor esperado dos índices anuais (ou mensais, semanais e etc) como o valor médio dos resultados anuais para cada sequência simulada y_k ;

5. O critério de parada também está baseado na incerteza relativa dos índices estimados. Assim, calcule o coeficiente β a partir da equação (2.3) e verifique se o critério de precisão desejada é atendido. Se a resposta é positiva, pare a simulação. Caso contrário, regresse ao passo 1.

2.3.2 Métodos Para Análise De Risco

Visando dar subsídios para a análise de um empreendimento de geração de energia elétrica que utiliza o biogás proveniente de ETEs, torna-se de interesse a

análise de risco neste negócio. Dessa forma, faz-se necessário conhecer quais são as incertezas que este empreendimento está exposto, bem como quantificá-los face aos seus impactos no negócio. Para isto, apresenta-se na sequência uma revisão de dois métodos utilizados para quantificar o risco presente de um negócio e abordados nesta dissertação, a saber o *Value at Risk* (VaR) e o *Conditional Value at Risk* (CVaR).

2.3.2.1 Medidas de risco

O risco para um agente econômico pode ser apresentado de várias formas, porém todas elas surgem devido a incertezas sobre o futuro. Algumas das fontes de risco são as incertezas sobre as taxas de juros, combustíveis, taxas cambiais, marcos regulatórios, crescimento da economia, custo da energia elétrica e etc (GUDER, 2009, pg. 23 e 24).

No âmbito da avaliação de um negócio, o risco pode ser definido como a volatilidade de resultados inesperados, como por exemplo o valor dos passivos de juros. Empresas ou investidores devem possuir critérios para definir perdas financeiras aceitáveis quando forem realizar algum investimento. Para isto, são utilizadas medidas de risco que quantificam os valores que o investidor pode perder. Tais medidas podem utilizar a probabilidade dos eventos que definem uma perda ou um nível de confiança (RIBEIRO, 2009, pg. 36 e 37) ou mesmo indicadores de desempenho negativo correspondentes a perdas financeiras.

O risco de um investimento pode ser calculado em função da distribuição probabilística de retornos. O retorno esperado pode ser escrito como a média da distribuição probabilística de retornos, sendo calculado pela seguinte fórmula:

$$\bar{R} = \sum_{i=1}^n pr_i R_i \quad (2.5)$$

em que pr_i denota a probabilidade do evento i ; R_i é retorno deste evento e n : número de eventos.

O desvio padrão mede a dispersão da distribuição de probabilidades. Quanto maior o desvio padrão, maior será a dispersão em torno do retorno esperado, e maior o risco do investimento. O risco pode ser calculado pela seguinte fórmula:

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n pr_i [R_i - \bar{R}]^2} \quad (2.6)$$

Para n ativos, o retorno esperado e o risco de um projeto podem ser representados através das seguintes equações:

$$\bar{R}_c = \sum_{i=1}^n W_i \bar{R}_i \quad (2.7)$$

$$\sigma_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_i W_j \rho_{i,j} \sigma_i \sigma_j} \quad (2.8)$$

em que W_i é a fração do ativo i no projeto; σ_i desvio-padrão dos retornos do ativo i ; $\rho_{i,j}$ o coeficiente de correlação entre os retornos dos ativos i e j ;

GUDER (2009) informa que há várias formas de riscos e inúmeras formas de os medir, sendo que podemos citar as metodologias de Value-at-Risk, que avalia o risco através de uma perda esperada em um horizonte de confiança, e o Conditional Value-at-Risk, que avalia o risco através da média dos prejuízos além do horizonte de confiança do Value-at-Risk.

2.3.2.2 Value at Risk (VaR)

Após os desastres financeiros ocorridos nos anos de 1990, no qual foram prejudicadas diversas empresas, dentre elas a Barrings, Daiwa e Metallgesellschaft, obteve-se a lição da necessidade de melhorar a supervisão e gerenciamento de riscos financeiros (JORION, 2001). Devido a isto, a resposta do setor privado foi dada conforme citado abaixo.

Em 1993, o Grupo dos Trinta (G-30)³ recomendou a valorização das posições utilizando os preços de mercado e a avaliação dos riscos financeiros com o VaR.

³ Grupo consultivo composto de banqueiros, financiadores, e acadêmicos das principais nações industriais.

Similarmente, o banco J.P. Morgan apresentou (1994) uma nova métrica de riscos (VaR) para inicialmente, medir os riscos de trezentos instrumentos financeiros de 14 países (JORION, 2001, pg.43 e 44). A reação dos reguladores foi realizada pelos órgãos *General Accounting Office (GAO)*, *Financial Accounting Standards Board (FASB)* e *Securities and Exchange Commission*, e foi notabilizada pela generalização das medidas do VaR para controle de derivativos. Além desses órgãos citados, a utilização do VaR para medição de riscos também é utilizada em empresas de valores mobiliários, seguradoras e fundos de pensão (JORION, 2001).

VaR é um método de avaliação de risco que avalia a pior perda esperada num determinado horizonte em condições normais de mercado a um determinado nível de confiança. O VaR pode ser utilizado por instituições expostas a riscos financeiros e pode ser utilizado em relatórios de informações, controle e gerenciamento de risco. Em função disto, esta metodologia está sendo utilizada por instituições financeiras, órgãos reguladores, corporações que não são financeiras e gestores de ativos (JORION, 2001). Em particular, o conceito de VaR tem sido utilizado no planejamento da operação de longo prazo para o sistema interligado nacional, no que tange a gestão de recursos hídricos plurianual.

Para se determinar o VaR para distribuições de probabilidade gerais, torna-se de interesse apresentar a formulação a seguir. Em um projeto de engenharia, define-se W_0 como investimento inicial e R como a taxa de retorno desse investimento. O valor do retorno do projeto no final do horizonte alvo pode ser descrito por

$$W = W_0(1 + R) \quad (2.9)$$

Define-se então o menor valor do retorno em um dado nível de confiança c como:

$$W^* = W_0(1 + R^*) \quad (2.10)$$

O VaR é definido então como a perda em relação à média:

$$\begin{aligned} VaR_{média} &= E(W) - W^* = E[W_0(1 + R)] - W_0(1 + R^*) = \\ &= W_0 + W_0\mu - W_0 - W_0R^* = -W_0(\mu - R^*) \end{aligned} \quad (2.11)$$

onde μ é o valor esperado da taxa de retorno R .

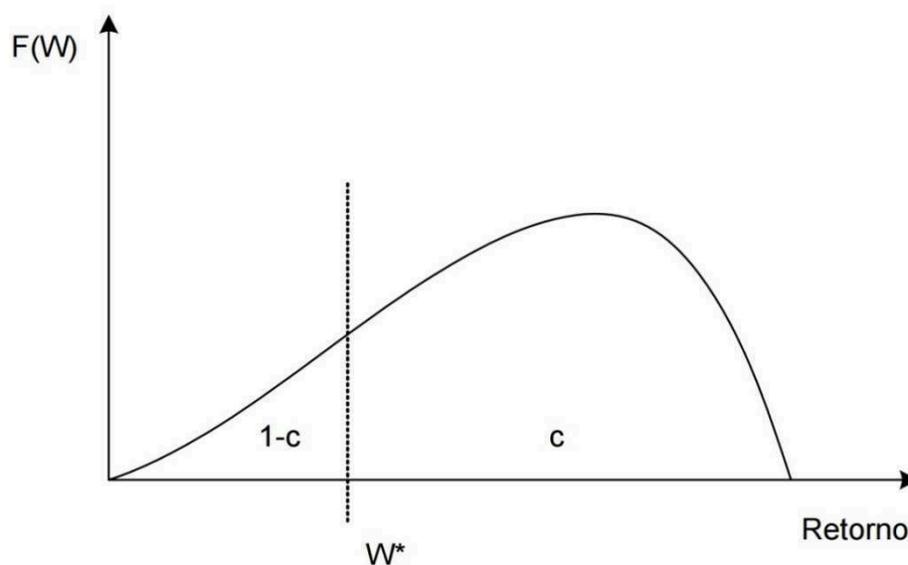
Às vezes, o VaR é definido como o VaR absoluto, ou seja, a perda em unidades monetárias relativa a zero ou sem referência ao valor esperado:

$$VaR_{zero} = W_0 - W^* \quad (2.12)$$

Em ambos os casos, calcular o VaR é equivalente a identificar o valor mínimo W^* ou o retorno de corte R^* . O VaR relativo dado pela equação (2.15) é conceitualmente apropriado porque considera o risco em termos de um desvio da média na data-alvo. Esta abordagem é também conservadora se o valor médio for positivo. A única desvantagem é que os retornos médios são por vezes difíceis de estimar.

Conforme Figura 2.17, o VaR pode ser derivado de funções de distribuição de probabilidade $f(w)$ do valor de retorno de projeto. A um dado nível de confiança c , deseja-se encontrar o pior retorno possível W^* , tal que a probabilidade de exceder este valor seja c , a saber:

Figura 2.17 – VaR para distribuições gerais



Fonte: Arfux (2004).

$$c = \int_{W^*}^{\infty} f(w)dw \quad (2.13)$$

tal que a probabilidade de um valor inferior a W^* , $p = P(w \leq W^*)$, seja $(1 - c)$:

$$1 - c = \int_{-\infty}^{W^*} f(w)dw = P = (w \leq W^*) = p \quad (2.14)$$

O valor W^* é chamado de quantil da distribuição, o qual corresponde ao valor de corte para uma probabilidade fixa excedente. Observe que não se utiliza o desvio padrão para encontrar o VaR. Essa especificação é válida para qualquer distribuição, discreta ou contínua, *fat-or thin-tailed* (JORION, 2001, pg. 109 e 110).

O cálculo do VaR pode ser simplificado se a distribuição puder ser considerada como pertencendo a uma família paramétrica, como a distribuição normal. Quando este é o caso, o valor de VaR pode ser derivado diretamente do desvio padrão do retorno usando um fator multiplicativo que depende do nível de confiança. Essa abordagem é comumente chamada de paramétrica uma vez que envolve a estimação de parâmetros, como o desvio padrão, em vez de apenas utilizar o quantil de uma distribuição empírica.

Tal método é simples e conveniente produzindo medidas precisas de VaR. A questão fulcral é se a aproximação normal é de fato representativa ao problema. Se não, outra distribuição pode se ajustar melhor aos dados. A saber, pode-se traduzir a distribuição geral $f(w)$ em uma distribuição normal padrão $\Phi(\epsilon)$, onde ϵ é uma variável aleatória com média zero e desvio padrão unitário, conforme (2.14). Geralmente, R^* assume valor negativo e também pode ser escrito como $-|R^*|$. Além disso, pode-se associar R^* com uma taxa de retorno $\alpha > 0$ distribuído a partir da função normal padrão, definindo:

$$-\alpha = \frac{-|R^*| - \mu}{\sigma} \quad (2.15)$$

em que σ é o desvio padrão da taxa de retorno R .

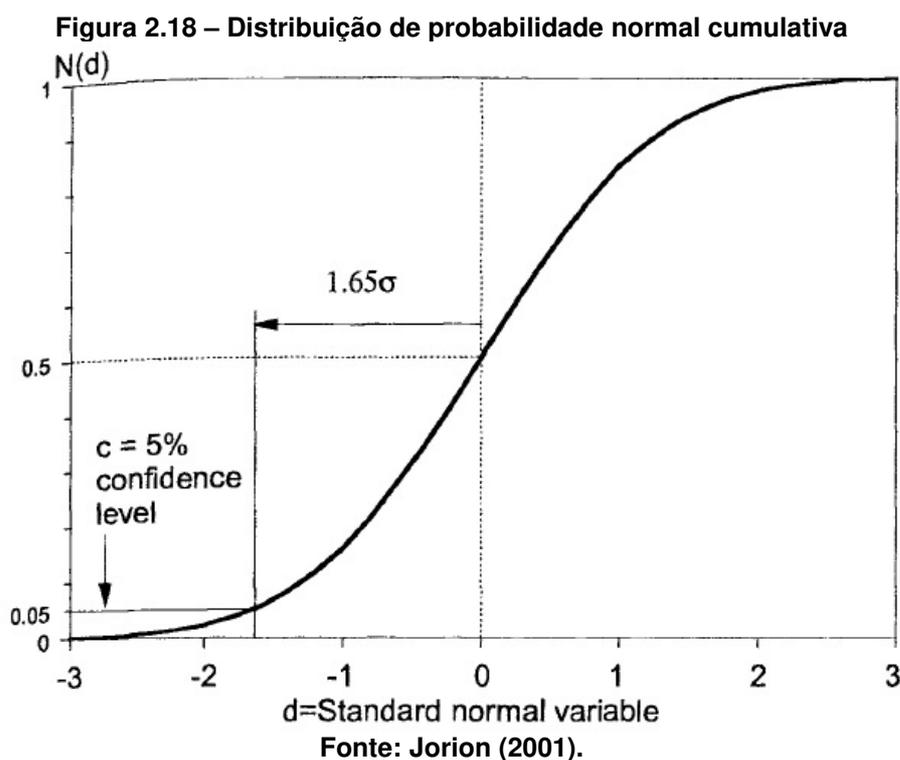
Equivalentemente, tem-se que

$$1 - c = \int_{-\infty}^{W^*} f(w)dw = \int_{-\infty}^{-|R^*|} f(r)dr = \int_{-\infty}^{-\alpha} \phi(\epsilon)d\epsilon \quad (2.16)$$

Assim, o problema de encontrar um VaR é equivalente a encontrar α tal que a área à esquerda dele é igual a $(1 - c)$. Isto é possível, por exemplo, tomando-se tabelas da função de distribuição normal padrão cumulativa representadas pela a área à esquerda de uma variável padrão com valor igual a d :

$$N(d) = \int_{-\infty}^d \phi(\epsilon) d\epsilon \quad (2.17)$$

O gráfico da Figura 2.18 apresenta a função de densidade cumulativa $N(d)$, que aumenta monotonicamente de 0 ($d = -\infty$) para 1 ($d = +\infty$), passando por 0,5 quando d passa por 0.



Para encontrar o VaR de uma variável normal padrão, deve ser selecionado o nível de confiança desejado no eixo vertical (considere-se 5%). Isto corresponde a um valor de $\alpha = 1,65$ menor que 0. Na sequência, deve-se calcular o retorno a taxa de retorno R^* como segue:

$$R^* = -\alpha\sigma + \mu \quad (2.18)$$

Esse método pode ser generalizado para outras funções de probabilidade cumulativa (cdf), bem como a normal, desde que toda a incerteza possa estar contida em σ (JORION, 2001, pg. 110 a 113).

2.3.2.3 *Conditional Value at Risk (CVaR)*

O CVaR é a média dos quantis de pior cenários, sendo que sua medida não realça apenas o valor que “separa” os $c\%$ melhores cenários dos $(1 - c)\%$ piores, porém identifica qual a média dos cenários pessimistas (RIBEIRO, 2009). O CVaR pode chamado de *Mean Excess Loss*, *Mean Shortfall*, ou *Tail VaR*. É considerada com uma medida mais consistente do que o VaR. Mesmo sendo uma medida popular de análise de risco, o VaR tem características matemáticas indesejáveis, tal como a falta de subaditividade e convexidade, sendo coerente quando é utilizado para distribuições normais. Quando associado a uma combinação de dois projetos, pode ser considerada maior que a soma dos riscos de dois projetos.

Visando suprir as lacunas conceituais do VaR, o CVaR é conhecido por apresentar medidas de riscos coerentes possuindo as propriedades de equivariância de translação, homogeneidade positiva, convexidade e monotonicidade. O CVaR está sendo utilizado nos setores de seguro, avaliação de riscos de crédito, bem como na programação estocástica (mesmos que não esteja no contexto financeiro) (URYASEV e ROCKAFELLAR, 1999).

Quando a distribuição de perda de retorno é normal, essas duas medidas são equivalentes, ou seja, fornecem o mesmo projeto ideal. Porém, para distribuições muito distorcidas, os riscos ótimos dos projetos analisados pelos CVaR e VaR podem ser bastante diferentes. Vários estudos de caso mostraram que a otimização de risco com a função de desempenho CVaR e restrições pode ser feito para grandes projetos e um grande número de cenários com recursos computacionais relativamente pequenos.

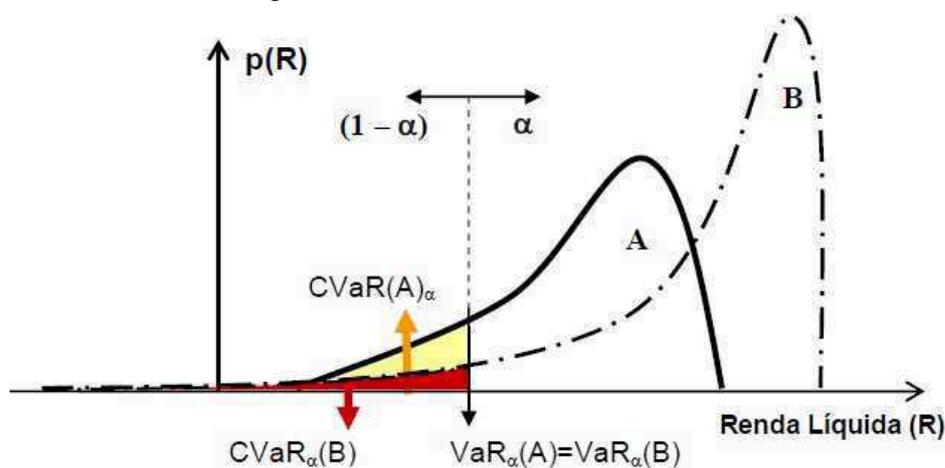
Matematicamente, define-se CVaR a um nível de confiança c como o valor esperado condicional das perdas de um projeto, dado que as perdas a serem contabilizadas são maiores ou iguais ao VaR. Por exemplo, para $c = 95\%$, o CVaR é dado pela média das 5% maiores perdas.

Adotar o CVaR como métrica de risco de um projeto se caracteriza como uma estratégia de gerenciamento de riscos mais conservadora do que o VaR. Isto porque

o CVaR de um projeto a um nível de confiança $c\%$ nunca será menor do que o respectivo VaR. O CVaR também se constitui em uma medida de risco altamente flexível. Quando $c \rightarrow 1$, o CVaR tende ao mínimo da distribuição e quando $c \rightarrow 0$, o CVaR tende ao valor esperado da distribuição (TORRES, 2005).

Na Figura 2.19, torna-se possível observar que as distribuições de retornos de projetos A e B possuem o mesmo VaR, porém a distribuição de retornos do projeto A pode ser considerada mais atraente que a de B. De fato, se a métrica escolhida fosse o VaR, não haveria diferenças entre os projetos.

Figura 2.19 – Conditional Value at Risk



Fonte: Ribeiro (2009).

A distribuição de retorno do projeto B apresenta cenários de perdas muito grandes, mesmo com baixa probabilidade. O CVaR é opção de interesse quando existe preocupação com cenários de perdas de baixo resultado e a todo custo pretende-se evitá-los (RIBEIRO, 2009).

2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foram abordados conceitos teóricos e práticos cujo estudo e levantamento foram o núcleo do trabalho. Estabeleceu-se como foco a descrição das tecnologias de produção de biogás em Estações de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Doméstico, processos e detalhes acerca da geração de energia elétrica através do biogás, além de métodos de análise de risco e estimação de indicadores de desempenho. No próximo capítulo é apresentada a metodologia de análise de viabilidade técnica-econômica, e do risco do investimento para implantação de uma central de geração de energia elétrica, cujo o combustível é o biogás produzido em

Estações de Tratamento Anaeróbio de Esgoto doméstico. Para isto, são realizadas simulações, baseadas na simulação de Monte Carlo, visando determinar a produção de biogás e energia elétrica em uma ETE, os custos de energia elétrica praticados no Brasil, os investimentos e custos de operação da central geradora de energia elétrica, análises para valores de VPL do projeto, risco do investimento através do VaR e CVaR, bem como análise de sensibilidade. A variante não-sequencial do método de Monte Carlo é escolhida, dada a indisponibilidade de um histórico longo de séries anuais de dados de dados das ETEs.

3 METODOLOGIA DESENVOLVIDA

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta como produto da dissertação. Para isto na seção 3.1, está apresentada a modelagem de produção de biogás e energia elétrica para uma ETE anaeróbia, onde são destacadas a função de conversão para a produção de biogás e energia elétrica, além da análise dos valores de vazão e DQO para os dias da semana. Na seção 3.2 está descrita toda a metodologia de análise técnica-econômica e de risco de investimento para implantação de uma central de geração de energia elétrica.

3.1 MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS E ENERGIA ELÉTRICA

3.1.1 Elaboração de função de conversão

A quantificação de produção de biogás gerado a partir de uma ETE para esgoto doméstico que utiliza o processo anaeróbio foi baseado em Lobato (2011) e no documento de fundamentação teórica do *software* ProBio 1.0 (CHERNICHARO E POSSETTI, 2015). Para quantificarmos a produção de biogás e de energia elétrica em uma ETE, inicialmente estudou-se o modelo matemático de estimativa de produção de biogás em reatores UASB. Este modelo foi proposto por Lobato (2011) e utilizado no *software* ProBio 1.0 (CHERNICHARO E POSSETTI, 2015).

Após a realização do estudo, optou-se por implementar o modelo de cálculo das parcelas do balanço de massa da DQO e do potencial de recuperação de metano descrito por Lobato (2011) em *software* de planilhas Excel. Para a construção das planilhas foi necessário efetuar alguns ajustes em unidades e pesquisar alguns itens que não estavam apresentados de forma explícita no documento relativo à fundamentação teórica.

Os dados de entrada deste *software* são: população contribuinte (n° de habitantes), contribuição *per capita* de esgoto, vazão média de esgoto afluente (m^3/dia); concentração de DQO total afluente ($kgDQO/m^3$); concentração de sulfato no afluente (kg_{SO4}/m^3); eficiência de remoção de DQO (%); eficiência de redução de sulfato (%); coeficiente de produção de sólidos; fator de conversão de STV em DQO; fator de supersaturação de CH_4 na fase líquida; perda de CH_4 na fase gasosa com o gás residual (%); outras perdas de CH_4 na fase gasosa (%); temperatura operacional do reator ($^{\circ}C$). Em adição, foram utilizadas as seguintes constantes: DQO consumida

na redução de sulfato – 0,667kgDQO/kg_{SO4}convertido; pressão atmosférica – 1 atm; DQO correspondente a um mol de CH₄ – 0,064 kgDQO/mol; constante universal dos gases – 0,08206 atm.L/mol.K, constante Henry – 21,5 mg/L atm; fator de conversão de massa de metano em massa de DQO – coeficiente estequiométrico 4,0 kgDQO/kgCH₄; poder calorífico decorrente da combustão do metano – 35,9 MJ/Nm³; poder calorífico decorrente da combustão do metano – 10 kWh/Nm³.

3.1.1.1 Cálculo das parcelas do balanço de massa da DQO e do potencial de recuperação de metano

Conforme Lobato (2011), com os valores de entrada e as constantes definidas, é possível determinar a DQO removida no sistema, por meio da equação 3.1.

$$DQO_{remov} = Q_{med} \cdot C_{DQO\ total\ aflu} \cdot E_{DQO} \quad (3.1)$$

em que,

DQO_{remov} é a massa diária de DQO removida no sistema (kgDQO_{remov}.d⁻¹);

Q_{méd} é a Vazão média de esgoto afluyente ao reator (m³.d⁻¹);

C_{DQOtotalafl} é a concentração de DQO total afluyente (kgDQO.m⁻³);

E_{DQO} denota a eficiência de remoção de DQO (%).

Conhecendo o valor de DQO_{remov}, a partir deste ponto torna-se possível estimar a DQO convertida em lodo por meio da equação 3.2.

$$DQO_{lodo} = Y_{obs} \cdot DQO_{remov} \quad (3.2)$$

em que,

DQO_{lodo} é a massa diária de DQO convertida em lodo (kgDQO_{lodo}.d⁻¹);

DQO_{remov} é massa diária de DQO removida no sistema (kgDQO_{remov}.d⁻¹);

Y_{obs} denota coeficiente de produção de sólidos no sistema (kgDQO_{lodo}.kgDQO_{remov}⁻¹), tal que

$$Y_{obs} = Y \cdot K_{sólidos} \quad (3.3)$$

em que,

Y é o coeficiente de produção de sólidos ($\text{kgSVT} \cdot \text{kgDQO}_{\text{remov}}^{-1}$);

$K_{\text{sólidos}}$ é o fator de conversão de STV em DQO ($1,42 \text{ kgDQO}_{\text{lodo}} \cdot \text{kgSVT}^{-1}$).

A DQO convertida em lodo, expressa pela equação 3.1, pode ser dividida em duas parcelas: (i) DQO convertida em lodo e retida no sistema e (ii) DQO convertida em lodo e perdida junto ao efluente. A carga de sulfato que pode ser convertida em sulfeto pode ser expressa por meio da expressão 3.4.

$$CO_{SO_4 \text{ convertida}} = Q_{\text{med}} \cdot C_{SO_4} \cdot E_{SO_4} \quad (3.4)$$

em que,

$CO_{SO_4 \text{ convertida}}$ é a carga de SO_4 convertida em sulfeto ($\text{kg } SO_4 \cdot \text{d}^{-1}$);

$Q_{\text{méd}}$ denota a vazão média de esgoto afluyente ao reator ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

C_{SO_4} expressa a concentração média de SO_4 no afluyente ($\text{kg } SO_4 \cdot \text{m}^{-3}$);

E_{SO_4} representa a Eficiência de redução de SO_4 (%).

A estimativa de carga de DQO na redução do sulfato é representada através da equação 3.5.

$$DQO_{SO_4} = C_{SO_4 \text{ convertida}} \cdot K_{DQO-SO_4} \quad (3.5)$$

em que,

DQO_{SO_4} é DQO utilizada pela BRS na redução de sulfato ($\text{kgDQO}_{SO_4} \cdot \text{d}^{-1}$);

K_{DQO-SO_4} é DQO consumida na redução de sulfato ($0,667 \text{ kgDQO}/\text{kg}_{SO_4 \text{ convertido}}$).

De posse dos valores de DQO_{remov} , DQO_{lodo} , DQO_{SO_4} , é possível se determinar o valor da massa diária de DQO convertida em como através da equação 3.6.

$$DQO_{CH_4} = DQO_{\text{remov}} - DQO_{\text{lodo}} - DQO_{SO_4} \quad (3.6)$$

Com o valor da massa diária de DQO convertida em CH_4 é possível, através da equação 3.7, determinar o valor da produção volumétrica máxima de metano:

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4} \cdot R \cdot (273 + T)}{P \cdot K_{DQO} \times 1000} \quad (3.7)$$

em que

Q_{CH_4} é produção volumétrica máxima de metano ($m^3 \cdot d^{-1}$);

DQO_{CH_4} denota a massa diária DQO removida no reator e convertida em metano ($kgDQO_{CH_4} \cdot d^{-1}$);

P é a pressão atmosférica (1 atm);

K_{DQO} é a DQO correspondente a um mol de CH_4 ($0,064 \text{ kgDQO} \cdot \text{mol}^{-1}$);

R representa a constante dos gases ($0,08206 \text{ atm} \cdot \text{L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$);

T é a temperatura operacional do reator (K).

Para se determinar o valor da concentração de metano no biogás, torna-se necessária a utilização das equações 3.8 e 3.9. Para valores de concentração de DQO total afluyente entre 0,1 e 0,4 $kgDQO \cdot m^{-3}$, utiliza-se a equação 3.8.

$$C_{CH_4} = 2 * 10^{-7} \times C_{DQO \text{ total aflu}}^3 - 0,0004 \times C_{DQO \text{ total aflu}}^2 + 0,2333 \times C_{DQO \text{ total aflu}} + 18 \quad (3.8)$$

Para valores de concentração de DQO total afluyente entre 0,5 a 1 $kgDQO \cdot m^{-3}$, utiliza-se a equação 3.9.

$$C_{CH_4} = 0,0059 \times C_{DQO \text{ total aflu}} + 66,219 \quad (3.9)$$

A partir deste ponto, torna-se possível estimar a produção total de biogás, em função do teor esperado neste, através da equação 3.10.

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad (3.10)$$

em que,

$Q_{biogás}$ representa a produção volumétrica de biogás ($m^3 \cdot d^{-1}$);

C_{CH_4} é a concentração de metano no biogás (% v/v).

No processo de produção do metano há diversas perdas, sendo que as principais são causadas pela dissolução no efluente ou no gás residual, vazamento no reator, purgas de condensado e etc. Para que seja estimado o volume de metano efetivamente coletado no interior do separador trifásico para queima ou produção de energia (térmica ou elétrica), torna-se necessário quantificar estas perdas. Para isto são utilizadas as equações 3.11 e 3.12.

$$Q_{W-CH_4} = Q_{CH_4} \cdot p_w \quad (3.11)$$

$$Q_{O-CH_4} = Q_{CH_4} \cdot p_o \quad (3.12)$$

em que,

Q_{W-CH_4} é a perda de metano na fase gasosa, com o gás residual ($m^3 \cdot d^{-1}$);

p_w é o percentual de perda de metano na fase gasosa, com o gás residual (%);

Q_{O-CH_4} denota outras perdas de metano na fase gasosa ($m^3 \cdot d^{-1}$);

p_o representa o percentual de outras perdas de metano na fase gasosa (%).

A concentração de metano dissolvido no efluente pode ser determinado por meio da expressão 3.13.

$$p_L = \frac{C_{CH_4}}{100} \cdot K_h \cdot F_s \quad (3.13)$$

em que,

p_L é a concentração de metano dissolvido no efluente ($mg \cdot L^{-1}$);

C_{CH_4} representa a concentração de metano no biogás (% v/v).

K_h denota a constante de Henry ($mg \cdot L^{-1} \cdot atm^{-1}$);

F_s é o fator de supersaturação de CH_4 na fase líquida.

Conhecendo a equação que expressa a concentração de metano dissolvido no efluente, é possível determinar as perdas de metano dissolvido no efluente através da equação 3.14.

$$Q_{L-CH_4} = Q_{med} \cdot p_L \cdot f_{CH_4} \cdot \left(\frac{R \cdot (273 + T)}{P \cdot K_{DQO}} \right) \quad (3.14)$$

em que,

$Q_{méd}$ representa a vazão média de esgoto afluyente ao reator ($m^3 \cdot d^{-1}$);

Q_{L-CH_4} é perda de metano na fase líquida, dissolvido no efluente ($m^3 \cdot d^{-1}$);

f_{CH_4} = fator de conversão de massa de metano em massa de DQO (coeficiente estequiométrico $4,0 \text{ kgDQO} \cdot \text{kg}_{CH_4}^{-1}$);

p_L = concentração de metano dissolvido no efluente ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$);

Com os valores das perdas e da produção teórica de metano é possível se determinar, através da equação 3.15, o volume de metano efetivamente coletado no interior do separador trifásico e disponível para coleta.

$$Q_{REAL-CH_4} = Q_{CH_4} - Q_{W-CH_4} - Q_{O-CH_4} - Q_{L-CH_4} \quad (3.15)$$

em que,

$Q_{REAL-CH_4}$ é produção real de metano disponível para recuperação de energia ($\text{Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$).

Para a determinação do potencial energético efetivo e disponível, pode-se utilizar a equação 3.16.

$$PE_{REAL-CH_4} = Q_{N-REAL CH_4} \cdot E_{CH_4} \quad (3.16)$$

em que,

$PE_{REAL-CH_4}$ = Potencial energético disponível ($\text{MJ} \cdot \text{d}^{-1}$);

$Q_{N-REAL-CH_4}$ = Produção real normalizada de metano ($\text{Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

E_{CH_4} = Poder calorífico decorrente da combustão do metano ($35,9 \text{ MJ} \cdot \text{Nm}^{-3}$).

Para valores em kWh pode-se utilizar as seguintes unidades onde,

$PE_{REAL-CH_4}$ é o Potencial energético disponível ($\text{kWh} \cdot \text{d}^{-1}$);

$Q_{N-REAL-CH_4}$ expressa a Produção real normalizada de metano ($\text{Nm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$);

E_{CH_4} denota o Poder calorífico decorrente da combustão do metano ($10 \text{ kWh} \cdot \text{Nm}^{-3}$).

A produção de energia elétrica pode ser descrita pela expressão 3.17.

$$PE_{elet} = PE_{REAL-CH_4} \cdot \eta \quad (3.17)$$

em que,

$PE_{REAL-CH_4}$ representa o Potencial de energia elétrica disponível (kWh. d⁻¹);

$PE_{REAL-CH_4}$ é o Potencial energético disponível (kWh. d⁻¹);

η denota o rendimento do conjunto moto gerador (%).

Com a formulação matemática descrita, faz-se possível definir cenários de aplicação de interesse. Foram estudados três cenários, denominados pior, típico e melhor, para determinação da produção de biogás e energia elétrica em uma ETE. Os cenários de análise estão descritos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Cenários de estimativas para determinação de produção de biogás e energia elétrica

Cenário de Estimativa	Pior	Típica	Melhor
E_{DQO} – Eficiência de remoção de DQO (%)	60	65	70
Y – Coeficiente Produção Sólidos (kgSVT/kgDQO _{remov})	0,15	0,15	0,15
C_{SO_4} – Concentração média de SO ₄ no afluente (kgSO ₄ /m ³)	0,020	0,015	0,010
E_{SO_4} – Eficiência na remoção de SO ₄ (%)	80	75	70
pw – Perda com o gás residual (%)	7,5	5	2,5
po – Outras perdas (%)	7,5	5	2,5
Fs – Fator de supersaturação de CH ₄ na fase líquida	1,70	1,35	1,00
T – Temperatura operacional do reator (°C)	25	25	25

Fonte: Adaptado Lobato (2011)

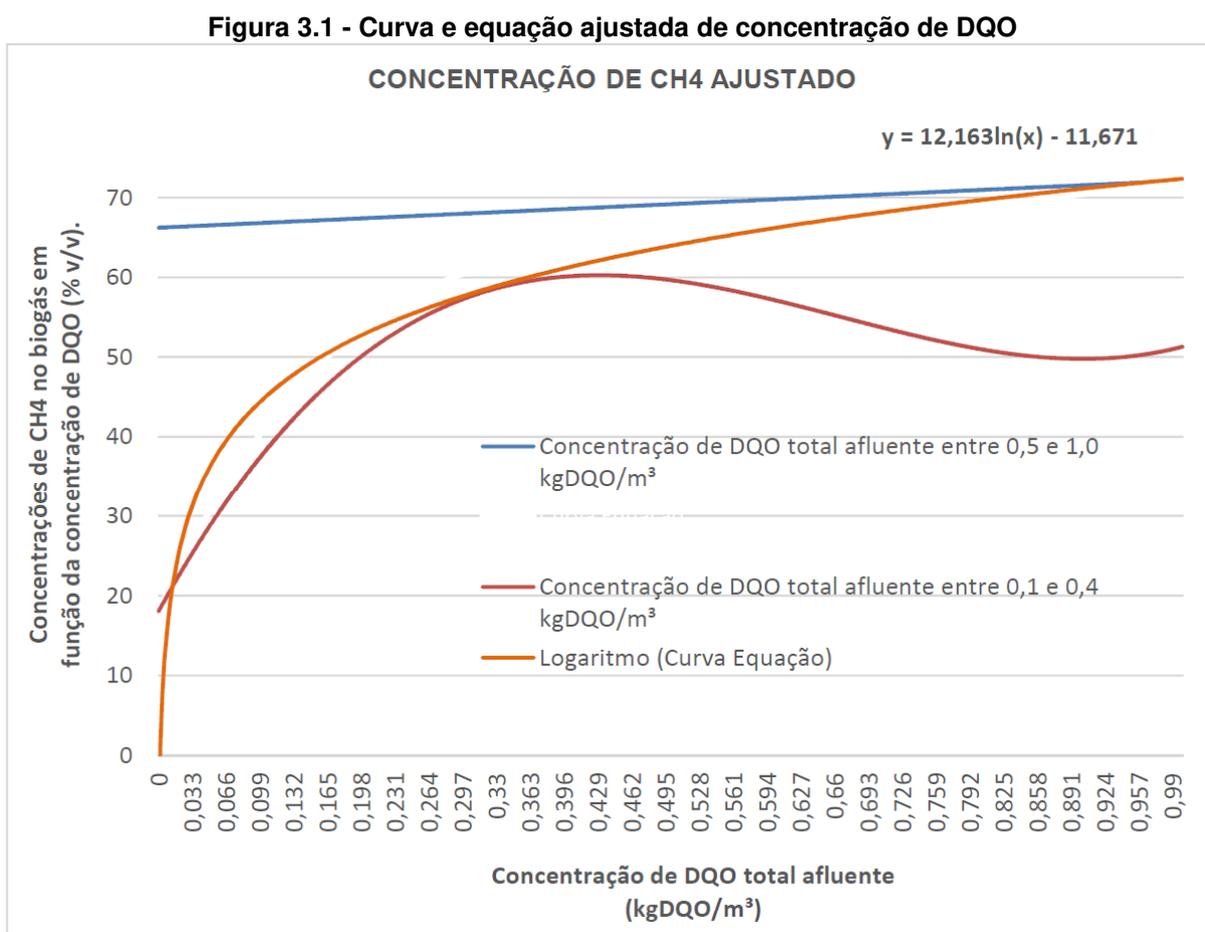
A validação desta função de conversão foi realizada através dos resultados alcançados por Lobato (2011).

3.1.2 Adequações realizadas na função de conversão

Durante a pesquisa, adotou-se uma visão gerencial conservadora, tendo em vista que este estudo trata de uma análise de viabilidade e estimação de risco de investimento. Devido a isto disto, optou-se pelo cenário de estimativa pior para as análises e estudos de caso.

Em relação ao valor da concentração de metano no biogás há duas equações que a modelam em função da concentração de DQO total afluente entre 0,1 e 0,4

kgDQO/m³, e concentração de DQO total afluyente entre 0,5 a 1 kgDQO/m³. Há casos em que a concentração de DQO total do afluyente tem valores maiores que 0,4 e menores que 0,5 kgDQO/m³, bem como valores acima de 1 kgDQO/m³. Em função disto, optou-se em desenvolver uma curva que fosse aproximada às duas curvas das equações citadas anteriormente. A curva e a equação aproximada desenvolvidas estão descritas na Figura 3.1.



Fonte: Autoria Própria

Dessa forma, visando adotar critérios conservadores de produção de biogás e energia elétrica, para os valores acima de 1 kgDQO/m³, foram adotados os valores de concentração de metano iguais ao valor calculado para a concentração de DQO igual a 1 kgDQO/m³. Para os demais valores, foi adotada a equação 3.18:

$$C_{CH_4} = 12,163 \ln(C_{DQO_{total}}) - 11,671 \quad (3.18)$$

em que,

C_{CH_4} representa a concentração de metano no biogás (% v/v);

$C_{DQO_{total}}$ é a concentração de DQO total afluyente ($kgDQO.m^{-3}$).

3.1.3 Análise dos valores de Vazão e DQO em função dos dias da semana

Para verificar a existência de alterações nos valores médios diários de vazão e DQO em função do dia da semana, foi realizada uma análise onde estratificou-se os valores médios horários de vazão (l/s) e DQO (mg/l) do período de medição compreendido entre os dias 29/04/2019 a 01/07/2019 de uma ETE localizada no Brasil. Ao se determinar o desvio padrão desses dados, observou-se que suas diferenças são reduzidas tanto para os valores de vazão como de DQO. Os dados desta análise estão representados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Análise dos valores de Vazão e DQO em função do dia da semana

ETE A PERÍODO MEDIÇÕES 29/04/2015 a 01/07/2019	DESVIO PADRÃO DADOS VAZÃO (l/s)	DESVIO PADRÃO DADOS DQO (mg/l)
Domingo	111,71	511,32
Segunda-feira	115,14	552,61
Terça-feira	113,50	564,70
Quarta-feira	108,47	546,13
Quinta-feira	107,69	516,27
Sexta-feira	100,39	511,69
Sábado	100,39	510,49

(*) NÃO FORAM REGISTRADOS OS DIAS ONDE A QUANTIDADE DOS DADOS HORÁRIOS PERDIDOS SUPEROU 5.

As distribuições de probabilidade desses dados também foram levantadas, não se observando variações expressivas entre dias da semana. Devido a isto, assumiu-se que o dia da semana não influi nos valores médios diários de vazão e DQO.

3.2 METODOLOGIA

A metodologia desenvolvida neste trabalho foi dividida nas seguintes etapas:

- a) Produção de CH_4 : Modelagem da produção de biogás em ETE através da amostragem de dados baseados parâmetros estatísticos e não determinísticos;

- b) Produção de Energia Elétrica: determinação da produção diária e mensal de energia elétrica, e critérios de dimensionamento dos principais equipamentos da central de energia elétrica;
- c) Análise de viabilidade técnica-econômica através da ferramenta VPL: análise considerando os critérios de modalidade tarifária, bandeira tarifária, custos de operação e manutenção da central geradora, valores de investimento, impostos, duração do projeto, custo de capital, fluxos de caixa de operacionais e de investimento, impostos e VPL;
- d) Análise de Risco e Sensibilidade: Análise da Determinação do risco do investimento utilizando as ferramentas VaR e CVaR, bem como da sensibilidade.

A partir deste ponto, passa-se a descrever cada uma das etapas propostas.

3.2.1 Etapa 1 – Produção de CH₄

Nesta Etapa é tratada a modelagem da produção de biogás em ETE por meio da amostragem de dados baseados parâmetros estatísticos e não determinísticos.

3.2.1.1 Levantamento do histórico de vazão e DQO médios do afluente da ETE

Levantou-se, por meio dos dados disponibilizados pelo Projeto Medições de Biogás em Reatores Anaeróbios (BRASIL, 2016), uma amostra de dados medidos em campo entre abril/2015 e julho/2016, quais sejam, vazão (l/s) e DQO (mg/l) médios do afluente de uma Estação de Tratamento Anaeróbio de Esgotos localizada no Brasil. Os resultados das medições foram agrupados em uma planilha eletrônica do *software* Microsoft Excel 2013[®]. Com base na amostra, foram apurados valores mínimos e máximos, valor médio, tamanho da amostra, e desvio padrão, entre outros valores de relevância.

3.2.1.2 Elaboração de histogramas para os dados médios de vazão e DQO do afluente da ETE

Após o levantamento dos dados históricos de vazão e DQO médios da ETE, foram elaborados histogramas utilizando-se planilha eletrônica do *software* Microsoft Excel 2013[®], com o objetivo de obter subsídios para determinar o tipo de distribuição normalizada que mais se assemelha à vazão e ao DQO das amostras.

3.2.1.3 Determinação dos tipos de distribuições de probabilidade dos histogramas de vazão e DQO médios

Foram determinados os dois tipos de distribuição que mais se assemelham com os histogramas dos dados médios de vazão e DQO, utilizando-se a função *Distribution Fitting* do software XLSTAT®. Desta forma, foi possível verificar parâmetros das distribuições, que foram utilizados como dados de entrada em uma função de distribuição de probabilidade para criação de curvas de distribuição com um determinado número de amostras.

3.2.1.4 Definição dos cenários de produção de CH₄

Similarmente a Lobato (2011), para a determinação de cenários de produção de CH₄, estudou-se a possibilidade de escolha de diferentes cenários de produção (“Pior”, “Típico” e “Melhor”). Conforme descrito na seção 3.1.1, considerando que este estudo tem por objetivo determinar valores de risco do investimento, optou-se, de forma conservadora, pela utilização dos dados do cenário “Pior”, que apresenta as menores produções de CH₄.

3.2.1.5 Definição do número de amostras aleatórias para as variáveis do projeto visando realização de simulações

Definiu-se a quantidade de simulações de Monte Carlo necessárias para o desenvolvimento do projeto, a fim de disponibilizar uma quantidade de amostras elevadas e confiáveis para os valores de VPL do investimento para um certo intervalo de anos, bem como para valores de VaR e CVaR. Para obter-se 5.000 valores de VPL anuais médios, necessitou-se amostrar 1.800.000 dados diários de vazão e DQO média do afluente da ETE, além das variáveis que caracterizam o cenário “Pior” de produção de CH₄. Esses dados sintéticos de entrada permitem, por meio da função de conversão descrita na seção 3.1.1, produzir 1.800.000 amostras de produção diária de CH₄ e, conseqüentemente, 1.800.000 amostras de produção diária de energia elétrica.

Considerando-se que o faturamento de energia elétrica é mensal, dividiu-se a quantidade de amostras de produção de energia elétrica diária por trinta (dias do mês), tendo sido obtidas 60.000 amostras de energia elétrica e de custo evitado / ganho com energia elétrica. Como a análise do VPL foi realizada em função do ano,

dividiu-se as 60.000 amostras por doze (meses em um ano), obtendo-se 5.000 amostras anuais de produção de energia elétrica, bem como 5.000 amostras de custos evitados / ganhos.

Para determinar 5.000 valores de VPL do investimento para um certo intervalo de tempo, além das amostras de custos evitados / ganho, definiram-se 5.000 amostras de custos operacionais, valores de investimento, e de duração do projeto. Todos os indicadores estimados a partir dessas amostras, nomeadamente para estimativas de custos / ganhos, foram aferidos por meio do coeficiente de variação do método de simulação de Monte Carlo.

A escolha de 5.000 amostras permite encontrar valores de VaR e CVaR mais precisos e que atende a necessidade desse estudo. Quanto maior o número de amostras, maior será a precisão dos resultados, porém exigirá um maior esforço para determinar as amostras de produção de CH₄ e Energia Elétrica.

Para cada conjunto de amostra, visando apoiar as decisões quanto a sua quantidade, optou-se em determinar os coeficientes de convergência (beta). Decidiu-se neste trabalho que estes conjuntos devem possuir um beta menor igual a 5%, fato este que torna as distribuições aderentes aos dados das amostras.

3.2.1.6 Geração aleatória dos valores médios de vazão e DQO do afluente da ETE

Como os dados de vazão e DQO do afluente da ETE são os principais dados de entrada para determinar a produção diária de CH₄, procedeu-se com a geração de dados aleatórios baseada nos parâmetros de distribuição de probabilidade desses valores, bem como das outras variáveis que compõem o cenário “Pior”. Para os parâmetros do cenário “Pior”, foram gerados dados aleatórios baseados em distribuições normais (uma para cada variável), onde os parâmetros de média (μ) foram baseados no valor “Pior” de cada variável, e o desvio padrão (σ) é baseado em $\frac{1}{4}$ da diferença entre os valores de cada cenário. O valor de $\frac{1}{4}$ para o desvio padrão foi utilizado para deixar a maioria dos valores da distribuição mais próximos do valor da média.

Utilizou-se das funções de geração de números aleatórios dos *softwares* Microsoft Excel 2013[®] e XLSTAT[®] para gerar estas amostras. Em função do *software* Microsoft Excel 2013[®] não possuir um grande número de funções de distribuições de probabilidade, foi utilizado o *software* XLSTAT[®] para complementar as funções

faltantes. Para cada variável de entrada da função de conversão, foram utilizadas diferentes sementes aleatórias.

3.2.1.7 Estimação de valores aleatórios de produção diária de CH₄

Para estimar as amostras de produção diária de energia elétrica, optou-se neste, fez-se necessário estimar amostras aleatórias de produção diária de CH₄. Para essa estimação, foram necessários conjuntos de 1.800.000 amostras de cada variável de entrada da função de conversão. Cada conjunto de amostras foi inserido na função de conversão em planilha elaborada no *software* Microsoft Excel 2013[®], com base no modelo de produção. Como fruto dessa simulação foram geradas 1.800.000 amostras de CH₄.

A partir destes dados, determinou-se os valores de produção diária de CH₄ mínimos e máximos, valor médio, e desvio padrão, sendo elaborado um histograma para representação desta produção. Com isso, foi realizada uma análise de *fitting* para encontrar qual a distribuição que mais se assemelhava com os dados de produção. Na primeira tentativa, foram utilizadas 1.800.000 amostras, porém o *software* XLSTAT[®] não conseguiu determinar o seu tipo. Por esta razão, realizou-se diversas simulações posteriores, variando-se o número de amostras, até que com 5.000 amostras, o *software* encontrou a distribuição que mais se assemelhava aos dados de produção determinados.

Este item conclui a Etapa 1. Ressalta-se que ao realizar a Etapa 1 por completo, é possível obter uma análise probabilística da produção diária de CH₄ para aplicação em estudos de viabilidade de secagem térmica de lodo em ETEs e comercialização de CH₄ gaseificado.

3.2.2 Etapa 2 – Produção de Energia Elétrica

Nesta etapa é descrita a metodologia diária e mensal de produção de energia elétrica, bem como critérios básicos da metodologia de dimensionamento dos principais equipamentos (grupo moto gerador e gasômetro) da central geradora de energia elétrica.

3.2.2.1 Estimação de valores aleatórios de produção diária de energia elétrica

Como a função de conversão fornece a produção diária de CH_4 , torna-se necessário estimar a produção diária de energia elétrica para ser possível a estimação dos valores mensais de produção.

Para este estudo utilizou-se a hipótese de utilizar um GMG com MCI. No processo de conversão da energia química contida no CH_4 para energia elétrica há diversas perdas. Por essa razão, necessitou-se estimar as amostras de energia elétrica considerando essas perdas. Para a estimação foram utilizadas 1.800.000 amostras de produção diária CH_4 . Inicialmente, estimou-se para este projeto que o rendimento da conversão energética foi de 30% (DAL BEM, 2008). Este valor foi utilizado para todas as simulações de produção de energia elétrica. A partir disto, multiplicou-se as 1.800.000 amostras de energia química geradas a partir da produção de CH_4 pelo valor de rendimento da conversão, visando determinar as 1.800.000 amostras de produção de energia elétrica diárias.

A partir destes dados, foram determinados os valores de produção mínimos e máximos, valor médio, e desvio padrão. Foram elaborados dois histogramas para representação destas produções. Com isso, foi realizada uma análise de *fitting* para encontrar qual a distribuição que mais se parecia com os dados de produção diária de energia elétrica. Da mesma forma como reportado no item anterior, análise da produção diária de CH_4 , para esta análise da produção diária de energia elétrica, na primeira tentativa, foram utilizadas 1.800.000 amostras, porém o *software* XLSTAT® não conseguiu determinar o seu tipo. Por esta razão, realizou-se diversas simulações posteriores, variando-se o número de amostras, até que com 5.000 amostras, o *software* encontrou a distribuição que mais se assemelhava aos dados de produção obtidos.

3.2.2.2 Estimação de valores aleatórios de produção mensal de energia elétrica

Para as análises de viabilidade de viabilidade técnica-econômica, torna-se necessários estimar os valores de produção mensal de energia elétrica. Considerando que o faturamento de energia elétrica é realizado mensalmente, optou-se por contabilizar o valor mensal (e não diário) de produção, agrupando-se os valores de produção de energia elétrica em períodos de trinta dias.

A produção diária de energia elétrica foi amostrada em uma coluna com 1.800.000 linhas contendo valores aleatórios desta produção. Para determinar a produção mensal, as amostras diárias foram agrupadas com intervalos de trinta valores de produção diária, na sequência em que estes foram geradas. Este procedimento foi adotado para evitar que dias com valores muito baixos ou muito altos de produção de energia elétrica produzissem dados mensais e anuais discrepantes que poderiam gerar informações incorretas. Dessa forma, determinou-se 60.000 amostras mensais de produção de energia elétrica.

A partir destes dados, foram determinados os valores de produção mínimos e máximos, valor médio, e desvio padrão. Foi elaborado um histograma para representação destas produções e comparação com o histograma de produção diária. Essas estimações foram realizadas utilizando o *software* Microsoft Excel 2013[®]. Utilizando o *software* XLSTAT[®], foi realizada uma análise de *fitting* para encontrar qual tipo de distribuição mais se assemelha com estes dados de produção e efetuar comparação com o histograma de produção diária.

3.2.2.3 Dimensionamento do Grupo Moto Gerador e Gasômetro

Esta ação tem o objetivo de apresentar a metodologia de dimensionamento da potência do grupo moto gerador de energia elétrica e do volume do gasômetro destinado a armazenar o CH₄, para embasar a definição dos valores de investimentos de implantação desta central geradora.

Para o dimensionamento, optou-se pela utilização de GMG com MCI, em função da maior disponibilidade de ofertas deste tipo equipamento no mercado brasileiro durante a fase de aquisição, quanto na disponibilidade de mão de obra de operação e manutenção. Além disso, devido aos fabricantes serem nacionais, as peças de reposição destes equipamentos têm maior disponibilidade de serem encontradas no mercado.

Para dimensionar o grupo moto gerador, inicialmente deve ser apurado o valor médio de todas as amostras de produção diária de energia elétrica. A partir deste ponto, o valor de potência do grupo moto gerador deve ser determinado por meio da divisão da produção média diária de energia elétrica pelo número de horas do dia. Para dimensionar o gasômetro, inicialmente foi determinado o valor médio de todas as amostras de produção diária de CH₄. Conforme Brasil (2016, pg. 68 e pg. 75), para

o dimensionamento do gasômetro foi adotado o critério de 30% do volume diário de produção de CH₄ gerado.

Este item encerra a Etapa 2. Ao concluí-la, é possível obter uma análise probabilística da produção diária de energia elétrica para aplicação em estudos de dimensionamento de equipamentos da central elétrica equipamentos e estudos probabilísticos de geração de energia elétrica.

3.2.3 Etapa 3 – Análise de viabilidade técnica-econômica através da ferramenta VPL

Nesta etapa será efetuada a análise da viabilidade técnica-econômica através da ferramenta VPL, considerando os critérios de modalidade tarifária, bandeira tarifária, custos de operação e manutenção da central geradora, investimento, impostos, duração do projeto, depreciação do investimento, fluxos de caixa de operações e de investimentos.

3.2.3.1 Geração aleatória de bandeiras tarifárias

Visando estimar o custo evitado / ganho com geração de energia elétrica, torna-se necessário considerar a variação das bandeiras tarifárias no valor da energia elétrica. Para isso o objetivo deste item é a apresentar a metodologia de geração de bandeiras tarifárias aleatórias em função do histórico de aplicação existente. A flutuação da bandeira tarifária pode provocar alterações no custo da energia elétrica, tornando-se necessário considerar este requisito no cálculo do custo evitado / ganho com energia elétrica gerado em ETES, a fim de subsidiar a análise de viabilidade técnica econômica e determinação do VaR e CVaR.

Para simular o custo de evitado de energia elétrica considerando a bandeira tarifária foi necessário levantar o histórico das bandeiras tarifárias que foram implantadas de janeiro/2015 até maio/2019. Ao verificar este histórico, observou-se a seguinte proporção de aplicação das bandeiras tarifárias:

- Bandeira Verde: 37,74%;
- Bandeira Amarela: 15,09%;
- Bandeira Vermelha Patamar 1: 13,21%;
- Bandeira Vermelha Patamar 2: 33,96% (ANEEL, 2019).

A partir destes dados, foram definidas as seguintes probabilidades acumuladas:

- Bandeira Verde: 37,74%;
- Bandeira Amarela: 52,83%;
- Bandeira Vermelha Patamar 1: 66,04%;
- Bandeira Vermelha Patamar 2: 100%.

A partir destes dados de proporção, foi sorteado um número aleatório uniforme de porcentagem entre 0% a 100%, realizando-se o seguinte teste:

- Para valores menores que 37,74%: Bandeira Verde;
- Para valores maiores que 37,74% e menores que 52,83%: Bandeira Amarela;
- Para valores maiores que 52,83% e menor que 66,04%: Bandeira Vermelha Patamar 1;
- Para valores maiores que 66,04%: Bandeira Vermelha Patamar 2.

Em função destas condições apresentadas, foram elaboradas 60.000 amostras para serem utilizadas na determinação dos valores de custo evitado / ganho com geração de energia elétrica. Estas amostras foram geradas utilizando *software* Microsoft Excel 2013®.

3.2.3.2 Estimação de valores aleatórios para Custo Evitado / Ganho com energia elétrica mensal

Esse item tem como meta descrever como foram determinados os valores das amostras dos Custos evitados / Ganhos com energia elétrica durante um mês (trinta dias). Esta etapa visa dar subsídios para estimar os valores de LAJIR. Em função do faturamento dos custos com energia elétrica serem mensais, torna-se necessário que o cálculo seja realizado neste intervalo. Para esse caso, obteve-se 60.000 amostras de custo evitado / ganho com energia elétrica a cada mês. Para a análise deste caso, considerou-se os seguintes itens:

- a) Valor da tarifa: para empresas de saneamento, a ANEEL estabelece um desconto de 15%⁴ nas tarifas de demanda e consumo de energia elétrica, em relação às tarifas dos consumidores que não possuem desconto;
- b) Modalidade tarifária: foi considerada para as análises a modalidade tarifária horária verde do grupo A4 – Água, esgoto e saneamento;
- c) Bandeiras tarifárias: para este estudo foram considerados os seguintes acréscimos nas tarifas de consumo:
- Bandeira amarela: R\$ 0,01 para kWh consumido;
 - Bandeira vermelha patamar 1: R\$ 0,03 para kWh consumido;
 - Bandeira vermelha patamar 2: R\$ 0,05 para kWh consumido;
 - No caso da bandeira verde não há acréscimo.
- d) Consumo de energia elétrica: para determinar o valor do custo evitado com energia elétrica da ETE, foi utilizada a equação 3.19.

$$CEEE = \frac{3}{24} * E * CUP + \frac{21}{24} * E * CUIFP \quad (3.19)$$

em que,

CEEE representa o custo evitado com energia elétrica por mês (R\$.m⁻¹);

E é a Energia elétrica gerada por dia (kWh.m⁻¹);

CUP expressa o valor da tarifa de consumo no horário de ponta (R\$.kWh⁻¹);

CUIFP é o valor da tarifa de consumo no horário fora de ponta (R\$.kWh⁻¹);

Durante a fase de amostragem dos 60.000 valores de CEEE, para cada amostra, foram aplicados nos itens CUP e CUIFP um tipo diferente de bandeira tarifária baseada na metodologia de geração aleatória de bandeira tarifária descrita no item anterior. De posse das 60.000 amostras, determinou-se os valores mínimos e máximos, valor médio, e desvio padrão juntamente com um histograma para representação destas produções. Estas amostras foram geradas utilizando *software* Microsoft Excel 2013[®].

⁴ Para esse estudo utilizou-se o desconto de 15%, porém em função do Decreto nº 9642 de 27 de dezembro de 2018, está prevista a eliminação desse desconto em 5 anos. Para o ano de 2019, o desconto praticado foi de 12%.

Além disso, por meio do *software* XLSTAT® foi realizada uma análise de *fitting* para encontrar qual a distribuição que mais se parece com estes dados de produção e efetuar comparação com o histograma de produção diária.

3.2.3.3 Geração aleatória de custos operacionais mensais

Este item tem o objetivo de descrever como foi realizada geração aleatória dos custos operacionais mensais para central de geração de energia elétrica. Estes custos são necessários para compor o cálculo do Fluxo de Caixa Operacional (FCO) e do LAJIR.

Faz-se necessário, para fins do FOC, que estes valores sejam apresentados em base mensal. Por esta razão, foram geradas aleatoriamente 60.000 amostras aleatórias baseadas em uma distribuição triangular com parâmetros pré-definidos (valor mínimo, máximo e moda). A geração destes números aleatórios foi realizada utilizando o *software* Microsoft Excel 2013®. Para esse caso, optou-se em utilizar a distribuição triangular, pois se adequa muito bem aos modelos de prazos e custos em gestão de projetos. Além disto, seus parâmetros são baseados nos valores da moda e nos valores mínimos e máximos das amostras estudadas (DOS SANTOS MACHADO; FERREIRA, 2015).

Esta distribuição geralmente é utilizada quando existe uma ideia subjetiva da população, através dos seus extremos e de sua moda (EVANS; HASTINGS; PEACOCK, 2001). Os custos operacionais são compostos pelos seguintes itens:

- a) Custos com pessoal para operação e manutenção da Central Geradora.
 - Mão de obra de operação da Central: para a realização da operação da Central é necessário que pessoas sejam responsáveis pelos trabalhos de monitoramento, que podem ser presenciais ou remotos. Esta atividade deve ser realizada durante as 24 horas do dia e 7 dias da semana. Para isto é importante que os operadores trabalhem em turnos de revezamento. Este monitoramento da Central Geradora pode ser realizado de forma compartilhada pelos operadores da ETE, tendo em vista que já fazem o serviço de operação da Estação. A área gestora pode, em função desta situação, complementar o número de operadores visando manter a qualidade operacional.

- Mão de obra de manutenção da Central: a continuidade da operação da central geradora depende da operação correta e de serviços de manutenção preventiva, preditiva e corretiva. Para isto é necessário que profissionais realizem os serviços de planejamento, inspeção, monitoramento e troca de peças. Estas atividades envolvem horas de trabalho de técnicos e engenheiros. Ao contrário do serviço de operação, este trabalho pode ser realizado durante os dias úteis e em horário comercial, sendo que fora deste horário os profissionais podem ficar em regime de sobreaviso, atendendo uma escala de revezamento. Vale ressaltar que é possível utilizar os profissionais responsáveis pela manutenção eletromecânica do sistema de esgotamento sanitário da companhia de saneamento responsável por esta ETE.

- b) Custos com materiais e equipamentos para operação e manutenção da Central Geradora.

Durante as atividades de manutenção e operação torna-se necessário fazer a aquisição de alguns materiais e equipamentos que sofrem desgaste durante a operação da Central. Geralmente o fabricante da central recomenda a troca de óleo lubrificante, filtros, juntas e outros materiais e equipamentos em um período de horas de funcionamento.

- c) Custos com serviços de terceiros.

Seguem comentários sobre as características destes custos:

Tendo em vista que o sistema de geração de energia elétrica através do biogás produzido em ETEs possui particularidades em relação as demais centrais geradoras, torna-se importante a contratação de profissionais terceiros que são especialistas na manutenção de algumas partes. Este custo deve ser previsto no planejamento operacional desta Central.

Vale ressaltar a necessidade que durante a elaboração dos contratos para este tipo de serviço, seja incluída uma cláusula que permita, o técnico da companhia de saneamento acompanhe e receba treinamento para realização deste serviço em um futuro breve.

- d) Custos com despesas operacionais.

As despesas operacionais são constituídas de todos os custos necessários para manter a central em funcionamento, tais como energia elétrica, água, esgoto, limpeza, locação, custos administrativos e etc.

Para a geração destas distribuições foi utilizado o *software* Microsoft Excel 2013[®]. Vale ressaltar que os valores utilizados foram baseados nos custos utilizados pela Companhia de Saneamento que administra a ETE estudada.

3.2.3.4 Cálculo de valores aleatórios do LAJIR

Este passo tem como objetivo determinar amostras dos valores de LAJIR para cada doze meses, a fim de subsidiar a determinação do Fluxo de Caixa Operacional do projeto para o período de doze meses. Inicialmente, foi necessário determinar o Lucro Antes dos Juros e Imposto de Renda (LAJIR) para um período de trinta dias considerando a equação 3.20.

$$LAJIR \text{ (mensal)} = CEEE - (CPOM + CMEOM + CST + CDO) \quad (3.20)$$

em que,

LAJIR (mensal) = Lucro antes de juros de imposto de renda no período de um mês (R\$. mês⁻¹);

CEEE = Custo evitado com energia elétrica por mês (R\$.mês⁻¹);

CPOM = Custo com pessoal para operação e manutenção da Central Geradora (R\$.mês⁻¹);

CMEOM = Custo com materiais e equipamentos para operação e manutenção da Central Geradora (R\$.mês⁻¹);

CST = Custo com serviços de terceiros (R\$.mês⁻¹);

CDO = Custo com despesas operacionais (R\$.mês⁻¹);

Utilizando-se esta equação, foram geradas 60.000 amostras dos LAJIRs referentes ao período de trinta dias, resultantes das 60.000 amostras dos custos mensais operacionais e custos evitados / ganho com geração de energia elétrica. Para determinar os valores dos LAJIRs para o intervalo de doze meses, foram agrupadas, de doze em doze, as 60.000 amostras dos LAJIRs relativos ao período de trinta dias, na sequência em que estes foram gerados. Este procedimento foi adotado para evitar que meses com valores muito baixos ou muito altos de LAJIR produzissem dados anuais discrepantes que poderiam gerar informações incorretas. Desta foram obtidas

5.000 amostras de LAJIR. Estas amostras foram geradas utilizando o *software* Microsoft Excel 2013®.

3.2.3.5 Estimação de valores aleatórios de Fluxo de Caixa Incremental referente as operações da Central Geradora

Este passo tem a função de determinar valores aleatórios de Fluxo de Caixa Incremental referente às operações desta central, para compor o cálculo do Valor Presente do Projeto (VPP)

Para determinar este Fluxo de Caixa, foi utilizada a equação 3.21.

$$FCO(anual) = LAJIR(anual) - (LAJIR(anual) * (IRPF + CSLL)) \quad (3.21)$$

em que,

FCO (anual) = Fluxo de caixa incremental – Operações (R\$);

LAJIR (anual) = Lucro antes de juros de imposto de renda no período de um ano (R\$);

IRPF = Imposto de renda de pessoal jurídica – 25%;

CSLL = Contribuição Social sobre o Lucro Líquido – 9%

A partir da equação 3.21 foram amostrados 5.000 valores anuais de fluxo de caixa. Em relação aos valores de depreciação da central geradora, vale observar que o tempo de depreciação do imobilizado foi considerado igual a 10 anos (taxa de depreciação linear de 10% ao ano), conforme valor aceito pelo fisco para instalações e equipamentos (Instrução Normativa SRF nº 162/1998) (BRASIL, 2019). Considerou-se neste estudo que a depreciação não representa um desembolso de recursos da empresa; portanto, não afeta o fluxo de caixa das operações diretamente.

O abatimento do IRPF/CSLL relacionado ao benefício fiscal da depreciação não foi considerado, uma vez que este benefício está ligado ao próprio valor do investimento inicial, o qual é desconhecido neste ponto da análise. Estas amostras foram geradas utilizando o *software* Microsoft Excel 2013®.

3.2.3.6 Geração aleatória de valores de fluxo de caixa incremental dos investimentos;

Este passo tem a função de gerar os valores de Fluxo de Caixa Incremental referente aos investimentos, para compor o cálculo do VPI. Para este caso foi utilizado a geração aleatória de 5.000 amostras baseadas em distribuição triangular. Para gerar valores de acordo com esta distribuição são informados o valor da moda e os valores máximos e mínimos.

A implantação de uma central geradora de energia elétrica que utiliza biogás proveniente de uma ETE que trata esgoto doméstico demanda um planejamento de investimento que a diferencia de demais plantas que possuem como combustível gás natural, óleo diesel e etc. Para este caso, os investimentos necessários na implantação desta Central devem englobar os desembolsos com os seguintes itens:

- a) elaboração de projetos e aprovação em órgãos competentes;
- b) obras civis que contemplem construção de base para instalação do grupo gerador;
- c) aquisição de equipamentos eletromecânicos tais como grupo moto geradores, sistema de tratamento de biogás, gasômetro, sistema de captação do biogás, instrumentação e sistema de queima do biogás não utilizado para a geração de energia;
- d) serviço de adequações na entrada de energia visando atendimento aos padrões da concessionária local de energia elétrica para geração distribuída;
- e) serviço de instalações elétricas, hidráulicas e de gás.

Para a geração destas distribuições foi utilizado o *software* Microsoft Excel 2013®.

3.2.3.7 Geração aleatória de período de duração do projeto

Este passo tem a função de gerar valores de duração do projeto, para compor o cálculo do VPP. Para este caso foi utilizado a geração aleatória de 5.000 amostras baseadas em distribuição triangular. Para gerar esta distribuição foram informados, similarmente, o valor da moda e os valores máximos e mínimos. Isso foi definido em função da duração proposta do projeto não ser um valor exato, tendo em vista que

esta duração pode ser adiantada ou atrasada em função de diversos fatores tais como zelo na operação e manutenção, qualidade do biogás, entre outros fatores.

Para a geração destas distribuições foi utilizado o *software* Microsoft Excel 2013®.

3.2.3.8 Cálculo do VPP

Este passo tem a finalidade de determinar amostras de VPP, visando compor o cálculo do VPL.

Para determinar o VPP, utiliza-se a equação 3.22.

$$VPP = \left[\frac{FCO_0}{(1 + r_{wacc})^0} + \frac{FCO_1}{(1 + r_{wacc})^1} + \dots + \frac{FCO_p}{(1 + r_{wacc})^p} \right] \quad (3.22)$$

em que,

VPP expressa o Valor Presente do Projeto (R\$);

FCO é Fluxo de caixa incremental referente aos custos operacionais (R\$);

r_{wacc} denota o Custo de capital (%.ano⁻¹);

p é a variável aleatória vida útil do projeto, ou duração do projeto (ano).

A partir da equação 3.22, foram geradas 5.000 amostras aleatórias anuais de VPP. Vale ressaltar que o valor de WACC, também conhecido por CMPC, é o retorno mínimo que uma empresa precisa ter para satisfazer todos os seus investidores, incluindo acionistas e credores (ROSS et al, 2015).

Para a geração destas distribuições foi utilizado o *software* Microsoft Excel 2013®.

3.2.3.9 Cálculo do VPI

Este passo tem a finalidade de determinar amostras de VPI, visando compor o cálculo do VPL.

Para determinar o VPI, utiliza-se a equação 3.23.

$$VPI = \left[\frac{FCI_0}{(1 + r_{wacc})^0} + \frac{FCI_1}{(1 + r_{wacc})^1} + \dots + \frac{FCI_p}{(1 + r_{wacc})^p} \right] \quad (3.23)$$

em que,

FCI é Fluxo de caixa incremental referente aos custos operacionais (R\$)

r_{wacc} denota o Custo de capital (%.ano⁻¹);

p é a variável aleatória vida útil do projeto, ou duração do projeto (ano);

VPI representa o Valor Presente do Investimento (R\$).

A partir da equação 3.23, foram geradas 5.000 amostras aleatórias anuais de VPI. Similarmente, para a geração destas distribuições foi utilizado o *software* Microsoft Excel 2013®.

3.2.3.10 Cálculo do VPL

Para determinar a viabilidade econômica do projeto foi escolhida a ferramenta VPL. Se o VPL é igual a zero, entende-se que os fluxos de caixa do projeto são somente suficientes para pagar o custo do capital investido. Se o VPL for positivo, o projeto gera mais renda que o necessário para cobrir o custo de dívida e a taxa de retorno exigida pelo investidor. Se o VPL é negativo, o projeto é inviável (LEE, 2004).

Para determinar o VPL deve utilizar a seguinte Equação 3.24.

$$VPL = VPP - VPI \quad (3.24)$$

em que,

VPP = Valor Presente do Projeto (R\$);

VPI = Valor Presente do Investimento (R\$);

VPL = Valor Presente Líquido (R\$).

A partir da equação 3.24, foram geradas 5.000 amostras aleatórias anuais de VPL. De posse das 5.000 amostras, foram determinados os valores mínimos e máximos, valor médio, e desvio padrão. Por meio dessas informações, foi elaborado um histograma para representação dos VPLs. Essas amostras foram geradas utilizando *software* Microsoft Excel 2013®.

Para a análise de viabilidade do investimento, optou-se em analisar o VPL médio da amostra. Além disso, por meio do *software* XLSTAT® foi realizada uma análise de *fitting* para encontrar qual a distribuição que mais se parece com estes dados de produção e efetuar comparação com o histograma de produção diária.

Esse item encerra a Etapa 3. Ao concluí-la, é possível obter uma análise probabilística da viabilidade de implantação da Central Geradora de energia Elétrica.

Além do mais, com estas informações é possível realizar estudos probabilísticos de viabilidade para implantação centrais de geração de energia elétrica, determinação de riscos de investimentos, análise de sensibilidade entre outras. Para a geração destas distribuições foi utilizado o *software* Microsoft Excel 2013®.

3.2.4 Etapa 4 – Análise de Risco do Investimento e Sensibilidade

Nesta etapa serão apresentadas as metodologias de análise de risco através das ferramentas *Value at Risk* (VaR) e *Conditional Value at Risk* (CVaR) para graus de confiança de 95%, 99% e 99,9%, bem como a análise de sensibilidade para verificar o quão sensíveis os cálculos de VPL, VaR 95% e CVaR 95% podem ser diante das alterações em hipóteses subjacentes

3.2.4.1 Cálculo do VaR

Este item possui o intuito de descrever como foram determinados os valores de VaR para os graus de confiança “c” de 95%, 99% e 99,9%. Para isto, utilizou-se novamente as tabelas que foram utilizadas para gerar o histograma produzido para análise econômica do VPL do projeto e gráfico de probabilidade acumulada, sendo que serão utilizadas desta tabela as colunas com os valores de corte e probabilidade acumulada. Para determinar o VaR com grau de confiança “c”, analisou-se a tabela de dados que foi utilizada para construir o gráfico de probabilidade acumulada. Com estes dados, verificou-se o valor de VPL que era correspondente a uma probabilidade acumulada de “1-c”. Caso a tabela de probabilidade acumulada não apresente este número exato, deve-se localizar os valores superiores e inferiores mais próximos, e determinar o valor de “1-c” através interpolação. Estas análises foram realizadas utilizando *software* Microsoft Excel 2013®.

3.2.4.2 Cálculo do CvaR

Este item possui o intuito de descrever como foram determinados os valores de CVaR para os graus de confiança “c” de 95%, 99% e 99,9%. Para isto, utilizou-se novamente as tabelas que foram utilizadas para gerar o histograma produzido para análise econômica do VPL do projeto e gráfico de probabilidade acumulada, sendo que serão utilizadas desta tabela as colunas com os valores de corte, probabilidade e

probabilidade acumulada. Para determinar o CVaR com grau de confiança “c”, foram elaborados inicialmente dois somatórios, sendo o primeiro referente ao somatório de valores resultantes do produto entre a probabilidade e os valores de corte, e segundo somatório com os valores de probabilidade. Os limites superiores destes somatórios são encontrados quando a probabilidade acumulada atinge o valor de “1-c”. A partir deste ponto, divide-se o valor primeiro valor do somatório pelo segundo. Estas análises foram realizadas utilizando *software* Microsoft Excel 2013®.

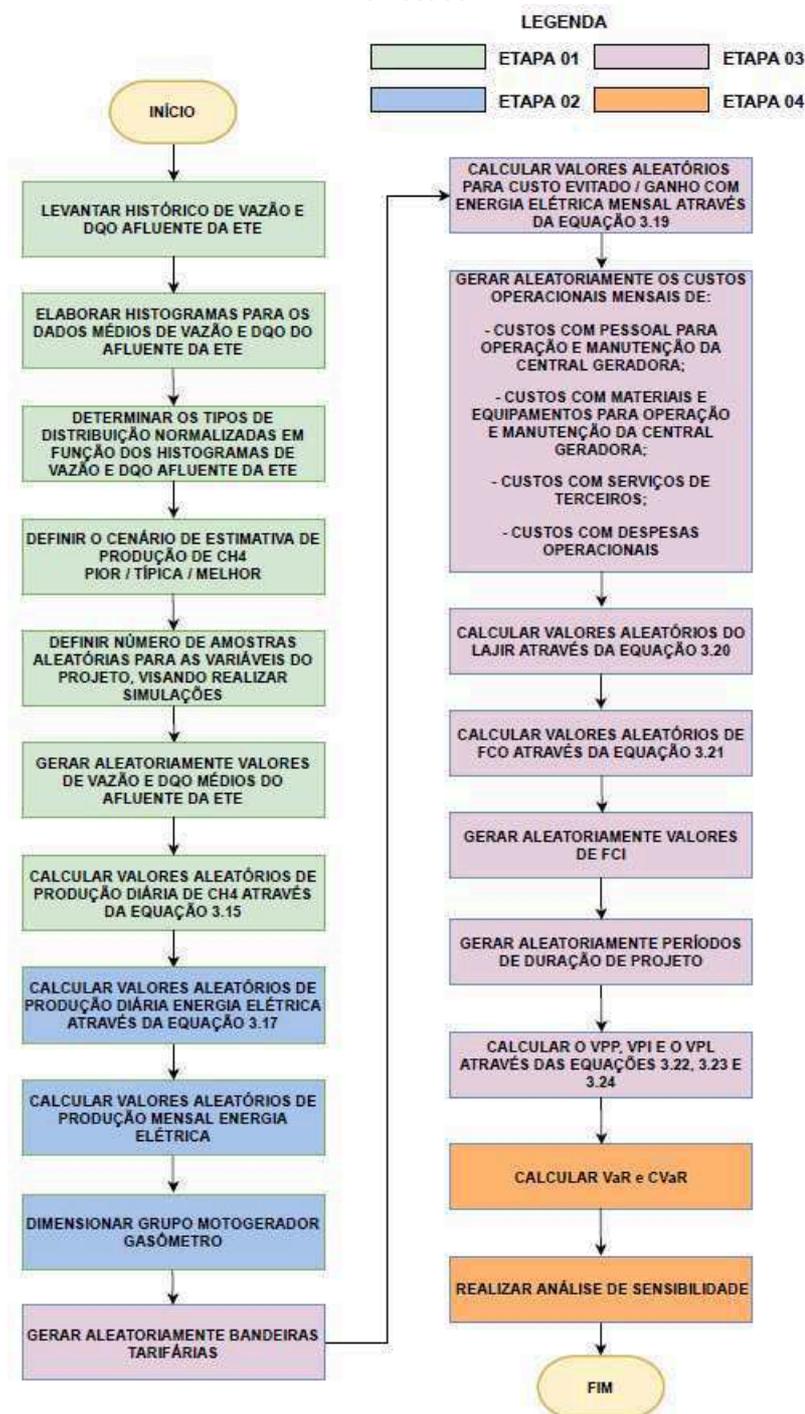
3.2.4.3 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade permite examinar o quão sensível um cálculo específico de VPL pode ser diante das alterações em hipóteses subjacentes. A análise de sensibilidade também é conhecida como análise “e se” ou análise “MOP” (melhor, otimista e pessimista) (ROSS et al, 2015). Desta forma, analisou-se quão sensíveis os cálculos de VPL, VaR 95% e CVaR 95% podem ser em função das alterações dos valores de custos operacionais, tempo de duração do projeto e valores de investimento na central de geração de energia elétrica.

3.2.5 Fluxograma Resumo da Metodologia

A Figura 3.2 representa um fluxograma metodologia de análise de viabilidade técnica-econômica, e do risco de investimento para aplicação em sistema de GD a partir do biogás gerado em Estações de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Doméstico.

Figura 3.2 – Fluxograma da metodologia de análise de viabilidade técnico-econômica, e do risco de investimento para sistemas de GD a partir do biogás gerado em Estações Anaeróbias de Esgoto Doméstico



Fonte: Autoria Própria

3.3 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada para o levantamento dos valores de produção de biogás, energia elétrica, custo evitado de energia elétrica, custos de operação e investimento, bem como análise do VPL, risco do investimento

e análise de sensibilidade. Com estas informações torna-se possível elaborar, a partir do próximo capítulo, um estudo de caso realizando simulações para uma ETE que utiliza processo anaeróbio de tratamento de esgoto doméstico. Através dos resultados das simulações é possível verificar se a ETE possui viabilidade técnica econômica, e qual o risco que o investidor está disposto a correr na implantação deste empreendimento de geração de energia elétrica.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos, frutos da simulação realizada a partir das metodologias apresentadas no capítulo 3. Na sequência, são apresentados na seção 4.1, as características operacionais da ETE considerada no estudo de caso real. Na seção 4.2, baseada na metodologia de análise de viabilidade técnica-econômica descrita no capítulo 3, estão apresentados os resultados das simulações e análise realizadas para a ETE, cujas características são dadas na seção 4.1. Na seção 4.3, baseados nas amostras dos valores de VPL encontrados para a ETE citada na seção 4.1, são apresentados os resultados de análise de risco do investimento, e da análise de sensibilidade para os valores de VPL, VaR 95% e CVaR 95%. Na seção 4.4 é descrita uma análise comparativa dos resultados de produção de CH₄ e energia elétrica, levando-se em conta dois cenários referentes aos valores das grandezas de entrada da função de conversão. Na seção 4.5, seguindo os mesmos critérios de análise das seções 4.2 e 4.3, foram realizadas análises e apresentados os resultados da viabilidade técnica-econômica e do risco de investimento para outras três ETEs.

4.1 DESCRIÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DA ETE ESTUDADA

Para a realização das simulações para a análise de viabilidade técnica-econômica, e de risco de investimento, optou-se em utilizar os dados do processo de tratamento uma ETE, que participou no Projeto Medições de Biogás em Reatores Anaeróbios (BRASIL, 2016). A ETE considerada no estudo de caso foi projetada para o tratamento de esgoto doméstico e está em operação desde o início de 2000. A seguir, serão tratadas as características do seu processo de tratamento, de seu sistema elétrico e de automação, e das suas condições energéticas.

4.1.1 Processo de tratamento e características operacionais da ETE estudada

Neste item é apresentado o processo de tratamento de esgoto desta ETE desde da sua entrada até a devolução do esgoto tratado ao corpo receptor.

4.1.1.1 Fase Líquida – Tratamento preliminar

O tratamento preliminar da fase líquida desta ETE é composto por:

- a) Gradeamento médio: O esgoto encontra este sistema ao chegar a ETE através de tubulação coletora com diâmetro de 1500 mm. Este é constituído de sistema de gradeamento médio com sistema de limpeza manual. Seu objetivo é reter a entrada de partículas sólidas de grandes dimensões (estopas, pedaços de madeira, calçados e etc) na ETE. Estas partículas são depositadas em uma caçamba, para posterior inertização e envio a aterro sanitário;
- b) Estação Elevatória de Esgoto: Após passar pelo sistema de gradeamento médio, o esgoto é encaminhado a estação elevatória que é constituída de três motobombas submersíveis (operação na condição duas operando e uma reserva). Esta estação elevatória tem a função de recalcar de esgoto bruto para ganho de cota, visando a distribuição do esgoto por gravidade para as demais unidades do sistema de tratamento da ETE;
- c) Gradeamento fino: Após ganhar cota, o esgoto é encaminhado a um sistema de gradeamento fino mecanizado automático. Seu objetivo é reter a entrada de partículas de pequeno porte na ETE. Estas partículas recebem a mesma destinação das partículas retidas no gradeamento grosso.

4.1.1.2 Fase Líquida – Tratamento primário

O tratamento primário da fase líquida desta ETE é composto por:

- a) Desarenação: Após o gradeamento fino, é importante que partículas que passaram, como areia e pequenas pedras, sejam eliminadas do processo de tratamento, pois o prejudicam. Para isto, é utilizado um desarenador mecânico que utiliza o processo de decantação para eliminar estas partículas. Para a retirada deste material particulado é utilizada uma rosca parafuso.
- b) Medição de Vazão do Afluente da ETE: O esgoto após passar pelo sistema de desarenação é encaminhado para medição de vazão. Esta medição é realizada através de um medidor de vazão ultrassônico instalado em uma Calha Parshall. Esta medição é importante, pois através dos dados coletados é possível operar a estação de uma forma melhor, criar um banco de dados para análise de performance, propor melhorias operacionais e otimização a operação da planta.

4.1.1.3 Fase Líquida – Tratamento secundário

O tratamento secundário da fase líquida desta ETE é composto por:

- a) RALF: Após o tratamento primário, o esgoto é conduzido através da gravidade para seis RALFs com capacidade de tratamento médio de 70 l/s e máximo de 100 l/s, totalizando uma vazão total média de 420 l/s e total de 660 l/s.
- b) Lagoas aeradas: Visando complementar o tratamento, através de um sistema de polimento, o efluente dos RALFs é encaminhado para duas lagoas de aeradas com dimensões de 271,5 (comprimento) x 81,0 (largura) x 4,26m (profundidade).

Após isto o esgoto tratado é destinado para o Corpo Receptor.

4.1.1.4 Fase Sólida – Desidratação de lodo

O sistema de desidratação do lodo desta ETE é constituído pelos seguintes equipamentos:

- a) adensador por gravidade: Tem a função de receber o lodo proveniente das dos RALFs visando jogá-lo mais denso e com uma maior concentração de sólidos. Esta etapa visa auxiliar o processo de desidratação mecânica do lodo;
- b) Desidratação mecânica: Este processo tem o objetivo de reduzir a concentração de umidade do lodo visando redução de volume e destinação. Para o caso desta ETE, são utilizadas centrífugas. O volume de líquido descartado por este equipamento volta a entrada da ETE através de bombas. O lodo desidratado recebe cal para inertização dos contaminantes e é encaminhado através de rosca transportadora para o pátio de cura.

4.1.1.5 Fase gasosa – Queima do biogás

O sistema de destinação do biogás gerado na ETE através do processo de tratamento anaeróbio do esgoto é realizado pelo seguinte equipamento:

- a) Sistema de coleta de biogás: Cada RALF possui tubulações responsáveis pela coleta do biogás gerado em seu interior, bem como válvulas de segurança e outros acessórios;

- b) Queimador de biogás: O queimador de biogás tem objetivo de efetuar a queima completa do biogás gerado pelos RALFs. Este queimador geralmente é constituído de aço inox e possui sistema de ignição automática controlado através de um temporizador que tem a função de gerar faíscas e efetuar a ignição automática do biogás, caso a chama se apague.

Além unidades de tratamento acima citadas, encontra-se nesta ETE uma edificação que tem o objetivo de abrigar um laboratório de análises, sala do sistema de supervisão e controle, almoxarifado, vestiário e banheiros.

4.1.2 Sistema elétrico e de automação da ETE

O sistema elétrico e de automação da ETE é composto pelos seguintes equipamentos:

4.1.2.1 Entrada de energia

A entrada de energia desta ETE é composta por uma cabine compacta e blindada de AT, onde estão presentes os módulos de medição da concessionária local de energia elétrica, sistemas de medição e proteção (TPs, TCs, Relés e etc), e disjuntor geral de AT.

4.1.2.2 Rede interna de distribuição de energia

A rede de interna de distribuição de energia elétrica é isolada para a tensão de 15kV é composta por rede compacta. Nesta rede compacta encontram-se transformadores instalados em postes ou sobre uma base de concreto que são responsáveis pela alimentação das cargas desta ETE.

4.1.2.3 Transformadores

Os transformadores instalados são responsáveis pela alimentação dos seguintes setores:

- a) Transformador 01 – 300 kVA – Sistema de desinfecção com luz ultravioleta e aeração da lagoa 02;

- b) Transformador 02– 225 kVA – Tratamento secundário, laboratório, estação elevatória de lodo, e sistema de desidratação de lodo;
- c) Transformador 03 – 150 kVA – Tratamento preliminar e primário;
- d) Transformador 04 – 225 kVA – Sistema de aeração da lagoa 01.

4.1.2.4 Sistema de supervisão e controle (SSC)

O SSC é composto por instrumentos de medição, estação de supervisão e controle, quadros de automação com CPs e rede industrial de automação. Os quadros de automação contêm CPs responsáveis pelos seguintes setores:

- a) CP 01 – Tratamento preliminar e primário;
- b) Módulos de I/Os – Sistema de adensamento de lodo
- c) CP02 – Sistema de desidratação de lodo;
- d) CP03 – Sistema de controle da aeração das lagoas;
- e) CP04 – Sistema de controle de dosagem de cal

Todos estes CP estão interligados e operam utilizando o protocolo de comunicação ModBus TCP/IP. Toda a instrumentação desta ETE está ligada a estes CPs.

O supervisor responsável pelo sistema de supervisão e controle utilizado é o iFIX da General Electric. Ele é responsável pelo processo de tratamento da ETE, bem como realiza o controle e monitoramento a distância das ETEs instaladas em outros pontos da cidade e pertencentes a bacia hidrográfica desta ETE.

4.1.3 Dados energéticos da ETE

A ETE é atendida na tensão de 13,8 kV e é enquadrada no grupo A4 (2,3 a 25 kV) destinado a consumidores responsáveis pelos serviços de água, esgoto e saneamento. Esta opção tem um desconto de 15% nos valores de demanda e consumo. A opção de modalidade tarifária utilizada na estação é a horária azul.

A demanda contratada no horário de ponta e fora deste nesta ETE, nos últimos três anos, variou de 450 a 500 kW. O consumo médio mensal fora da ponta nos últimos três anos foi de 230.268 kWh. O consumo médio mensal na ponta nos últimos três anos foi de 23.069 kWh.

4.2 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA

Visando aplicar a metodologia de análise de viabilidade técnica-econômica, proposta no capítulo 3, foram realizadas simulações com os dados da ETE, cujas características estão citadas na seção 4.1. Os resultados destas análises e simulações estão descritos a seguir.

4.2.1 Etapa 1 – Produção de CH₄

4.2.1.1 Levantamento do histórico de vazão e DQO médios do afluente da ETE

Nas Tabelas 4.1 e 4.2 foram apresentados os resumos do levantamento dos históricos de medição de vazão e DQO médios do afluente da ETE. Houve diferença nas quantidades das amostras em função de falhas nos instrumentos durante a campanha de medições.

Tabela 4.1 – Resumo dos parâmetros estatísticos da série da vazão de afluente
Fonte: Autoria Própria

Vazão Média Afluente	ETE 1
Vazão Mínima (l/s)	181,85
Vazão Máxima (l/s)	506,11
Vazão Média (l/s)	371,93
Tamanho da amostra	409,00
Classes	20,00
Desvio Padrão (l/s)	55,00
Beta (%)	0,731

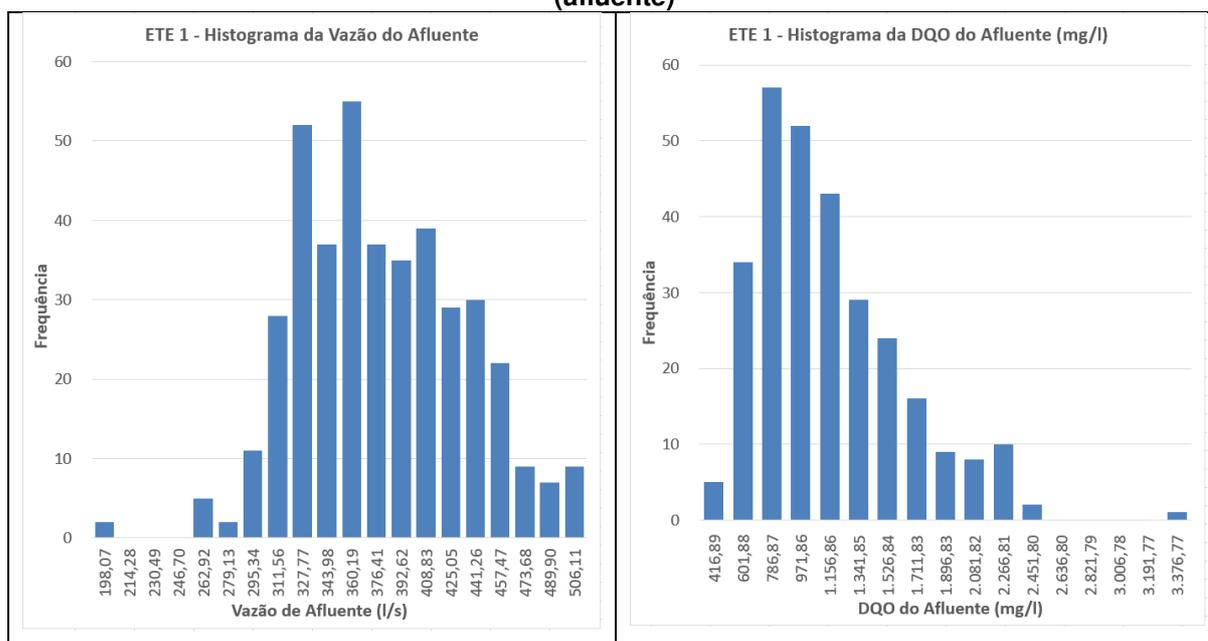
Tabela 4.2 – Resumo dos parâmetros estatísticos da série do DQO do afluente
Fonte: Autoria Própria

DQO Média Afluente	ETE 1
DQO Mínima (mg/l)	231,90
DQO Máxima (mg/l)	3376,77
DQO Média (mg/l)	1061,16
Tamanho da amostra (n)	290,00
Classes	17,00
Desvio Padrão (mg/l)	470,24
Beta (%)	2,602

4.2.1.2 Elaboração de histogramas para os dados médios de vazão e DQO do afluente da ETE

Por meio dos dados de vazão e DQO médios do afluente da ETE, foi possível elaborar os histogramas de frequência para estes dados. Na figura 4.1 estão representados esses histogramas.

Figura 4.1 – Distribuição de Probabilidade dos dados de Vazão de Esgoto (afluente) e DQO (afluente)



Fonte: Autoria Própria

Vale ressaltar que os valores de DQO do Afluente acima de 1500 mg/l podem ser frutos de erro no sistema de medição. Porém, visando ser conservador na análise, considerou-se estes valores para este estudo.

4.2.1.3 Determinação dos tipos de distribuições normalizadas dos histogramas de vazão e DQO médios

De posse das características e dos histogramas referentes aos dados de vazão e DQO afluente da ETE, foram realizadas análises de *fitting* destes histogramas, visando encontrar quais as distribuições normalizadas que mais se assemelham a elas. Esta análise foi realizada com o apoio do *software* XLSTAT®.

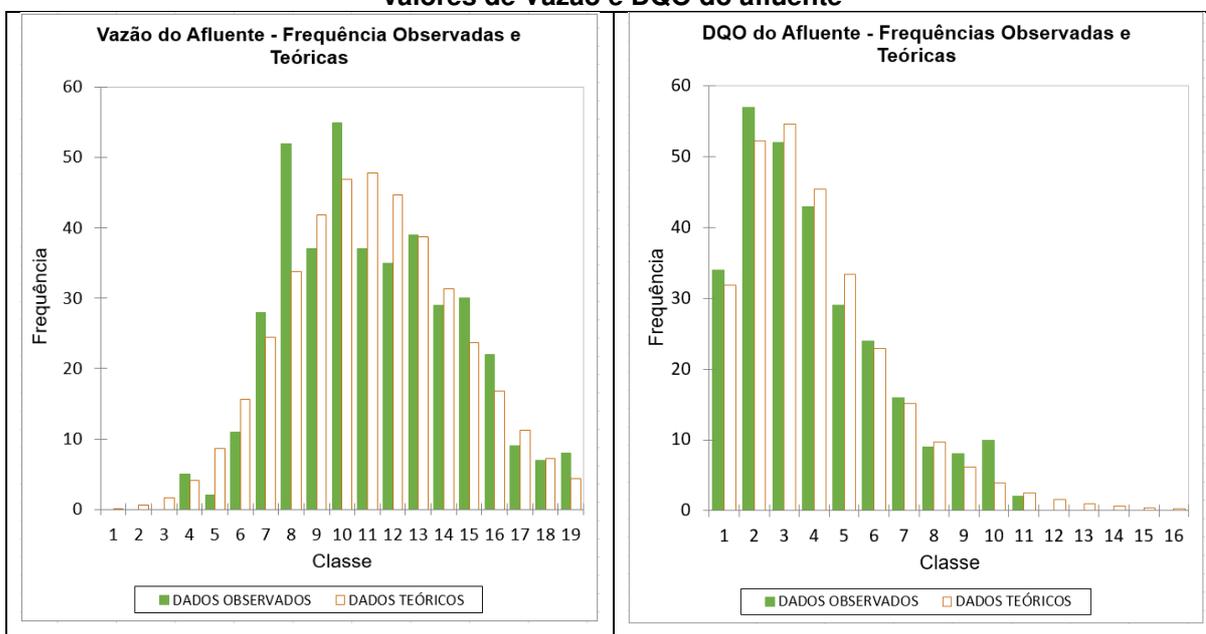
Como resultado destas simulações, foram gerados gráficos que representam em histogramas as frequências observadas e teóricas (Figura 4.2), função de

densidade de probabilidade (Figura 4.3) e função de densidade acumulada (Figura 4.4).

Para os dados de vazão afluente foi determinado que o histograma tem características similares a distribuição Gama, onde o parâmetro de forma (k) é 44,902 e o parâmetro de escala (θ) é 8,283.

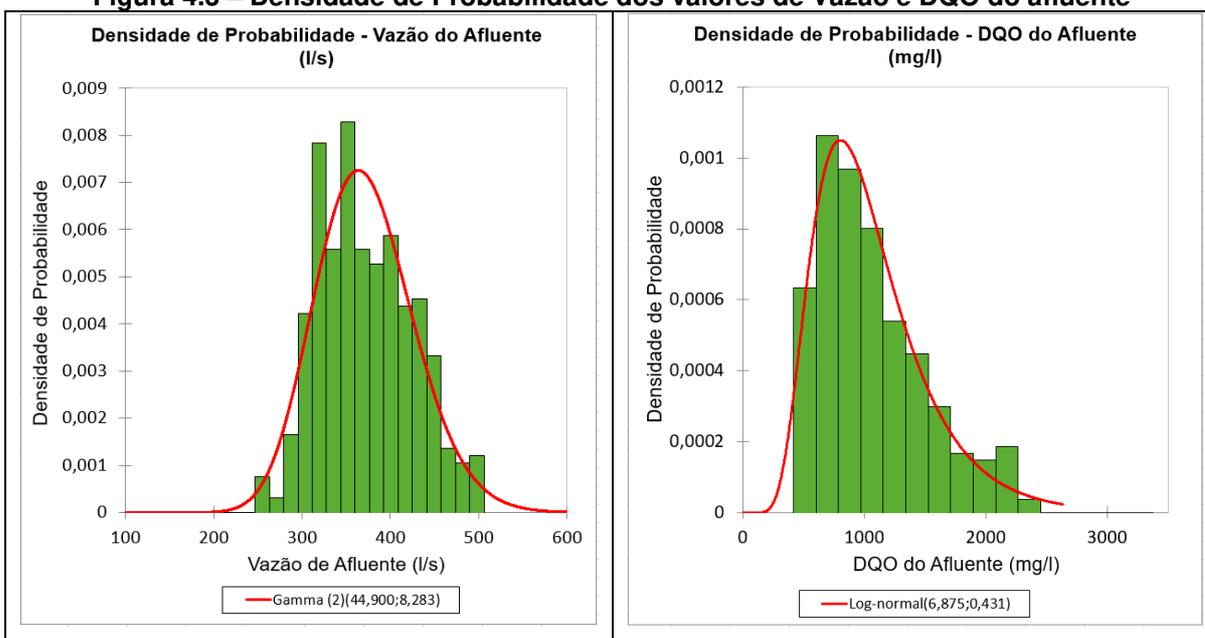
Para os dados de DQO foi determinado que o histograma tem características similares a distribuição Lognormal, onde o parâmetro de média populacional (μ) é 6,875 e o parâmetro de desvio padrão populacional (σ) é 0,431.

Figura 4.2 – Comparativo entre Frequências Observadas e Teóricas de probabilidade dos valores de Vazão e DQO do afluente



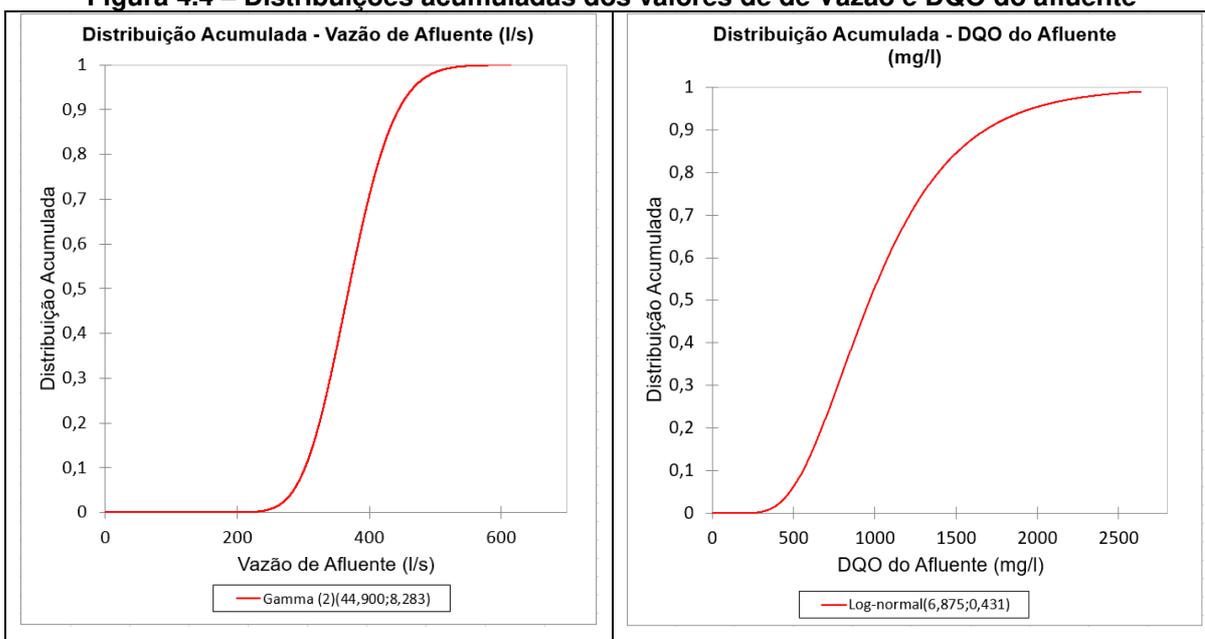
Fonte: Autoria Própria

Figura 4.3 – Densidade de Probabilidade dos valores de Vazão e DQO do afluente



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.4 – Distribuições acumuladas dos valores de de Vazão e DQO do afluente



Fonte: Autoria Própria

4.2.1.4 Definição dos cenários de produção de CH₄

Considerando que este estudo tem por objetivo determinar valores em risco do investimento, optou-se, de forma conservadora, pela utilização dos dados do cenário “Pior”, que apresenta as menores produções de CH₄.

4.2.1.5 Definição do número de amostras aleatórias para as variáveis do projeto visando realização de simulações

Apresenta-se na Tabela 4.3 a quantidade de variáveis aleatórias que devem ser geradas visando a realização das análises.

Tabela 4.3 – Resumo dos tipos de variáveis e suas quantidades de amostras aleatoriamente geradas
Fonte: Autoria Própria

Variável	Quantidade de amostras
Vazão Média do afluente (l/s)	1.800.000
DQO média do afluente (mg/l)	1.800.000
Produção diária de CH ₄ (Nm ³ /d)	1.800.000
Produção diária de energia elétrica (kWh/d)	1.800.000
Produção mensal de energia elétrica (kWh/d)	60.000
Custo Evitado / Ganho com geração de energia elétrica (kWh/mês)	60.000
Bandeiras Tarifárias	60.000
Custos Operacionais (R\$/mês)	60.000
Duração do Projeto (anos)	5.000
LAJIR mensal (R\$)	60.000
LAJIR anual (R\$)	5.000
FCO (R\$)	5.000
FCI (R\$)	5.000
VPP (R\$)	5.000
VPI (R\$)	5.000
VPL (R\$)	5.000

4.2.1.6 Geração aleatória dos valores médios de vazão e DQO do afluente

A geração destes dados aleatórios foi baseada nos parâmetros de distribuição de probabilidade dos valores médios de vazão (distribuição gama) e DQO (distribuição lognormal) citadas no item 4.2.1.3, e nas outras variáveis que compõem o cenário “Pior”. Para as variáveis deste cenário, foram gerados dados aleatórios baseados em distribuições normais (uma para cada variável), onde os parâmetros de média (μ) foram baseados no valor “Pior” de cada variável, e o desvio padrão (σ) é baseado em $\frac{1}{4}$ da diferença entre os valores de cada cenário.

Para o caso desta ETE, são apresentados nas tabelas 4.4 e 4.5 os 1.800.000 resultados dos valores de vazão e DQO médios gerados.

Tabela 4.4 – Resumo dos parâmetros estatísticos da geração aleatória dos valores médios de vazão do afluente

Fonte: Autoria Própria

Vazão Média Afluente	ETE 1
Vazão Mínima (l/s)	157,24
Vazão Máxima (l/s)	717,45
Vazão Média (l/s)	371,87
Tamanho da amostra	1.800.000
Classes	1342
Desvio Padrão (l/s)	55,52
Beta (%)	0,011

Tabela 4.5 – Resumo dos parâmetros estatísticos da geração aleatória dos valores médios de DQO do afluente

Fonte: Autoria Própria

DQO Média Afluente	ETE 1
DQO Mínima (mg/l)	115,00
DQO Máxima (mg/l)	7882,00
DQO Média (mg/l)	1057,22
Tamanho da amostra	1.800.000
Classes	1342
Desvio Padrão (mg/l)	478,23
Beta (%)	0,034

4.2.1.7 Estimação de valores aleatórios de produção diária de CH₄

Através da função de conversão foram estimados 1.800.000 valores aleatórios de produção diária de CH₄, em função dos dados de entrada (vazão e DQO médios do afluente, e variáveis do cenário “Pior”) gerados aleatoriamente e informados no item 4.2.1.6

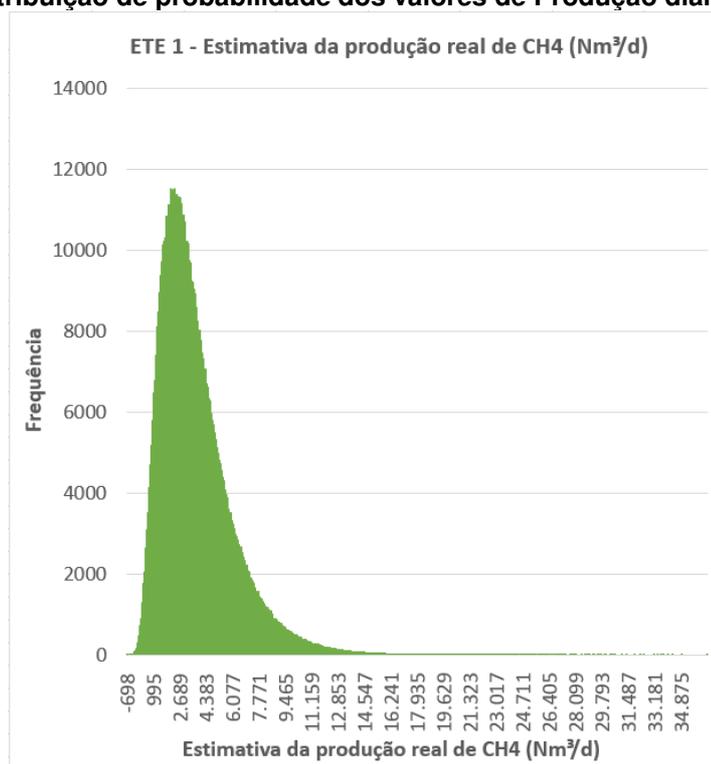
Tabela 4.6 – Resumo dos parâmetros estatísticos resultado dos cálculos aleatórios de produção diária CH₄ – 1.800.000 amostras

Fonte: Autoria Própria

Dados produção diária de CH₄	ETE 1
Produção Mínima CH ₄ (Nm ³ /d)	-726,26
Produção Máxima CH ₄ (Nm ³ /d)	36.541,29
Produção Média CH ₄ (Nm ³ /d)	3.681,36
Tamanho da Amostra (n)	1.800.000,00
Desvio Padrão (Nm ³ /d)	2.373,27
Beta (%)	0,048

Por meio destes dados foi possível construir um histograma de frequência para os dados de produção diária de CH₄, conforme Figura 4.5.

Figura 4.5 - Distribuição de probabilidade dos valores de Produção diária de CH₄ (Nm³/d)



Fonte: Autoria Própria

Com isso, realizou-se uma análise de *fitting* para encontrar qual a distribuição que mais se parecia com estes dados de produção. Na primeira tentativa, foram utilizadas 1.800.000 amostras, porém o *software* XLSTAT® não conseguiu determinar o seu tipo. Por essa razão, realizou-se diversas simulações posteriores, variando-se o número de amostras, até que com 5.000 amostras, o *software* encontrou a distribuição que mais se assemelhava aos dados de produção determinados.

Observa-se na Tabela 4.6 e na Figura 4.5 valores negativos de produção de biogás. Isso é motivado pelos valores das perdas de biogás durante o processo de tratamento do esgoto serem maiores que os valores de produção real de CH₄ disponível para a recuperação de energia. Isso ocorreu devido a utilização de dados amostrados de vazão e concentração de DQO no afluente gerados a partir distribuições gama e lognormal, que se encontravam nas suas caudas. Visando tornar o estudo conservador e fiel aos dados encontrados, optou-se em manter os valores negativos de produção de CH₄.

Na tabela 4.7 estão representados os 5.000 resultados dos cálculos aleatórios de produção diária de CH₄.

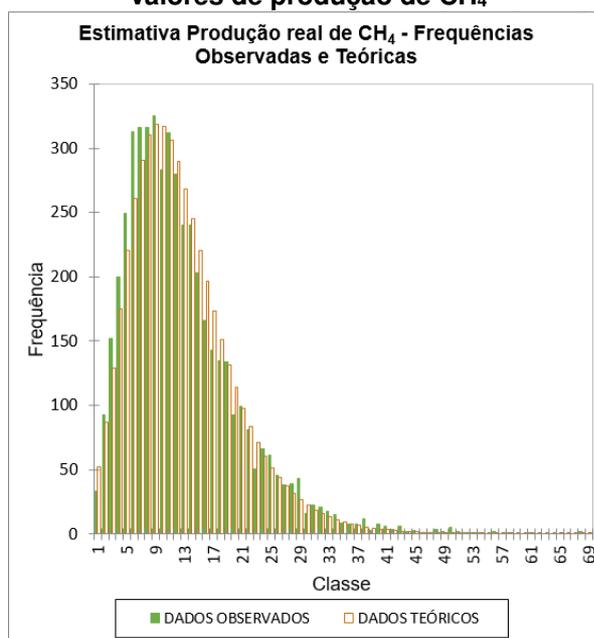
Tabela 4.7 – Resumo dos parâmetros estatísticos resultado dos cálculos aleatórios de produção diária CH₄ – 5.000 amostras

Fonte: Autoria Própria

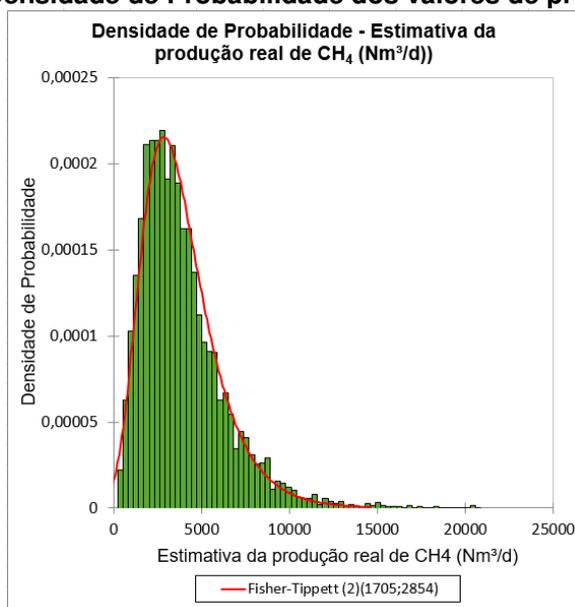
Dados produção diária de CH ₄	ETE 1
Produção Mínima CH ₄ (Nm ³ /d)	-299,89
Produção Máxima CH ₄ (Nm ³ /d)	20729,10
Produção Média CH ₄ (Nm ³ /d)	3780,88
Tamanho da Amostra (n)	5.000
Desvio Padrão (Nm ³ /d)	2411,02
Beta (%)	0,902

Como resultado desta simulação, elaboraram-se gráficos que representam em histogramas as frequências observadas e teóricas (Figura 4.6), função de densidade de probabilidade (Figura 4.7) e função de densidade acumulada (Figura 4.8).

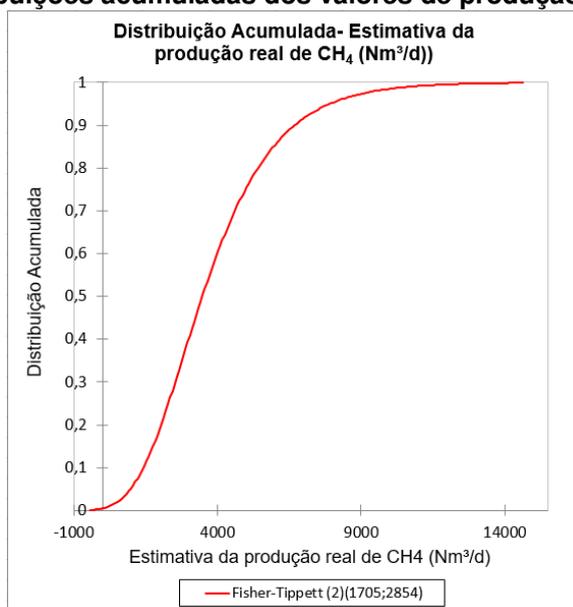
Figura 4.6 – Comparativo entre Frequências Observadas e Teóricas de probabilidade dos valores de produção de CH₄



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.7 – Densidade de Probabilidade dos valores de produção de CH₄

Fonte: Autoria Própria

Figura 4.8 – Distribuições acumuladas dos valores de produção de energia elétrica

Fonte: Autoria Própria

Para os dados de produção diária de CH₄ foi determinado que o histograma frequência tem características similares a distribuição de Fischer-Tippett, onde os parâmetros desta distribuição para a produção de CH₄ são ϵ : 1.699,570 e μ : 2748,337.

4.2.2 Etapa 2 – Produção de Energia Elétrica

4.2.2.1 Estimação de valores aleatórios de produção diária de energia elétrica

No processo de conversão da energia química contida no CH₄ para energia elétrica há diversas perdas. Por esta razão, foi necessário estimar as amostras de energia elétrica considerando-as. Para esta estimativa foram utilizadas 1.800.000 amostras de produção diária de energia elétrica, conforme apresentada na tabela 4.8.

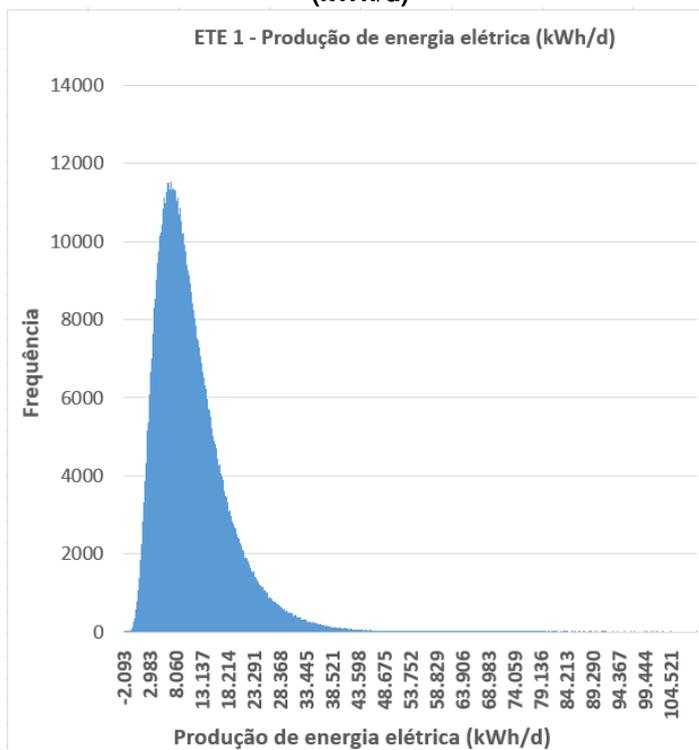
Tabela 4.8 – Resumo dos parâmetros estatísticos resultado dos cálculos aleatórios de produção diária energia elétrica – 1.800.000 amostras
Fonte: Autoria Própria

Dados produção diária de Energia Elétrica	ETE 1
Produção Mínima (kWh/d)	-2.176,60
Produção Máxima ((kWh/d)	109.514,26
Produção Média (kWh/d)	11.033,02
Tamanho da Amostra (n)	1.800.000,00
Desvio Padrão (kWh/d)	7.112,68
Beta (%)	0,048

Vale ressaltar que os valores negativos de produção de energia são resultados dos valores negativos de produção de CH₄ citados no item 4.2.1.7.

Através destes dados foi possível construir um histograma de frequência para os dados de produção diária de energia elétrica, conforme Figura 4.9.

Figura 4.9 - Distribuição de probabilidade dos valores de Produção diária de energia elétrica (kWh/d)



Fonte: Autoria Própria

Com isso, foi realizada uma análise de *fitting* para encontrar qual a distribuição que mais se parecia com estes dados de produção. Na primeira tentativa, foram utilizadas 1.800.000 amostras, porém o *software* XLSTAT® não conseguiu determinar o seu tipo. Por esta razão, realizou-se diversas simulações posteriores, variando-se o número de amostras, até que com 5.000 amostras, o *software* encontrou a distribuição que mais se assemelhava aos dados de produção determinados.

Na tabela 4.9 estão representados os 5.000 resultados dos cálculos aleatórios de produção diária de energia elétrica.

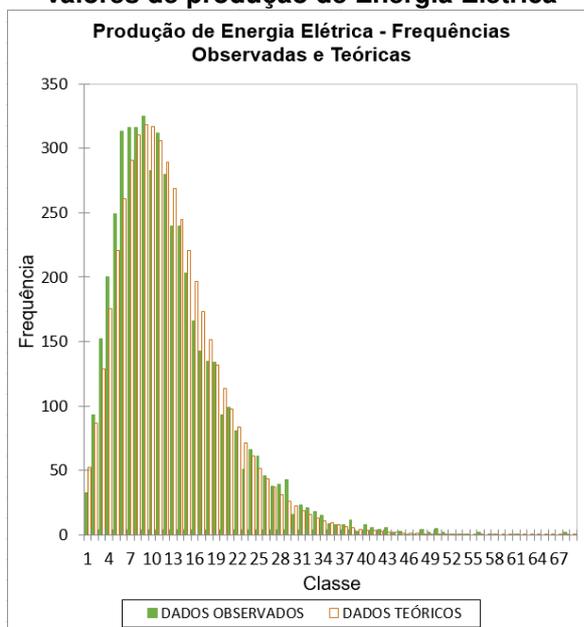
Tabela 4.9 – Resumo dos parâmetros estatísticos resultado dos cálculos aleatórios de produção diária energia elétrica – 5.000 amostras

Fonte: Autoria Própria

Dados produção diária de Energia Elétrica	ETE 1
Produção Mínima (kWh/d)	-898,78
Produção Máxima (kWh/d)	62.125,13
Produção Média (kWh/d)	11.331,29
Tamanho da Amostra (n)	5.000
Desvio Padrão (kWh/d)	7.225,82
Beta (%)	0,902

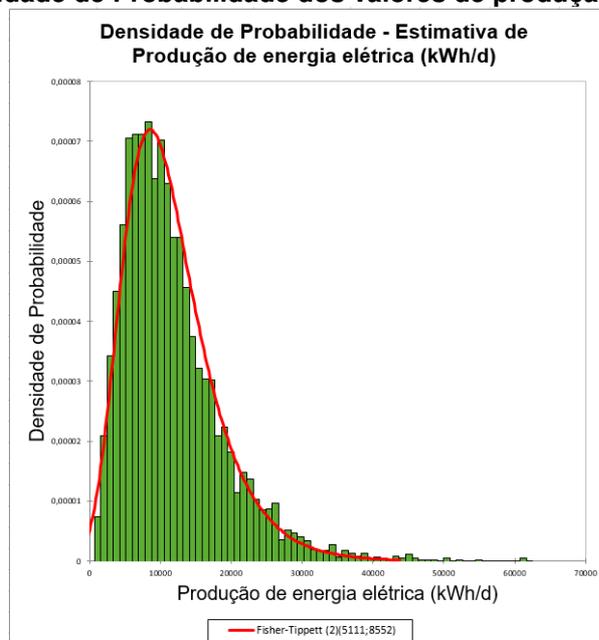
Como resultado desta simulação, foram gerados gráficos que representam em histogramas as frequências observadas e teóricas (Figura 4.10), função de densidade de probabilidade (Figura 4.11) e função de densidade acumulada (Figura 4.12).

Figura 4.10 – Comparativo entre Frequências Observadas e Teóricas de probabilidade dos valores de produção de Energia Elétrica

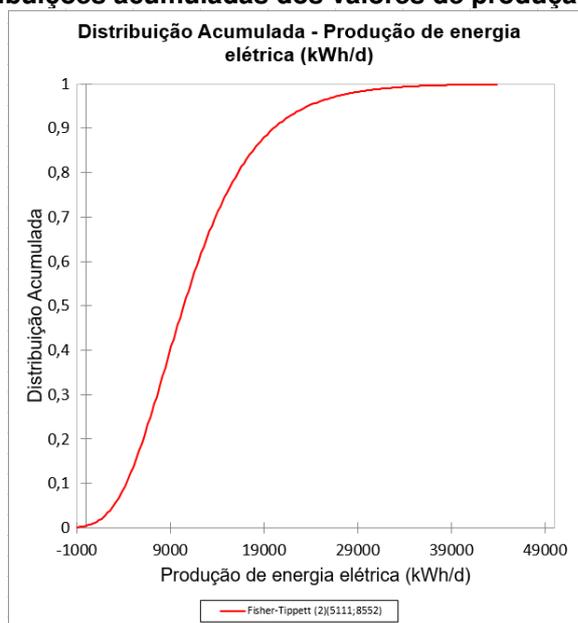


Fonte: Autoria Própria

Figura 4.11 – Densidade de Probabilidade dos valores de produção de Energia Elétrica



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.12 – Distribuições acumuladas dos valores de produção de energia elétrica

Fonte: Autoria Própria

Para os dados de produção diária de Energia Elétrica foi determinado que o histograma frequência tem características similares a distribuição de Fischer-Tippett, onde os parâmetros desta distribuição para a produção de Energia Elétrica são ϵ : 5.093,572 e μ : 8.236,473.

4.2.2.2 Cálculo de valores aleatórios de produção mensal de energia elétrica

Com 1.800.000 amostras diárias de produção de energia, foi necessário determinar a produção mensal de energia elétrica (60.000 amostras), tendo em vista que este item subsidia o cálculo de custo evitado / ganho com a geração de energia elétrica.

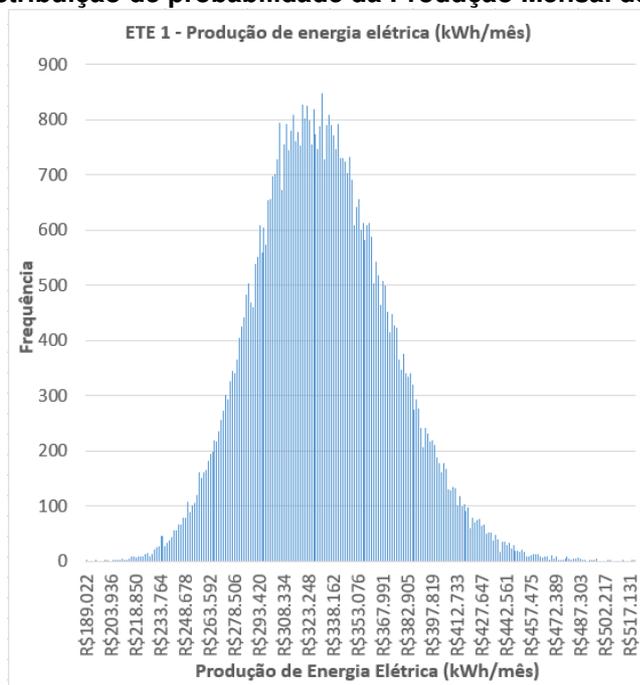
O comportamento da produção de energia elétrica em 30 dias está representado na Tabela 4.10.

Tabela 4.10 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série de produção de energia elétrica
Fonte: Autoria Própria

Produção de energia Elétrica (kWh/mês)	ETE 1
Mínimo (kWh/mês)	187.666,33
Máximo (kWh/mês)	519.842,46
Média (kWh/mês)	330.990,64
Tamanho da Amostra	60.000
Classes	245
Desvio Padrão (kWh/mês)	40.623,42
Beta (%)	0,050

Através destes dados foi possível construir um histograma de frequência para os dados de produção mensal de energia elétrica, conforme Figura 4.13.

Figura 4.13 - Distribuição de probabilidade da Produção Mensal de Energia Elétrica



Fonte: Autoria Própria

De posse das características e dos histogramas referentes aos resultados de produção mensal de energia elétrica encontrados nesta simulação, foram realizadas análises de *fitting* destes histogramas, visando encontrar quais as distribuições que mais se assemelham a elas. Esta análise foi realizada com o apoio do *software* XLSTAT®.

Para os dados de produção mensal de energia elétrica foi determinado que os histogramas têm características similares a distribuição de Lognormal, onde os parâmetros desta distribuição para a produção mensal de energia elétrica são μ (média): 12,702, σ (desvio padrão): 0,123.

Pode-se observar uma grande diferença nos formatos dos histogramas de produção diária e mensal de energia elétrica. Isto é resultado do agrupamento dos valores diários de trinta e trinta conjuntos para determinar a produção mensal de energia elétrica.

4.2.3 Dimensionamento do Grupo Moto Gerador e Gasômetro

Para determinar potência do conjunto gerador do gasômetro, baseado nos gráficos acima, escolheu-se o seguinte cenário:

- Amostragem dos dados de Vazão: Baseado em Distribuição Gama;
- Amostragem dos dados DQO: Baseado em Distribuição Lognormal;
- Amostragem das demais variáveis: Baseado em Distribuição Normal;

Os dados para o dimensionamento do Gerador de Energia Elétrica e do Gasômetro foram:

- Produção de CH₄ – Média: 3.886,70 Nm³/d;
- Produção de CH₄ – Desvio Padrão: 2400,32 Nm³/d;
- Produção de Energia Elétrica – Média: 11.647,78 kWh;
- Produção de Energia Elétrica – Desvio Padrão: 7.193,75 kWh.

Conforme Brasil (2016, pg. 68 e pg. 75), para o dimensionamento do gasômetro foi adotado o critério de 30% do volume diário de biogás gerado. Em função disso, para este estudo foi utilizado a vazão média diária de 3.886,70 Nm³/d. O volume do gasômetro a ser utilizado neste caso, aproximadamente deve ser de no mínimo de 1200 Nm³/d.

Para o dimensionamento do grupo gerador foi utilizado o valor médio diário de produção de energia elétrica de 11.647,78 kWh. Em função deste valor diário, o valor de potência do gerador de energia elétrica foi determinado através da divisão da produção média de energia elétrica pelo número de horas do dia. Em função disto, foi determinado um gerador de energia com uma potência de aproximadamente 500 kW.

Em função dessas informações é necessário que esta ETE esteja no Subgrupo A4 – Saneamento. Sugere-se que modalidade tarifária seja a horária Verde. Esta central elétrica pode ser classificada como Minigeração Distribuída, em função da potência da central geradora ser maior que 75 kW e menor de 5 MW. Em função do Sistema de Compensação de Energia, seu excedente de produção pode ser utilizado para compensar a energia consumida em meses subsequentes, ou ser utilizado para compensação em outra unidade da Companhia de Saneamento responsável por essa ETE.

4.2.4 Etapa 3 – Análise de viabilidade técnica-econômica através da ferramenta VPL

4.2.4.1 Geração aleatória de bandeira tarifária

Em função das condições apresentadas no item 3.2.3.1, elaboram-se 60.000 amostras para serem utilizadas na determinação dos valores de custo evitado / ganho com geração de energia elétrica

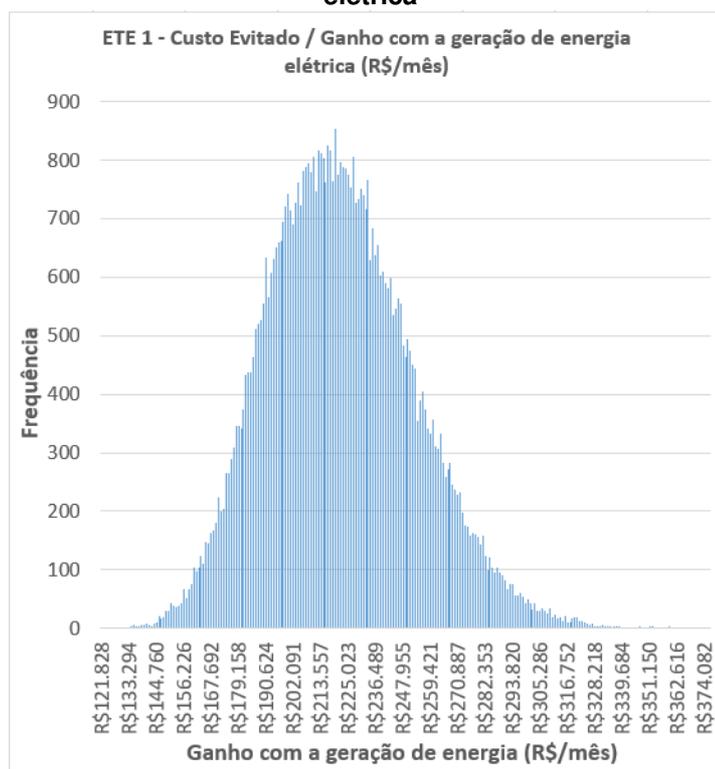
4.2.4.2 Cálculo de valores aleatórios para Custo Evitado / Ganho com energia elétrica mensal

A metodologia para este cálculo atendeu os requisitos descritos no item 3.2.3.2. O comportamento dos dados dos custos evitados/ganho com a geração de energia elétrica em 30 dias está representado na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série de custo evitado / ganho com geração de energia elétrica
Fonte: Autoria Própria

Custo evitado/Ganho com a geração de Energia Elétrica Mensal (R\$/mês)	ETE 1
Mínimo (R\$/mês)	120.785,33
Máximo (R\$/mês)	376.167,10
Média (R\$/mês)	22.272,88
Tamanho da Amostra	60.000
Classes	245
Desvio Padrão (R\$/mês)	30.835,72
Beta (%)	0,057

Figura 4.14 - Distribuição de probabilidade de Custo Evitado / Ganho com a geração de energia elétrica



Fonte: Autoria Própria

De posse das características e dos histogramas referentes aos resultados de produção mensal de energia elétrica encontrados nesta simulação, foram realizadas análises de *fitting* destes histogramas, visando encontrar quais as distribuições que mais se assemelham a elas. Essa análise foi realizada com o apoio do *software* XLSTAT®.

Para os dados de produção mensal de Custo Evitado / Ganho com a geração de energia elétrica foi determinado que o histograma tem características similares a distribuição de Lognormal, onde os parâmetros para o custo evitado / ganho mensal com geração de energia elétrica são μ (média): 12,297, σ (desvio padrão): 0,139.

Apesar dos dados de produção mensal de energia elétrica e custo evitado / ganho com geração de energia elétrica serem proporcionais e apresentarem a características de distribuição normalizada (Lognormal), houve uma variação entre seus valores de Beta, devido a influência da variação aleatória de bandeiras tarifária no cálculo do importe de consumo.

4.2.4.3 Geração aleatória de Custos Operacionais mensais

Este item tem o objetivo de descrever como foi realizada geração aleatória dos custos operacionais mensais para a central de geração de energia elétrica, visando auxiliar os cálculos do LAJIR mensal.

As variáveis estão representadas na seguinte na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 – Resumo das distribuições de probabilidade e parâmetros estatísticos das variáveis aleatórias dos custos operacionais mensais

Variável Aleatória	Distribuição de Probabilidade da Variável	Parâmetros Estatísticos da Distribuição
Custos com Pessoal – Mão-de-Obra para Operação e Manutenção do Sistema	Triangular	Valor Mínimo = R\$ 4.000/mês Moda = R\$ 5.000/mês Valor máximo = R\$ 6.000/mês
Material para Operação e Manutenção do Sistema	Triangular	Valor Mínimo = R\$ 2.000/mês Moda = R\$ 3.000/mês Valor máximo = R\$ 4.000/mês
Serviços de Terceiros	Triangular	Valor Mínimo = R\$ 4.000/mês Moda = R\$ 6.000/mês Valor máximo = R\$ 8.000/mês
Despesas Operacionais	Triangular	Valor Mínimo = R\$ 2.000/mês Moda = R\$ 3.000/mês Valor máximo = R\$ 4.000/mês

A justificativa da utilização da distribuição triangular está citada no item 3.2.3.3.

Os valores citados na Tabela 4.12 são resultados de pesquisas de preços realizados a uma empresa de saneamento de grande porte e a fabricantes de conjunto moto geradores.

4.2.4.4 Cálculo de valores aleatórios do LAJIR mensal e anual

Esse passo tem como objetivo determinar amostras dos valores de LAJIR para o período mensal (60.000 amostras) e para o período anual (5.000 amostras), a fim de subsidiar a determinação do Fluxo de Caixa Operacional (FCO) do projeto para o período de doze meses.

Na Tabela 4.13 estão representados os valores do LAJIR Mensal e Anual

Tabela 4.13 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série dos valores de LAJIR mensal e anual

Fonte: Autoria Própria

Parâmetros	LAJIR Mensal ETE 1	LAJIR Anual ETE 1
Mínimo	R\$ 120.785,33.mês ⁻¹	R\$ 2.194.880,55.ano ⁻¹
Máximo	R\$ 376.167,10.mês ⁻¹	R\$.213.923,79.ano ⁻¹
Média	R\$ 22.272,88.mês ⁻¹	R\$ 2.655.274.55.ano ⁻¹
Tamanho da Amostra (n)	60.000	5.000
Classes (n)	245	71
Desvio Padrão	R\$ 30.835,72.mês ⁻¹	R\$ 140.984,92.ano ⁻¹
Beta (%)	0,057	0,075

4.2.4.5 Cálculo de valores aleatórios de Fluxo de Caixa Incremental referente as operações da Central Geradora

Esse passo representa os valores aleatórios de Fluxo de Caixa Incremental referente as operações (FCO) dessa central, para compor o cálculo do Valor Presente do Projeto (VPP)

Na Tabela 4.14 estão representados os valores do FCO Anual.

Tabela 4.14 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série dos valores de FCO

Fonte: Autoria Própria

FCO Anual	ETE 1
FCO Mínimo (R\$.ano ⁻¹)	1.148.621,16
FCO Máximo (R\$.ano ⁻¹)	2.121.189,70
FCO Média (R\$.ano ⁻¹)	1.752.481,20
Tamanho da Amostra (n)	5.000
Classes (n)	71
Desvio Padrão (R\$.ano ⁻¹)	93.050,05
Beta (%)	0,075

4.2.4.6 Geração aleatória de valores de fluxo de caixa incremental dos investimentos;

Para esse caso foi utilizado a geração aleatória de 5.000 amostras de custo de investimentos baseadas em distribuição triangular. Para gerar esta distribuição foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos:

- Valor Mínimo = R\$2 milhões;
- Moda = R\$3 milhões;
- Valor máximo = R\$4 milhões.

A justificativa da utilização da distribuição triangular está citada no item 3.2.3.3.

4.2.4.7 Geração aleatória de período de duração do projeto

Para este caso foi utilizado a geração aleatória de 5.000 amostras de duração de projeto baseadas em distribuição triangular. Para gerar esta distribuição foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos:

- a) Valor Mínimo = 16 anos;
- b) Moda = 18 anos;
- c) Valor máximo = 20 anos.

A justificativa da utilização da distribuição triangular está citada no item 3.2.3.3.

4.2.4.8 Cálculo do VPP

Este passo representa os valores aleatórios de VPP desta central, para compor o cálculo do VPL.

Na Tabela 4.15 estão representados os valores do VPP.

Tabela 4.15 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série dos valores de VPP
Fonte: Autoria Própria

VPP	ETE 1
VPP Mínimo (R\$.ano ⁻¹)	10.352,281,43
VPP Máximo (R\$.ano ⁻¹)	15.793.814,04
VPP Média (R\$.ano ⁻¹)	12.695.277,61
Tamanho da Amostra (n)	5.000
Classes (n)	71
Desvio Padrão (R\$.ano ⁻¹)	54.415,33
Beta (%)	0,077

4.2.4.9 Cálculo do VPI

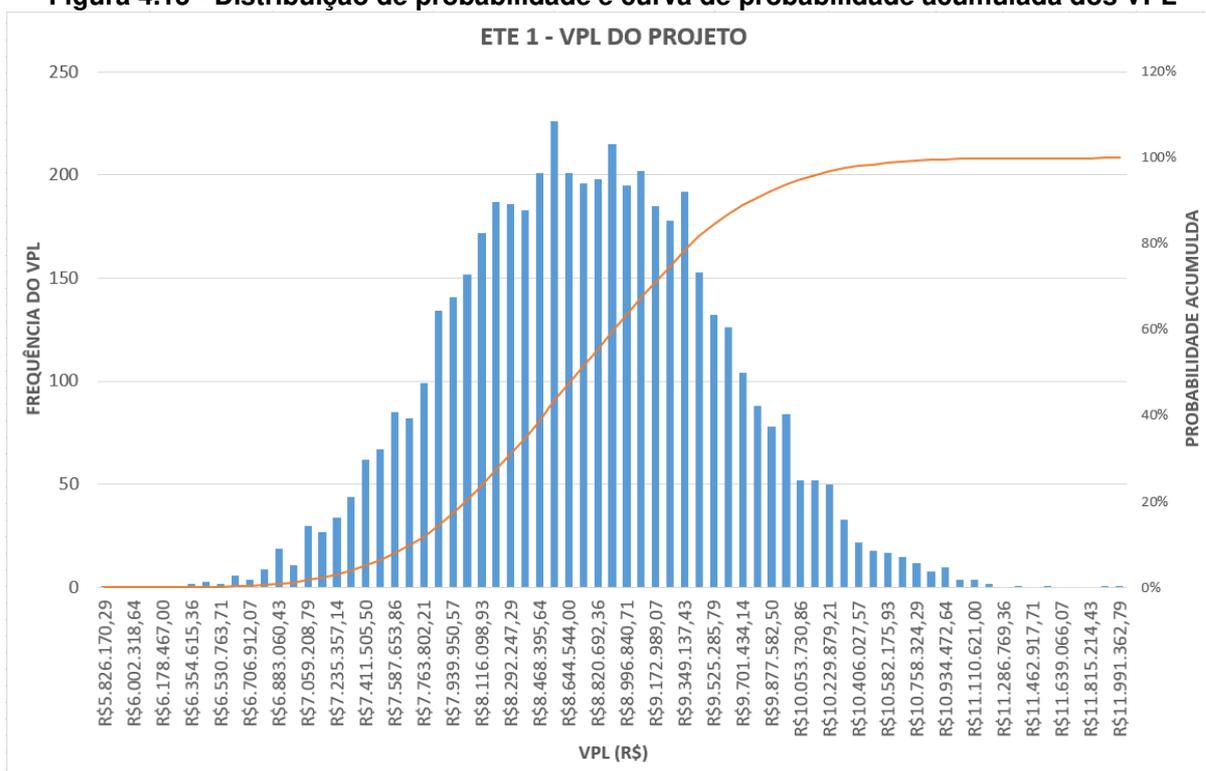
Considerou-se para o VPI os mesmos 5.000 valores aleatórios de FCI.

4.2.4.10 Cálculo do VPL

Ao levantar os dados de produção de energia elétrica na ETE e conhecer as características da curva de densidade de probabilidade da produção de biogás e energia elétrica na ETE, foi realizada uma análise para verificar se o investimento no sistema de geração de energia elétrica teria viabilidade econômica. Para isto, utilizou-se a ferramenta de análise Valor Presente Líquido (VPL).

Com a quantidade de amostras anuais e com os valores de investimento, custos operacionais, impostos, custo do capital definidos, obteve-se uma série de 5.000 valores de VPL, que foram organizados em um histograma de frequência conforme Figura 4.15.

Figura 4.15 - Distribuição de probabilidade e curva de probabilidade acumulada dos VPL



Fonte: Autoria Própria

A Tabela 4.16 apresenta os parâmetros estatísticos característicos dos VPLs.

Tabela 4.16 - Resumo dos parâmetros estatísticos da série de VPLs gerados
Fonte: Autoria Própria

DADOS VPL	ETE 1
VPL Mínimo	R\$5.635.026,10
VPL Máximo	R\$11.873.173,75
VPL Média	R\$8.711.238,45
Tamanho da Amostra (n)	5.000
Número de Classes (n)	71
Desvio Padrão	R\$ 813.000,45
Beta	0,118%
Tipo da Distribuição	Erlang k: 116,00 λ : 0,00

Ao analisar os valores apresentados na tabela 4.5 é possível observar que é possível que este projeto é viável, em função de seus valores positivos.

4.3 ANÁLISE DO RISCO DO PROJETO POR MEIO DA UTILIZAÇÃO DAS FERRAMENTAS VaR E CVaR E DA SENSIBILIDADE DO PROJETO

Baseado nos dados de viabilidade do projeto determinados através da ferramenta VPL e citados na seção 4.2.4.10, a seguir são apresentados os resultados de análise de risco de investimento, fruto da aplicação das ferramentas VaR e CVaR. Estes riscos são calculados para graus de confiança de 95%, 99% e 99,5%. Além disto, também estão apresentados os dados de quão sensíveis os cálculos de VPL, VaR 95% e CVaR 95% são em função das alterações dos valores de custos operacionais, tempo de duração do projeto e valores de investimento na central de geração de energia elétrica.

4.3.1 Análise de Risco - VaR

Ao analisar a curva de probabilidade acumulada da Figura 4.9 é possível extrair através de sua análise os seguintes valores para o VaR.

VaR para um nível de confiança de 95% é de R\$ 7.393.673,95;

VaR para um nível de confiança de 99% é de R\$ 6.905.020,31;

VaR para um nível de confiança de 99,9% é de R\$ 6.425.777,21

4.3.2 Análise de Risco - CVaR

Ao analisar a Figura 4.9 é possível extrair através de sua análise os seguintes valores para o CVaR

CVaR para um nível de confiança de 95% é de R\$ 7.136.492,78.

CVaR para um nível de confiança de 99% é de R\$ 6.682.771,32.

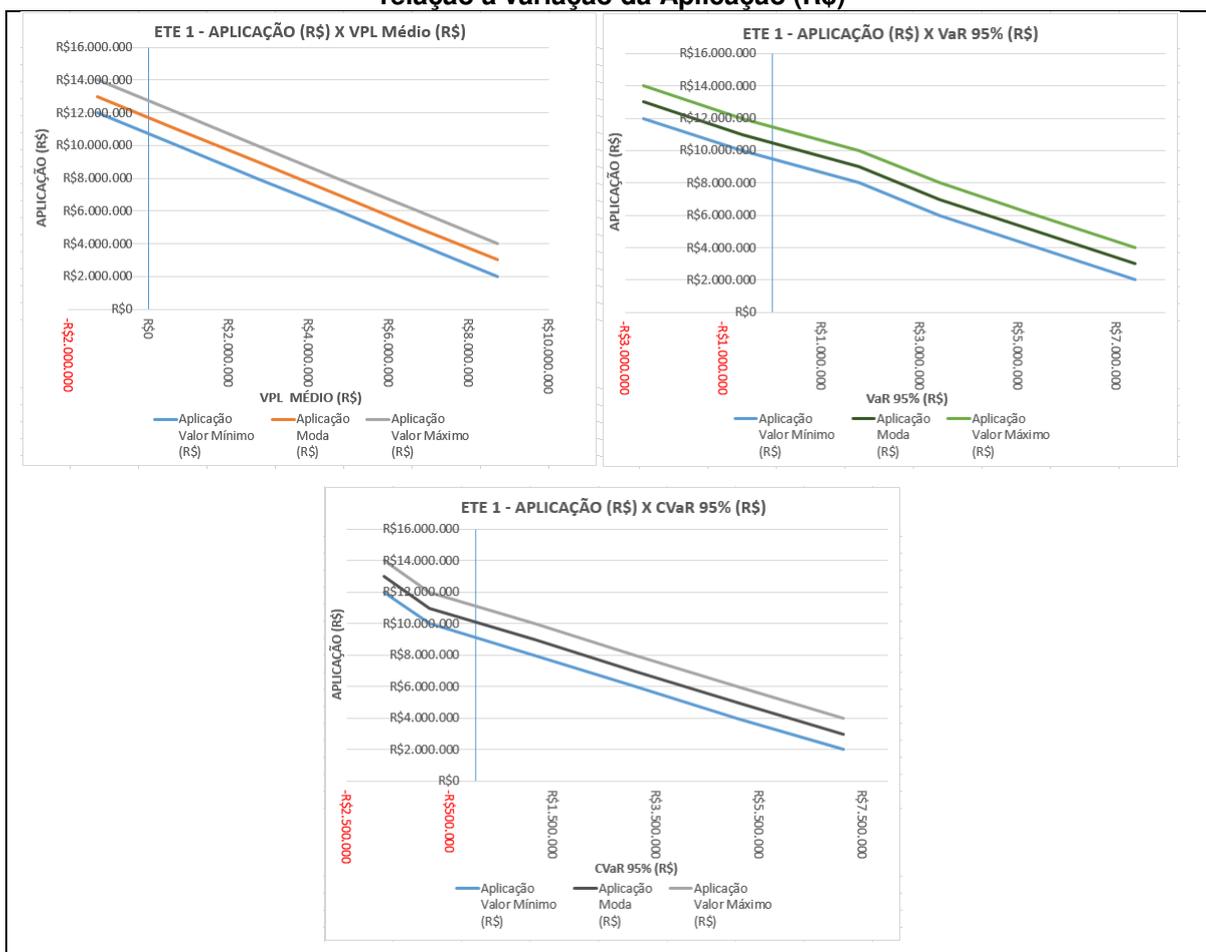
CVaR para um nível de confiança de 99,9% é de R\$ 6.030.401,65.

4.3.3 Análise de Sensibilidade

Para todos os casos é possível verificar que as variáveis se comportam de forma aproximadamente linear. O valor de investimento (aplicação) é inversamente proporcional ao valor do VPL médio. Para a Figura 4.16 é possível verificar que para esta ETE o valor de investimento (aplicação) que torna o projeto viável deve ser menor que aproximadamente R\$ 12.000.000,00. O valor de investimento (aplicação) é também inversamente proporcional ao valor de VaR 95% do VPL. Por meio da Figura 4.16 observa-se que para esta ETE, o VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o investimento (aplicação) é de aproximadamente R\$ 10.500.000,00.

O valor de investimento (aplicação) é também inversamente proporcional ao valor de CVaR 95% do VPL. Por meio da Figura 4.16 observa-se que para esta ETE, o VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o investimento (aplicação) é de aproximadamente R\$ 10.000.000,00.

Figura 4.16 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$), VaR 95% (R\$) e CVaR 95% (R\$) em relação a variação da Aplicação (R\$)

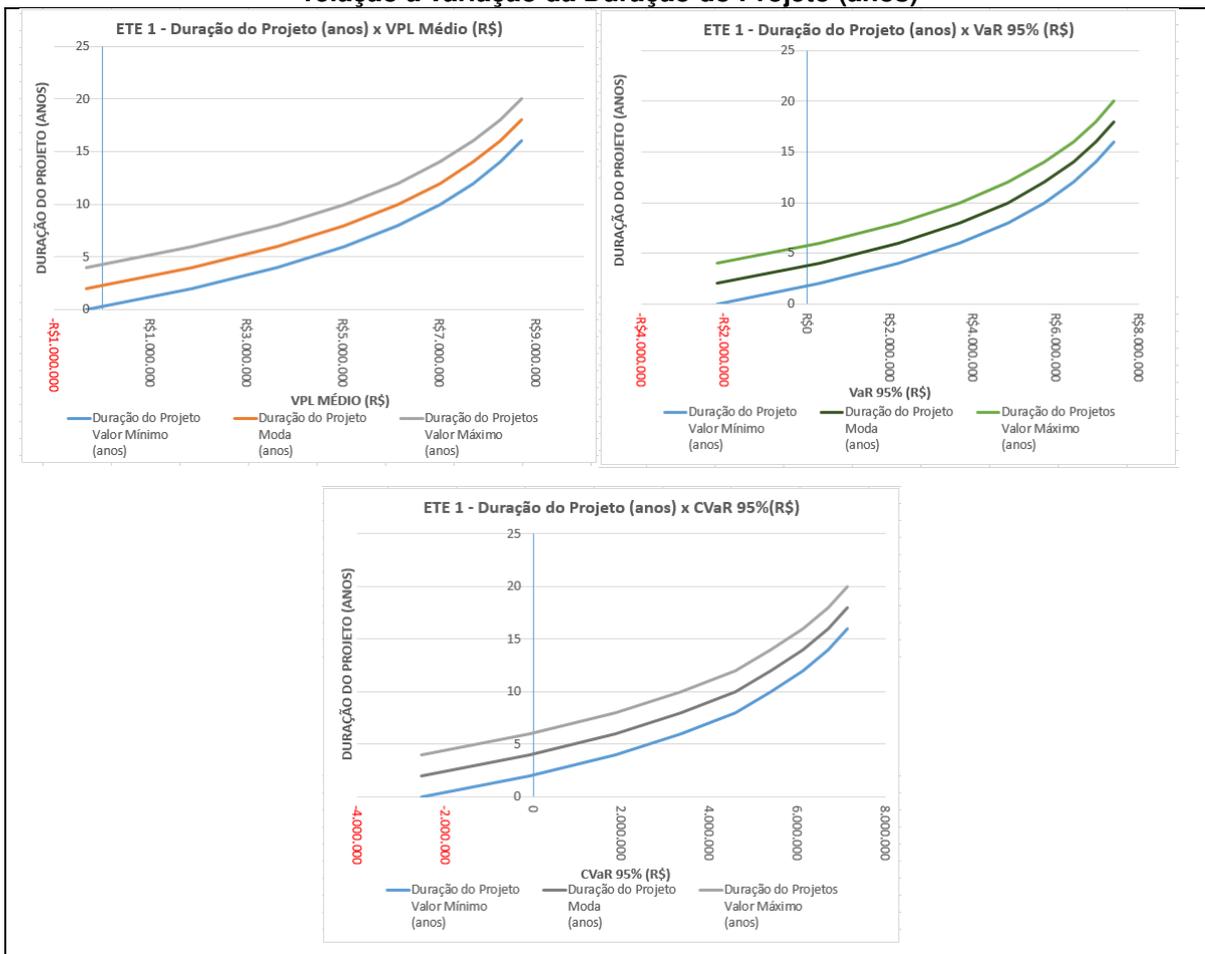


Para todos os casos é possível verificar que as variáveis se comportam de com o mesmo formato de curva. O tempo de duração do projeto é diretamente proporcional ao valor do VPL médio. Para a Figura 4.17 é possível verificar que para esta ETE, o tempo mínimo aproximado para tornar o projeto viável é de dois anos.

O tempo de duração do projeto é também diretamente proporcional ao valor de VaR 95% do VPL e suas curva no gráfico são semelhantes entre si, levando em conta a sua proporcionalidade. Por meio da Figura 4.17 observa-se que para esta ETE, o VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o tempo de duração do projeto for de aproximadamente 4 anos.

O tempo de duração do projeto é também diretamente proporcional ao valor de CVaR 95% do VPL e suas curvas no gráfico são semelhantes entre si, levando em conta a sua proporcionalidade. Através da Figura 4.17 observa-se que para esta ETE, o VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o tempo de duração do projeto for de aproximadamente 4 anos.

Figura 4.17 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$), VaR 95% (R\$) e CVaR 95% (R\$) em relação a variação da Duração do Projeto (anos)

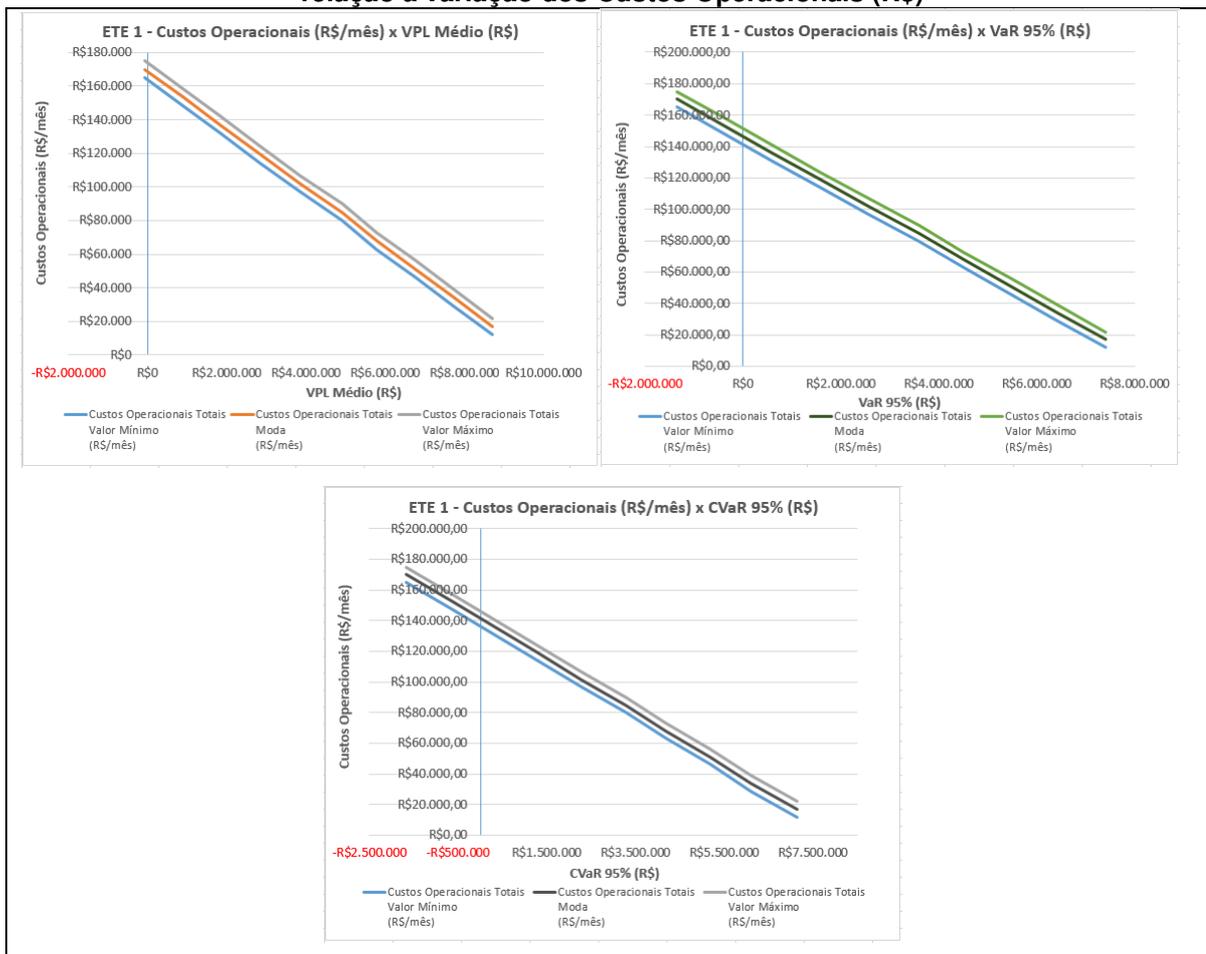


Para todos os casos é possível verificar que as variáveis se comportam de forma linear. O valor do custo operacional é inversamente proporcional ao valor do VPL médio. Para a Figura 4.18 é possível verificar que para esta ETE o valor do Custo Operacional que torna o projeto viável deve ser menor que aproximadamente R\$ 170.000,00.

O valor do custo operacional é também inversamente proporcional ao valor de VaR 95% do VPL. Através da Figura 4.18 observa-se que para esta ETE, o VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o custo operacional for de aproximadamente R\$ 150.000,00.

O valor do custo operacional é também inversamente proporcional ao valor de CVaR 95% do VPL. Através da Figura 4.18 observa-se que para esta ETE, o CVaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o custo operacional for de aproximadamente R\$ 140.000,00.

Figura 4.18 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$), VaR 95% (R\$) e CVaR (R\$) em relação a variação dos Custos Operacionais (R\$)



4.4 ANÁLISE DE CENÁRIOS DE PRODUÇÃO DE CH₄ E ENERGIA ELÉTRICA EM FUNÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DE AMOSTRAGEM DOS DADOS DE ENTRADA DA FUNÇÃO DE CONVERSÃO

Após determinar os valores de produção de CH₄ e energia elétrica obtidos a partir da utilização de valores de entrada de vazão do afluente, DQO do Afluente, bem como as seguintes variáveis:

- eficiência de remoção de DQO (%);
- coeficiente de produção de sólidos (kgSV/kgDQOremov);
- concentração média de SO₄ no afluente (kgSO₄/m³);
- eficiência na remoção de SO₄ (%);
- temperatura operacional do reator (°C), perda com o gás residual (%);
- outras perdas (%);
- fator de supersaturação de CH₄ na fase líquida;

amostradas baseadas em distribuições de probabilidade Gama, Lognormal e Normal, respectivamente, optou-se em determinar se haveria alterações na produção em função da utilização de dois cenários de amostragem para os valores de entrada, descritos a seguir.

4.4.1 Cálculo de Produção de CH₄ e Energia Elétrica

a) Cenário 01:

Para realizar esta simulação foram utilizados os seguintes parâmetros como variáveis de entrada:

- Vazão do Afluente: Valores amostrados baseados na Distribuição de Probabilidade Gama ($k: 44,9 / \theta: 8,28$);
- DQO Afluente: Valores amostrados baseados na Distribuição de Probabilidade Lognormal ($\mu: 6,87, \sigma: 0,431$);
- Demais Variáveis: Valores amostrados baseados nos cenários de estimativa do Tipo Pior, Típico e Melhor. Foram feitas análise utilizando dados fixos e dados gerados aleatoriamente baseados em uma Distribuição de Probabilidade Normal. Quando da utilização de Distribuição Normal foram utilizados como média os valores do cenário analisado e desvio padrão baseado em $\frac{1}{4}$ da diferença encontrada entre os valores Pior, Típico e Melhor.
- N° de amostras: 100.000.

Os resultados das simulações, estão representados na Figura 4.19.

Para complementar o resultado da análise, conforme Figuras 4.21 e 4.22, foram elaborados histogramas que tinham o objetivo de apresentar as variações nos resultados de produção de CH₄ e energia elétrica. Ao analisar os resultados é possível verificar que o “*shape*” dos histogramas tanto de produção de CH₄, quando de energia elétrica são similares. Além disto, os valores de desvio padrão para são similares entre si, e apresentar um crescimento linear.

Figura 4.19 – Dados de Produção de CH₄ e Energia Elétrica – Cenário 1

ETE 1 Análise de Cenários	Distribuições					
	Vazão: Gama DQO: Lognormal Outras Variáveis: Normal. Cenário do Tipo "Pior"	Vazão: Gama DQO: Lognormal Outras Variáveis: Normal. Cenário do Tipo "Típico"	Vazão: Gama DQO: Lognormal Outras Variáveis: Normal. Cenário do Tipo "Melhor"	Vazão: Gama DQO: Lognormal Outras Variáveis: Valor Fixo Cenário do Tipo "Pior"	Vazão: Gama DQO: Lognormal Outras Variáveis: Valor Fixo Cenário do Tipo "Tipo"	Vazão: Gama DQO: Lognormal Outras Variáveis: Valor Fixo Cenário do Tipo "Melhor"
Produção CH ₄ Mínima (Nm ³ /d)	-215,66	85,38	306,56	-116,09	60,59	329,60
Produção CH ₄ Máxima (Nm ³ /d)	36153,47	32106,19	39389,09	30991,64	31698,19	41591,87
Produção CH ₄ Média (Nm ³ /d)	4046,78	4850,62	5506,78	4020,44	4987,78	6027,13
Desvio Padrão (Nm ³ /d)	2444,28	2747,88	2969,51	2419,01	2789,12	3212,27
Produção Energia Elétrica Mínimo (kWh/d)	-646,33	255,89	918,75	-347,94	181,57	987,80
Produção Energia Elétrica Máximo (kWh/d)	108351,94	96222,26	118049,09	92881,93	94999,47	124650,84
Produção Energia Elétrica Média(kWh/d)	12128,20	14537,32	16503,81	12049,27	14948,36	18063,30
Desvio Padrão (kWh/d)	7325,52	8235,40	8899,62	7249,78	8358,99	9627,19

Fonte: Autoria Própria

Vale ressaltar que os valores negativos de produção mínima de CH₄ e energia tem sua justificativa citada no item 4.2.1.7.

b) Cenário 02:

Para realizar esta simulação foram utilizados os seguintes parâmetros como variáveis de entrada:

- Vazão do Afluentes: Valores amostrados baseados na Distribuição Normal (μ : 371,93, σ : 55);
- Vazão do DQO: Valores amostrados baseados na Distribuição Normal (μ : 1061,16, σ : 470,24);
- Demais Variáveis: Valores amostrados baseados nos cenários de estimativa do Tipo Pior, Típico e Melhor. Foram feitas análise utilizando dados fixos e dados gerados aleatoriamente baseados em uma Distribuição de Probabilidade Normal. Quando da utilização de Distribuição Normal foram utilizados como média os valores do cenário analisado e desvio padrão baseado em $\frac{1}{4}$ da diferença encontrada entre os valores Pior, Típico e Melhor.
- N^o de amostras: 100.000

Para a elaboração dos histogramas de vazão e DQO baseados em distribuições normais, foram utilizados as médias e os desvios padrões baseados nos dados levantados em campo, conforme Tabelas 4.1 e 4.2.

O resultado das simulações estão representados na Figura 4.20.

Para o Cenário 02, conforme Figuras 4.23 e 4.24 foram elaborados histogramas que tinham o objetivo de apresentar as variações nos resultados de produção de CH₄ e energia elétrica. Ao analisar os resultados é possível verificar que o “*shape*” dos histogramas tanto de produção de CH₄, quando de energia elétrica são similares. Além disto, os valores de desvio padrão para são similares entre si, e apresentar um crescimento linear.

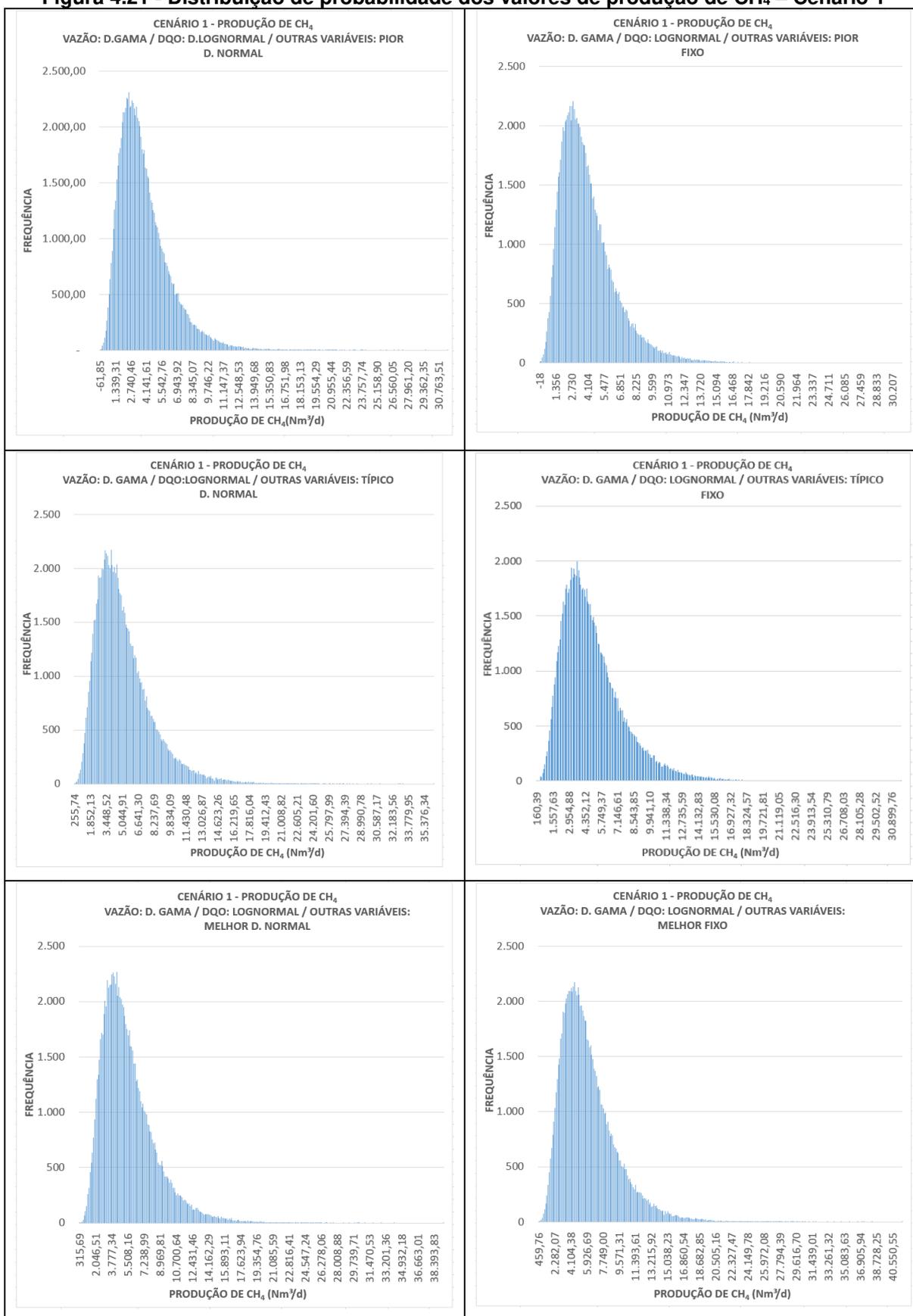
Figura 4.20 – Dados de Produção de CH₄ e Energia Elétrica – Cenário 2

ETE 1 Análise de Cenários	Vazão e DQO: Normal Outras Variáveis: Normal. Cenário do Tipo “Pior”	Vazão e DQO: Normal Outras Variáveis: Normal. Cenário do Tipo “Típico”	Vazão e DQO: Normal Outras Variáveis: Normal. Cenário do Tipo “Melhor”	Vazão e DQO: Normal Outras Variáveis: Valor Fixo Cenário do Tipo “Pior”	Vazão e DQO: Normal Outras Variáveis: Valor Fixo Cenário do Tipo “Tipo”	Vazão e DQO: Normal Outras Variáveis: Valor Fixo Cenário do Tipo “Melhor”
Produção CH ₄ Mínima (Nm ³ /d)	-6134,75	-5970,52	-7615,24	-6053,47	-7504,00	-6964,45
Produção CH ₄ Máxima (Nm ³ /d)	15868,03	19939,26	24428,51	17841,53	19705,94	22546,14
Produção CH ₄ Média (Nm ³ /d)	4068,25	5236,83	6514,72	4059,64	5015,99	6058,86
Desvio Padrão (Nm ³ /d)	2383,46	2848,25	3361,85	2358,19	2745,99	3131,74
Produção Energia Elétrica Mínimo (kWh/d)	-18385,85	-17893,66	-22822,89	-18142,24	-22489,50	-20872,45
Produção Energia Elétrica Máximo (kWh/d)	47556,49	59757,95	73212,26	53471,06	59058,70	67570,79
Produção Energia Elétrica Média(kWh/d)	12192,53	15694,77	19524,62	12166,75	15032,92	18158,40
Desvio Padrão (kWh/d)	7143,22	8536,22	10075,47	7067,50	8229,72	9385,82

Fonte: Autoria Própria

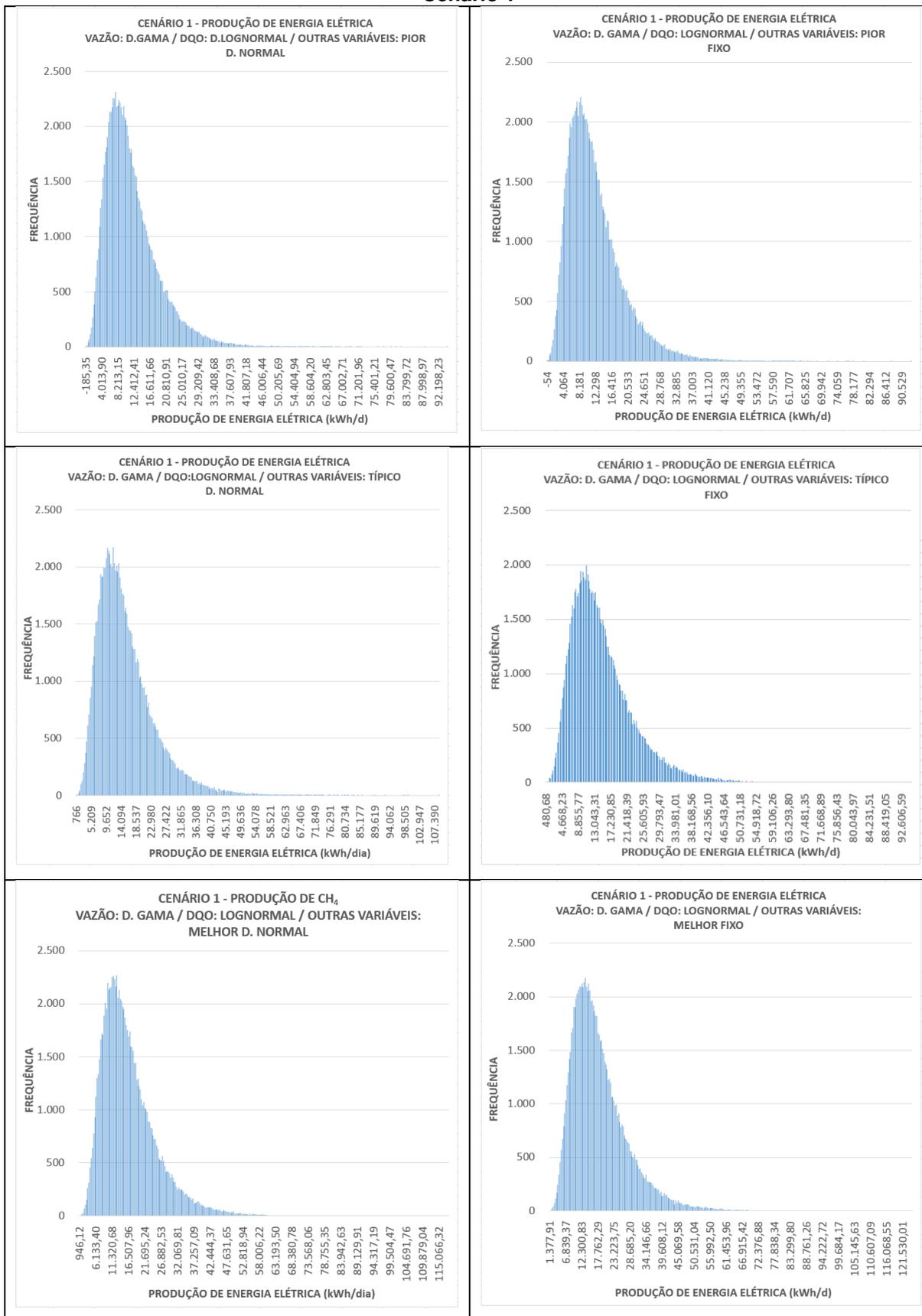
Vale ressaltar que os valores negativos de produção mínima de CH₄ e energia tem sua justificativa citada no item 4.2.1.7.

Figura 4.21 - Distribuição de probabilidade dos valores de produção de CH₄ – Cenário 1



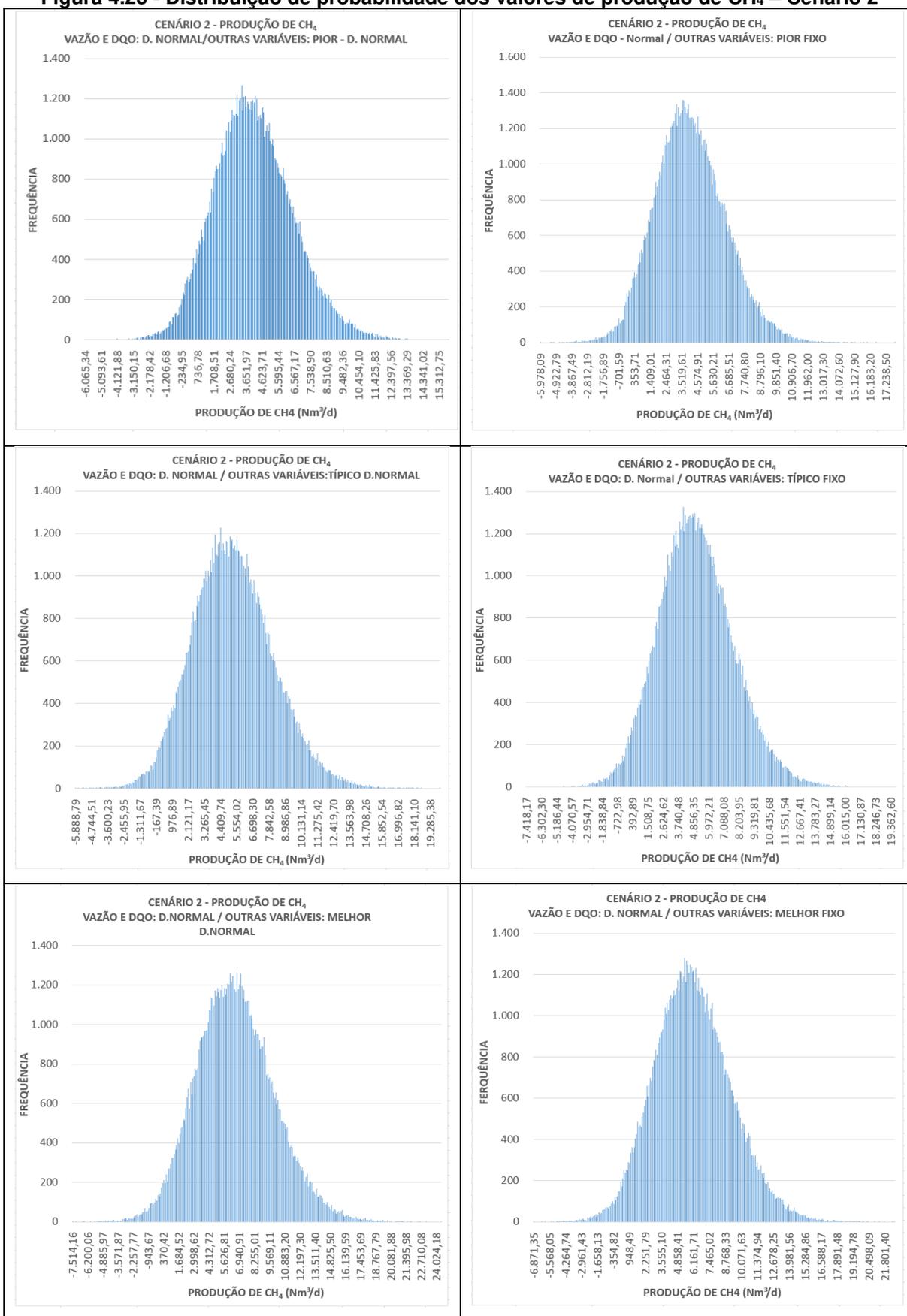
Fonte: Autoria Própria

Figura 4.22 - Distribuição de probabilidade dos valores de produção de Energia Elétrica – Cenário 1



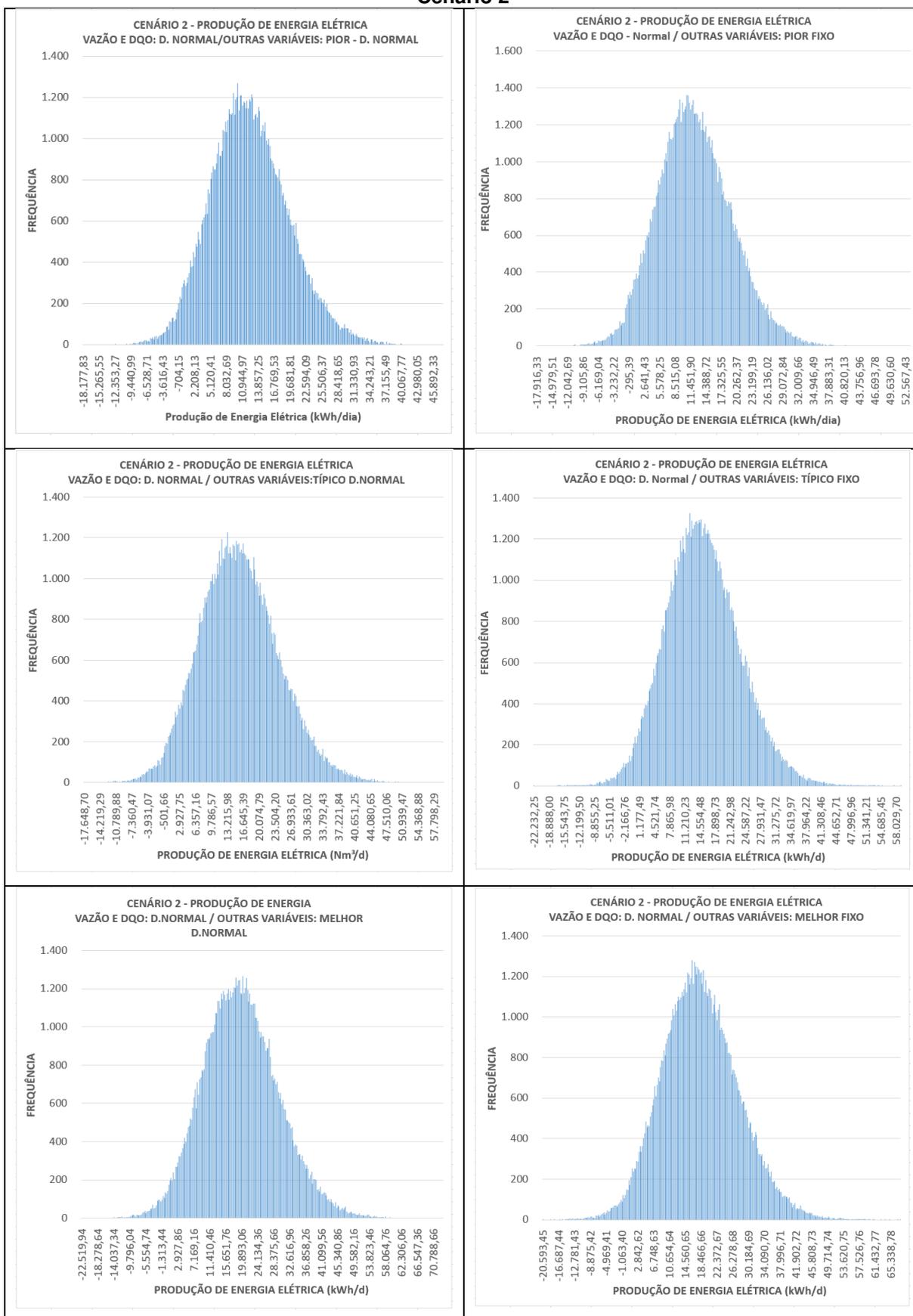
Fonte: Autoria Própria

Figura 4.23 - Distribuição de probabilidade dos valores de produção de CH₄ – Cenário 2



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.24 - Distribuição de probabilidade dos valores de produção de Energia Elétrica – Cenário 2



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.25 – Estimativa de Produção de CH₄ e Energia Elétrica – Cenário 1

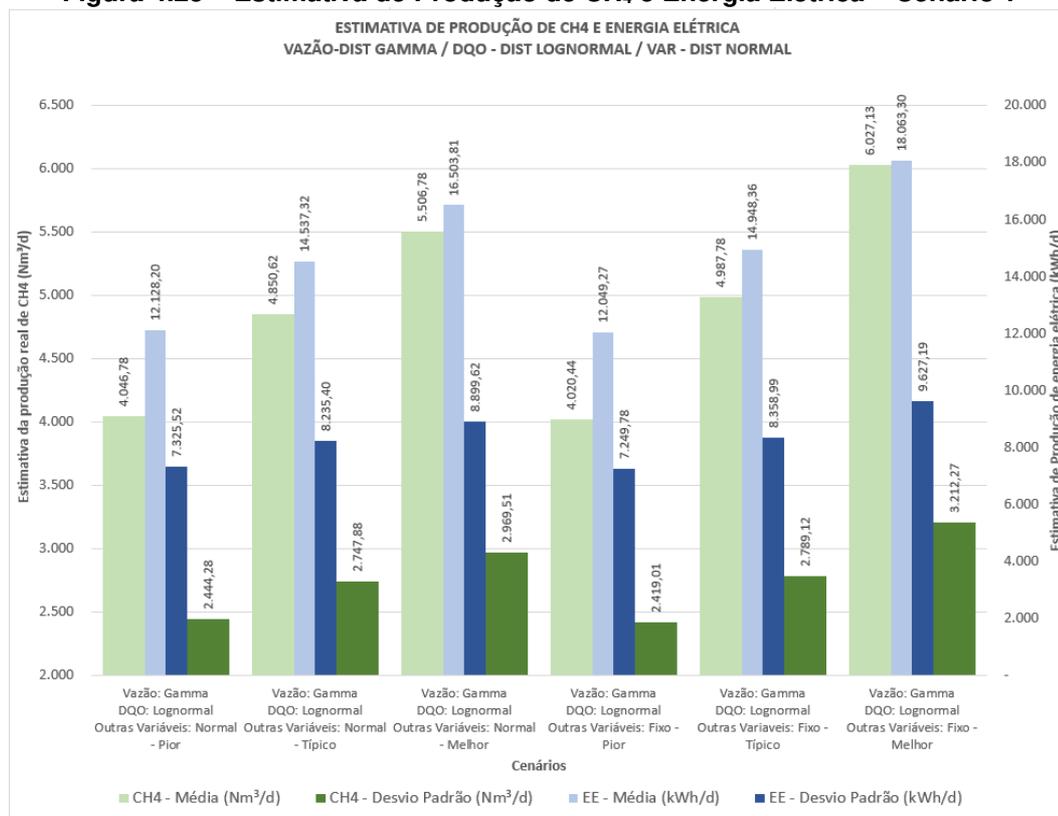
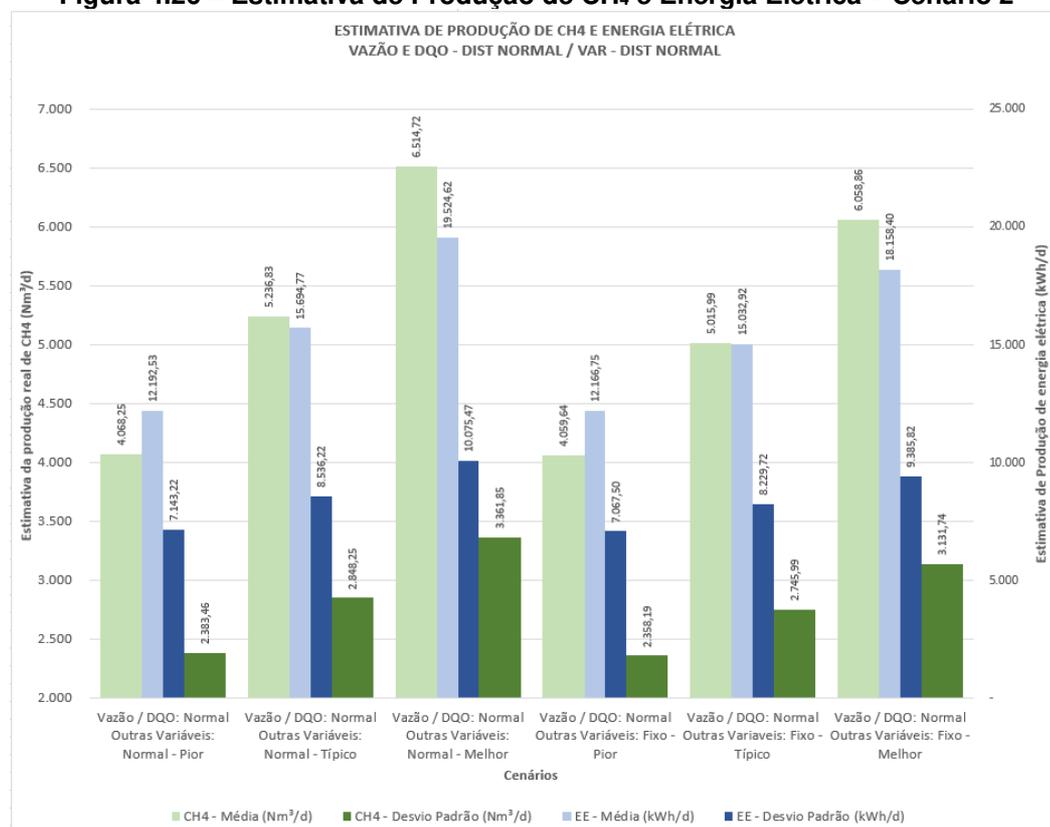


Figura 4.26 – Estimativa de Produção de CH₄ e Energia Elétrica – Cenário 2



Ao analisar os gráficos das Figuras 4.26 e 4.26 é possível verificar que para situações onde a variável “Outras Variáveis” são iguais nos dois cenários, independentemente dos tipos de dados de entrada de vazão e DQO, os resultados de produção de produção de CH₄ e Energia Elétrica, são muito próximos entre si. Além dos valores de produção, os desvios padrões tem valores próximos também.

Em função do exposto, optou-se em utilizar como dados de entrada na função de conversão de produção de CH₄ e Energia Elétrica, valores amostrados baseados nas distribuições levantadas para os valores de vazão e DQO.

4.5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA ESTUDADA EM OUTRAS ETEs

Para que a metodologia de análise de risco e viabilidade técnica-econômica proposta tenha confiabilidade e robustez, torna-se necessário sua aplicação em outras ETEs para validar o método de análise. Para isto, optou-se em aplicar este método em outras três Estações com as mesmas características operacionais de tratamento de esgoto da ETE apresentada na seção 4.1.

Estão apresentados para as quatro ETEs, os resultados e as análises dos dados de: vazão e DQO médios do efluente; produção diária de CH₄, produção diária e mensal de energia elétrica, custos evitados / ganho mensal com a geração de energia elétrica mensal. VPLs, VaR e CVaR; e análise de sensibilidade. Também foram apresentados os resultados de dimensionamento dos Grupos Moto Geradores e Gasômetros

4.5.1 Análise dos dados de vazão médios do efluente – ETEs 1, 2, 3 e 4

Os dados de vazões médias dos efluentes das ETEs 1, 2, 3 e 4 estão representados na tabela 4.17 e foram levantados em campo. Na Figura 4.27 estão representados os histogramas destas vazões médias.

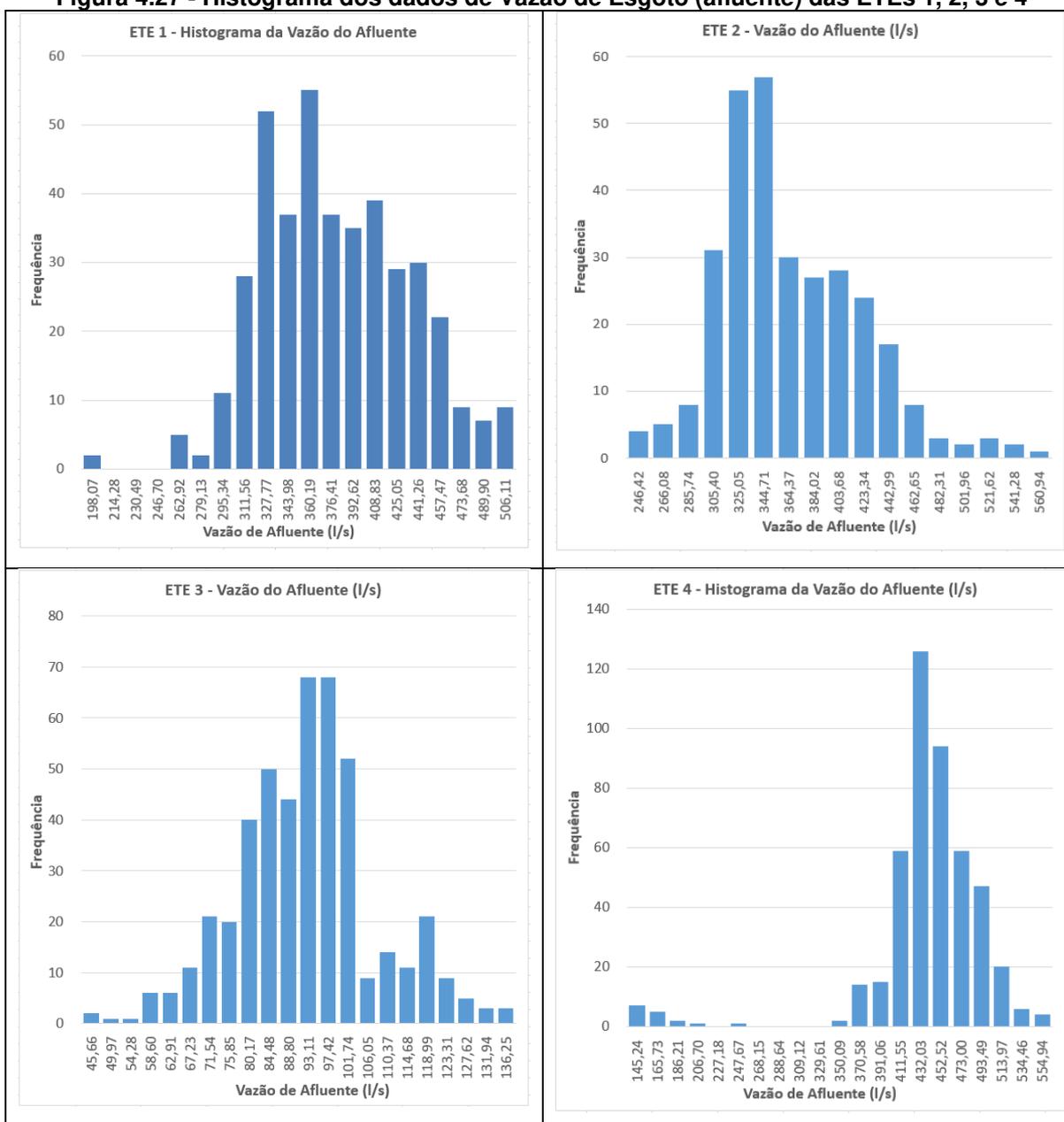
Verificou-se que os dados de vazão afluente média, vazão afluente máxima desvio padrão, tamanho da amostra e beta possuem valores próximos nas ETEs 1, 2 e 4.

Tabela 4.17 - Resumo dos parâmetros estatísticos das séries da vazão média do efluente – ETEs 1, 2, 3 e 4

Fonte: Autoria Própria

DADOS VAZÃO ETEs	ETE 1	ETE 2	ETE 3	ETE 4
Vazão Afluente Mínima (l/s)	181,85	226,77	41,34	124,76
Vazão Afluente Máxima (l/s)	506,11	560,94	136,25	554,94
Vazão Afluente Média (l/s)	371,93	355,06	90,47	427,83
Tamanho da Amostra (n)	409,00	305,00	465,00	462,00
Desvio Padrão (l/s)	55,00	55,66	15,37	63,25
Beta	0,731%	0,898%	0,788%	0,688%
Tipo da Distribuição	Gama k: 44,902 θ: 8,283	Fisher-Tippett ε: 47,300 μ: 329,129	Logistica μ: 90,194 s: 8,472	Logistica μ: 434,397 s: 26,741

Figura 4.27 - Histograma dos dados de Vazão de Esgoto (afluente) das ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

Não se observou a partir dos dados coletados em campo um padrão para os tipos de distribuições de probabilidade.

4.5.2 Análise dos dados de DQO médios do efluente – ETEs 1, 2, 3 e 4

Os dados das DQOs médias dos efluentes das ETEs 1, 2, 3 e 4 estão representados na Tabela 4.18 e foram levantados em campo. Na Figura 4.28 estão representados os histogramas destas DQOs médias.

Verificou-se que os dados das DQOs médias dos afluentes possuem valores próximos nas ETEs 1, 2 e 4. Pode-se verificar que para as ETEs 1, 3 e 4, há um padrão nos tipos de distribuição de probabilidade.

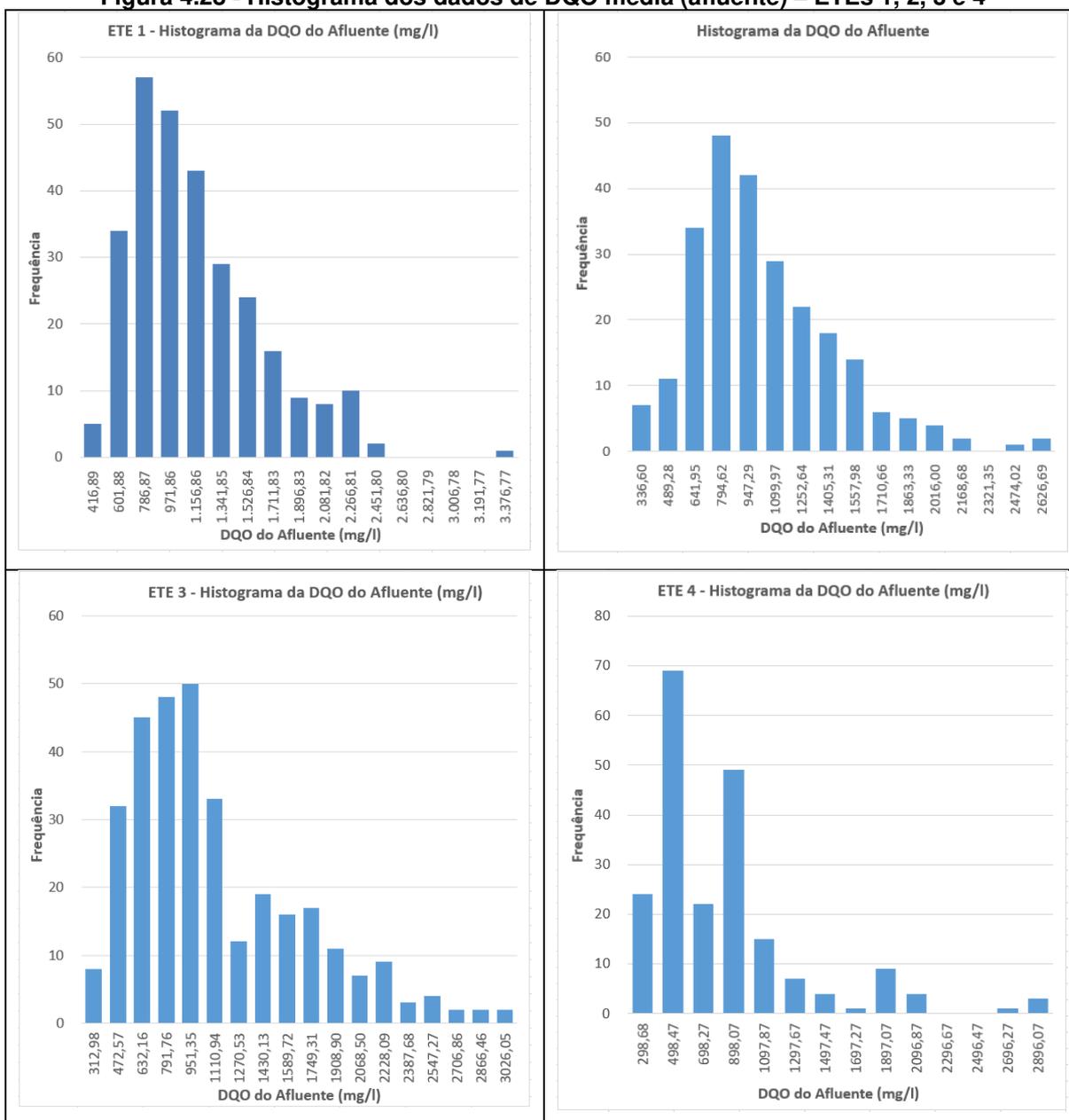
Tabela 4.18 - Resumo dos parâmetros estatísticos das séries da vazão de efluente – ETEs 1, 2, 3 e 4

Fonte: Autoria Própria

DADOS DQO ETEs	ETE 1	ETE 2	ETE 3	ETE 4
DQO Afluente Mínima (mg/l)	231,90	183,93	153,39	98,88
DQO Afluente Máxima (mg/l)	3.376,77	2.626,69	3.026,05	2.896,07
DQO Afluente Média (mg/l)	1.061,16	956,77	1.036,28	719,53
Tamanho da Amostra (n)	290,00	245,00	320,00	208,00
Desvio Padrão (mg/l)	470,24	415,04	573,13	501,80
Beta	2,602%	2,763%	3,092%	4,836%
Tipo da Distribuição	Log-normal μ : 6,875 σ : 0,431	Fisher-Tippett ϵ : 323,605 μ : 772,976	Log-normal μ : 6,795 σ : 0,554	Log-normal μ : 6,388 σ : 0,604

Em relação aos valores máximos da concentração de DQO do afluente, utilizou-se o mesmo princípio citado no item 4.2.1.2.

Figura 4.28 - Histograma dos dados de DQO média (afluente) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

4.5.3 Análise dos dados de Produção Diária de CH₄ – ETEs 1, 2, 3 e 4

Os dados de Produção Diária de CH₄ das ETEs 1, 2, 3 e 4 estão representados na tabela 4.19 e foram determinados a partir dos resultados da função de conversão. Na Figura 4.30 estão representados os histogramas de produção de CH₄ destas ETEs.

Verificou-se que os dados Produção Média de CH₄ e desvio padrão possuem valores próximos nas ETEs 1 e 2.

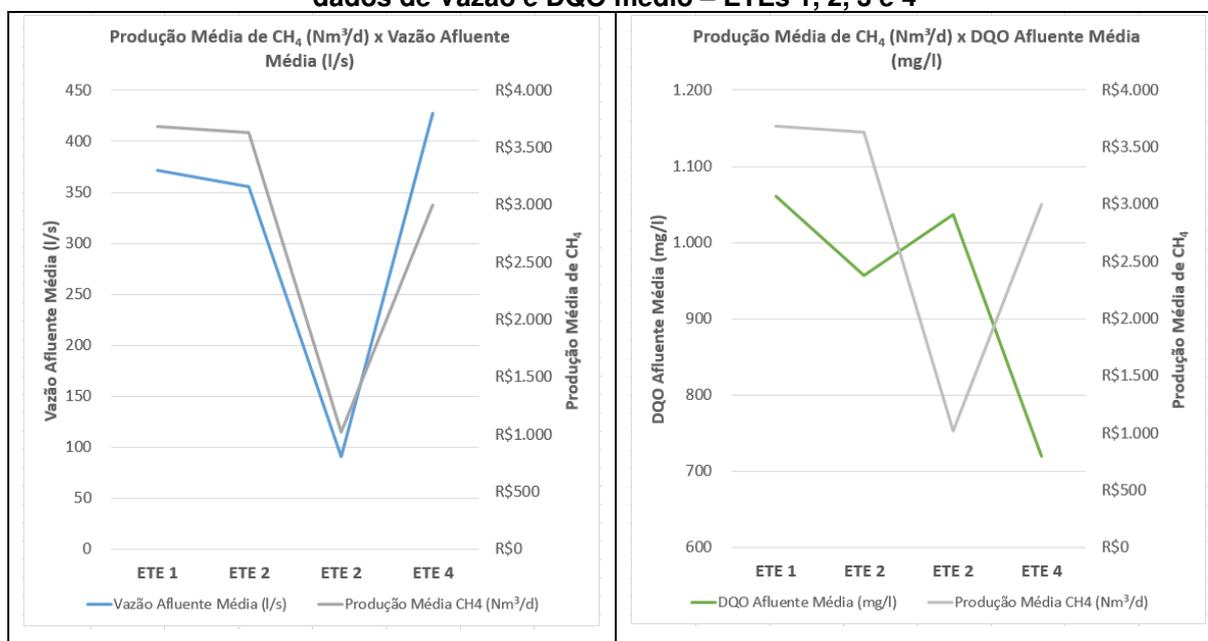
Tabela 4.19 - Resumo dos dados de Produção diária de CH₄ – ETEs 1 ,2, 3 e 4
Fonte: Autoria Própria

DADOS PRODUÇÃO DIÁRIA DE CH₄	ETE 1	ETE 2	ETE 3	ETE 4
Produção Mínima CH ₄ (Nm ³ /d)	-726,26	-1.436,32	-435,12	-973,80
Produção Máxima CH ₄ (Nm ³ /d)	36.541,29	35.883,64	19.545,88	62.803,03
Produção Média CH ₄ (Nm ³ /d)	3.681,36	3.629,72	1.022,20	2.998,57
Tamanho da Amostra (n)	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00
Desvio Padrão (Nm ³ /d)	2.373,27	2.147,85	805,14	2.833,56
Beta (%)	0,048%	0,044%	0,059%	0,070%
Tipo da Distribuição	Fisher-Tippett ε: 1699,570 μ: 2748,337	Fisher-Tippett ε: 1626,548 μ: 2767,706	Fisher-Tippett ε: 543,042 μ: 722,524	Fisher-Tippett ε: 1765,768 μ: 1918,573

A razão dos valores de produção de CH₄ serem negativos está citada no item 4.2.1.7.

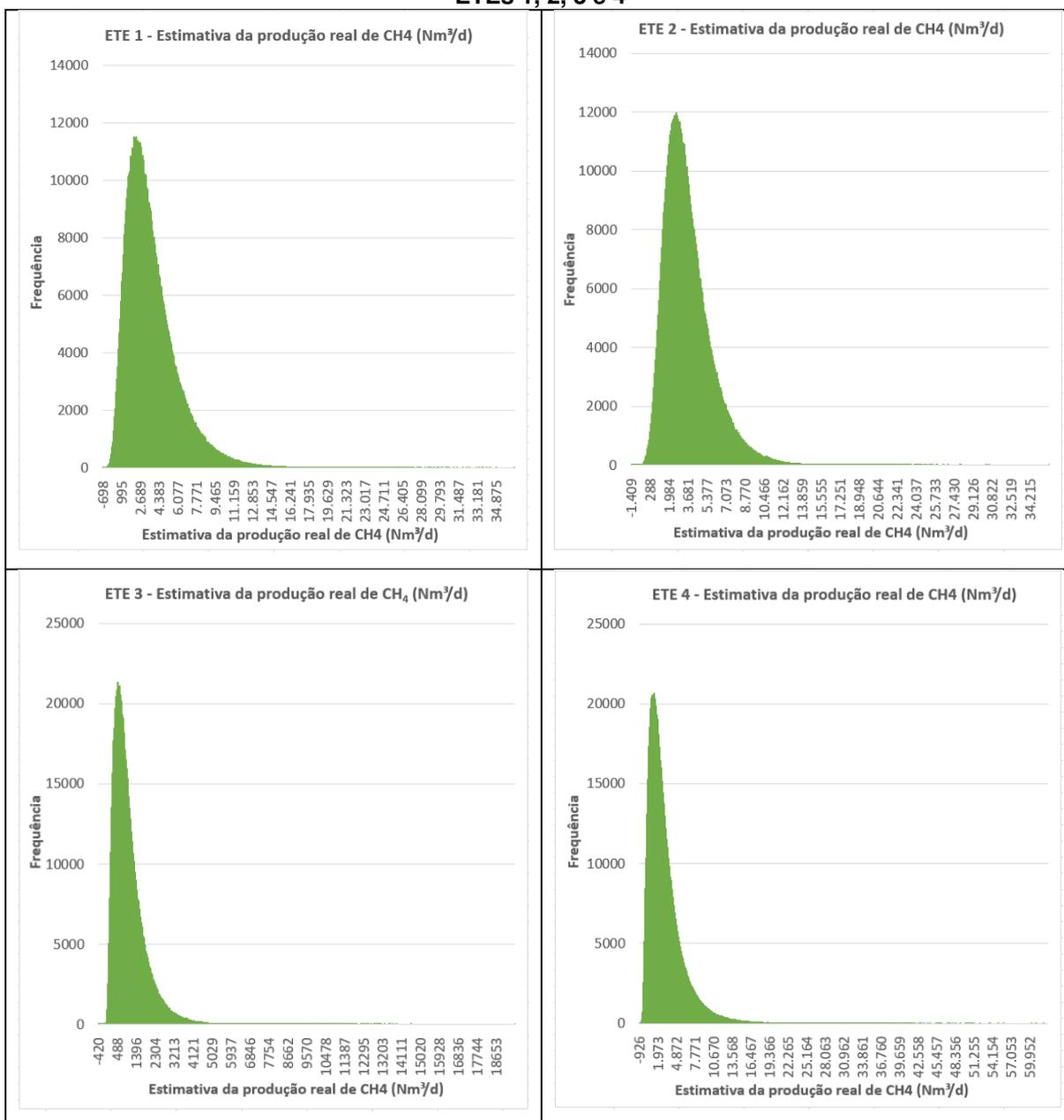
Conforme Figura 4.29 é possível verificar uma relação entre a Vazão Afluente Média e a Produção Média de CH₄, porém para o caso da DQO Afluente Média não é possível enxergar uma relação com a Produção Média de CH₄.

Figura 4.29 – Comparativo entre os valores de Produção Média Diária de CH₄ (Nm³/d) e dos dados de Vazão e DQO médio – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.30 - Distribuição de probabilidade dos valores de Produção diária de CH₄ (Nm³/dia) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

4.5.4 Análise dos dados de Produção Diária de Energia Elétrica – ETEs 1, 2, 3 e 4

Os dados de Produção Diária de Energia Elétrica das ETEs 1, 2, 3 e 4 estão representados na tabela 4.20 e foram determinados a partir dos resultados da função de conversão. Na Figura 4.32 estão representados os histogramas de produção diária de Energia Elétrica destas ETEs.

Verificou-se que os dados Produção Média de Energia Elétrica e desvio padrão possuem valores próximos nas ETEs 1 e 2.

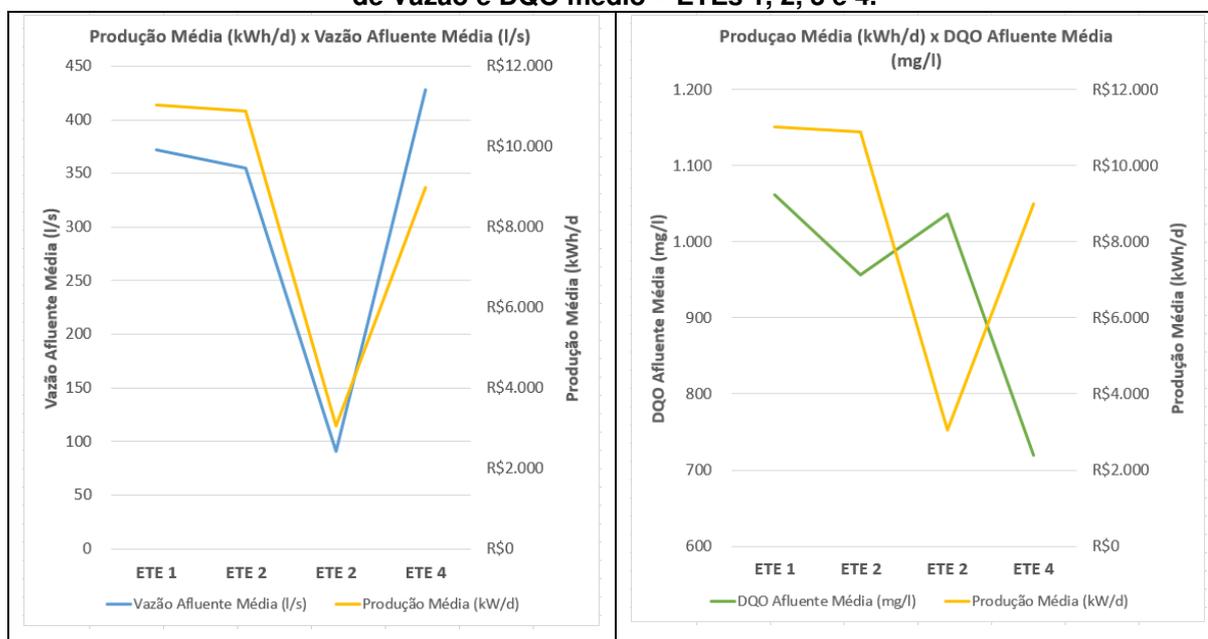
Tabela 4.20 - Resumo dos dados de Produção diária de Energia Elétrica – ETEs 1, 2, 3 e 4
Fonte: Autoria Própria

DADOS PRODUÇÃO DIÁRIA DE ENERGIA ELÉTRICA	ETE 1	ETE 2	ETE 2	ETE 4
Produção Mínima EE (kWh/d)	-2.176,60	-4.304,64	-1.304,04	-2.918,49
Produção Máxima EE (kWh/d)	109.514,26	107.543,27	58.579,01	188.220,67
Produção Média EE (kWh/d)	11.033,02	10.878,27	3.063,54	8.986,71
Tamanho da Amostra (n)	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00	1.800.000,00
Desvio Padrão (kWh/d)	7.112,68	6.437,10	2.413,02	8.492,18
Beta (%)	0,048%	0,044%	0,059%	0,070%
Tipo da Distribuição	Fisher-Tippett ϵ : 5093,572 μ : 8236,473	Fisher-Tippett ϵ : 4847,601 μ : 8294,777	Fisher-Tippett ϵ : 1627,497 μ : 2165,426	Fisher-Tippett ϵ : 5292,368 μ : 5750,106

A razão dos valores de produção de energia elétrica serem negativos está citada no item 4.2.2.1.

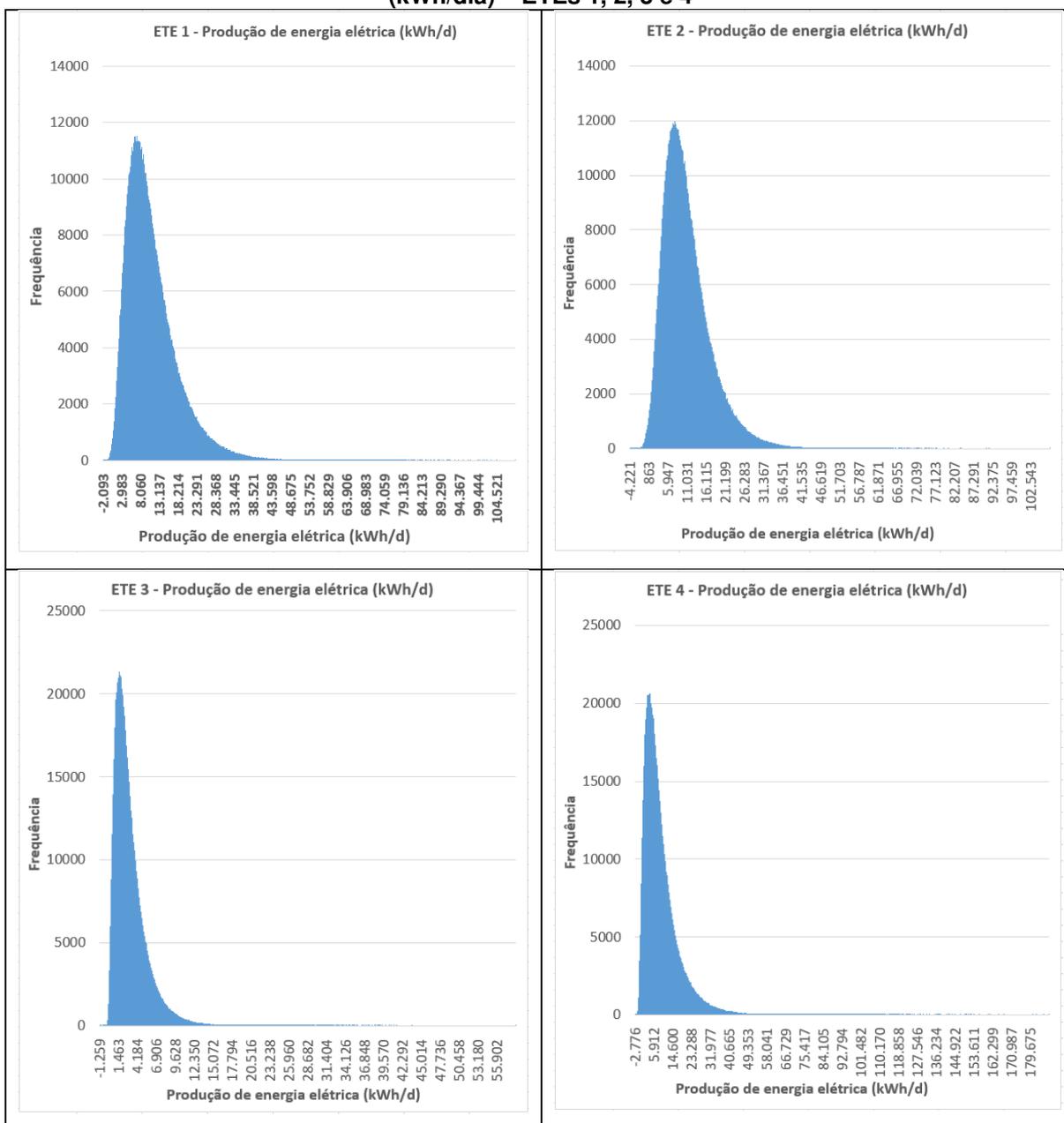
Conforme Figura 4.31 é possível verificar uma relação entre a Vazão Afluente Média e o Produção Diária de Energia Elétrica média, porém para o caso da DQO Afluente Média não é possível enxergar uma relação com o Produção Diária de Energia Elétrica média.

Figura 4.31 – Comparativo entre os valores de Produção Diária de Energia Elétrica e dos dados de Vazão e DQO médio – ETEs 1, 2, 3 e 4.



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.32 - Distribuição de probabilidade dos valores de Produção Diária de Energia Elétrica (kWh/dia) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

4.5.5 Dimensionamento dos Grupos Moto Geradores e Gasômetros – ETEs 1, 2, 3 e 4

Os dados do dimensionamento dos Grupos Moto Geradores e Gasômetros para as ETEs 1, 2, 3 e 4 estão representados na tabela 4.21. A partir dos dados diários de produção de CH₄ e Energia Elétrica foi possível dimensionar estes equipamentos. Verificou-se que para as ETEs 1 e 2 as dimensões dos equipamentos são próximas.

Em função da potência dos Grupos Moto Geradores, todas as Estações devem ser enquadradas no grupo A de faturamento de energia elétrica. Para todos os casos, optou-se pela modalidade tarifária verde para os cálculos de análise de risco e viabilidade econômica.

Tabela 4.21 - Resumo do dimensionamento dos Grupos Moto Gerador e dos Gasômetros
Fonte: Autoria Própria – ETEs 1, 2, 3 e 4

Dados de dimensionamento de Grupo Moto Gerador e Gasômetro	ETE 1	ETE 2	ETE 3	ETE 4
Energia Elétrica (kW/dia)	11.033,00	10.878,00	3.063,00	8.986,00
CH ₄ produzido (Nm ³ /dia)	3.681,00	3.629,00	1.022,00	2.998,00
Potência média do Gerador (kW)	459,00	453,00	127,00	374,00
Volume do Gasômetro (Nm ³)	1.104,00	1.088,00	307,00	899,00
Modalidade Tarifária	Verde	Verde	Verde	Verde
Subgrupo	A4 Saneamento	A4 Saneamento	A4 Saneamento	A4 Saneamento

Todas estas centrais elétricas podem ser classificadas como Minigeração Distribuída, em função da potência da central geradora ser maior que 75kW e menor de 5MW. Em função do Sistema de Compensação de Energia, seu excedente de produção pode ser utilizado para compensar a energia consumida em meses subsequentes, ou ser utilizado para compensação em outra unidade da Companhia de Saneamento responsável por esta ETE.

4.5.6 Análise dos dados de Produção Mensal de Energia Elétrica – ETEs 1, 2, 3 e 4

Os dados de Produção Mensal de Energia Elétrica das ETEs 1, 2, 3 e 4 estão representados na tabela 4.22. Na Figura 4.34 estão representados os histogramas de Produção Mensal de Energia Elétrica destas ETEs.

Verificou-se que os dados Produção Mensal Média de Energia Elétrica e desvio padrão possuem valores próximos nas ETEs 1, 2 e 3. Observa-se também um padrão no tipo da distribuição de probabilidade entre estas mesmas ETEs.

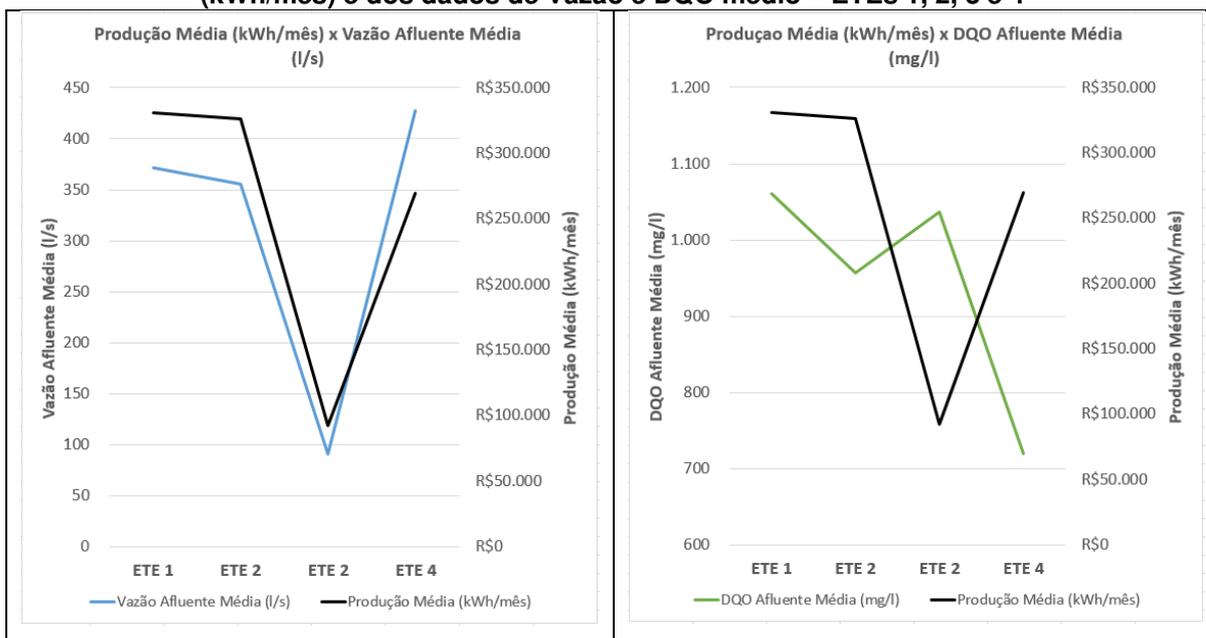
Ressalta-se a diferença entre as distribuições de probabilidades dos valores de produção diária e mensal de energia elétrica.

Tabela 4.22 - Resumo dos parâmetros estatísticos das séries de Produção de Energia Elétrica Mensal – ETEs 1, 2, 3 e 4
Fonte: Autoria Própria

Produção de Energia Elétrica Mensal (kWh/mês)	ETE 1	ETE 2	ETE 3	ETE 4
Produção Mínima (kWh/mês)	R\$187.666,33	201.855,63	47.688,20	123.989,99
Produção Máxima (kWh/mês)	R\$519.842,46	490.463,13	169.096,88	507.432,77
Produção Média (kWh/mês)	R\$330.990,64	326.348,03	91.906,28	269.601,38
Tamanho da Amostra (n)	60.000,00	60.000,00	60.000,00	60.000,00
Desvio Padrão (kWh/mês)	R\$40.623,82	36.061,67	13.396,17	47.104,88
Beta	0,050%	0,045%	0,060%	0,071%
Tipo da Distribuição	Log-normal μ : 12,702 σ : 0,123	Gama k: 81,899 θ : 3984,839	Log-normal μ : 11,418 σ : 0,145	Gama k: 32,976 θ : 8176,834

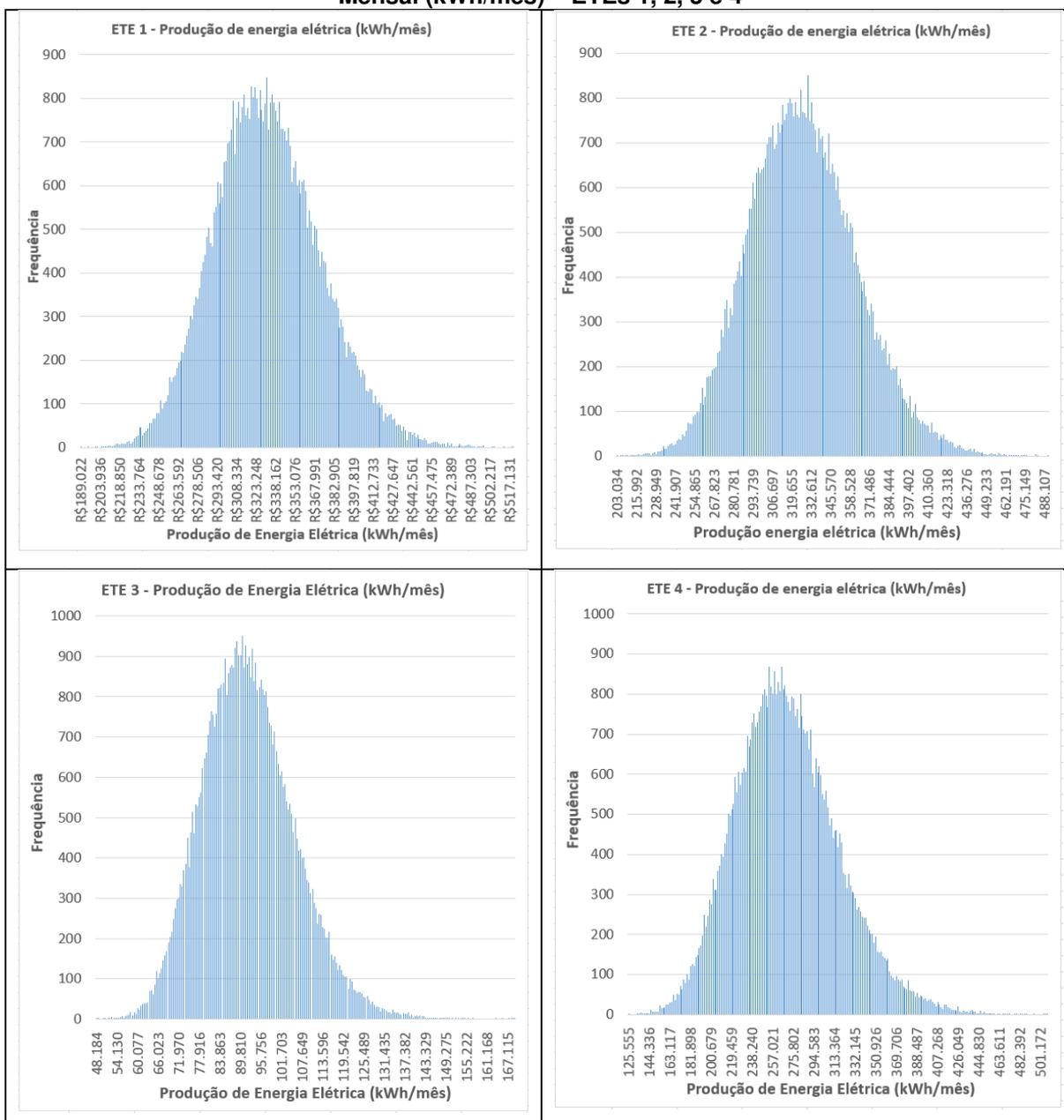
Conforme Figura 4.33 é possível verificar uma relação entre a Vazão Afluente Média e o Produção de Energia Elétrica média, porém para o caso da DQO Afluente Média não é possível notar uma relação com o Produção de Energia Elétrica média.

Figura 4.33 – Comparativo entre os valores de Produção Média Mensal de Energia Elétrica (kWh/mês) e dos dados de Vazão e DQO médio – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.34 - Distribuição de probabilidade dos valores de Produção de Energia Elétrica Mensal (kWh/mês) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

4.5.7 Análise dos dados de Custos Evitados / Ganho com a Geração de Energia Elétrica mensal – ETEs 1, 2, 3 e 4

Os dados dos Custos Evitados / Ganho com a Geração de Energia Elétrica Produção Mensal de Energia Elétrica das ETEs 1, 2, 3 e 4 estão representados na Tabela 4.23. Na Figura 4.36 estão representados os histogramas de Custos Evitados / Ganho com a Geração de Energia Elétrica Produção Mensal de Energia Elétrica.

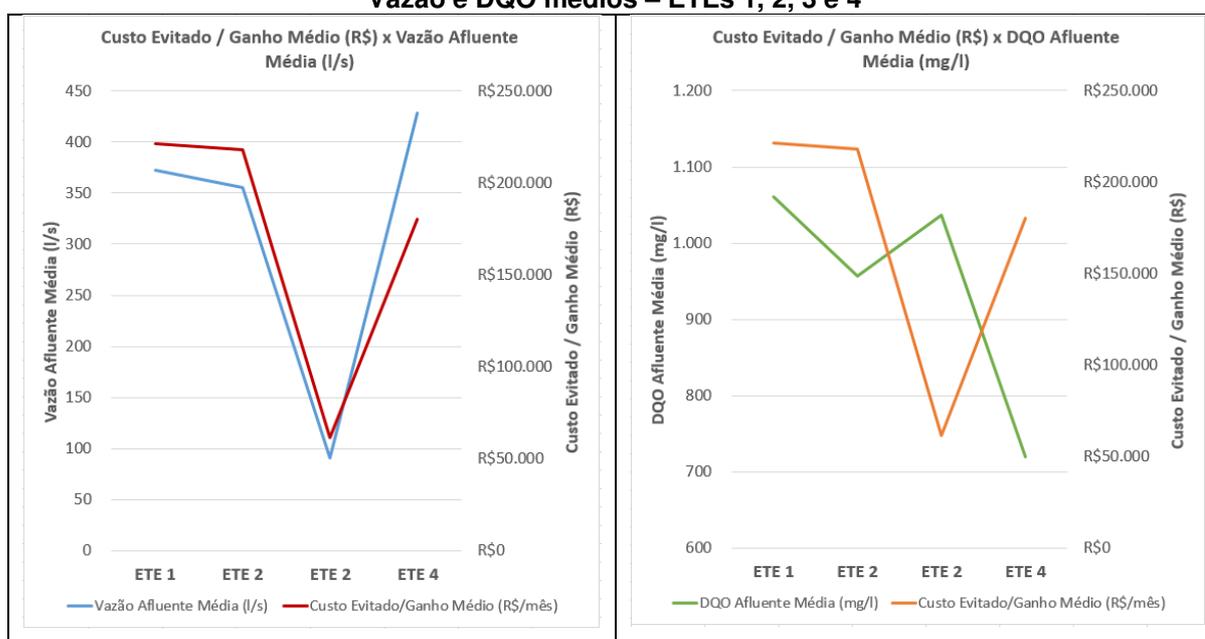
Verificou-se que os valores médios e desvio padrão possuem valores próximos nas ETEs 1 e 2. Observa-se que as distribuições de probabilidade possuem distribuições do tipo Lognormal para todos os casos.

Tabela 4.23 - Resumo dos parâmetros estatísticos das séries de Custos Evitados / Ganho com a Geração de Energia Elétrica Mensal – ETEs 1, 2, 3 e 4
Fonte: Autoria Própria

Custo evitado/Ganho com a geração de Energia Elétrica Mensal (R\$/mês)	ETE 1	ETE 2	ETE 3	ETE 4
Custo Evitado/Ganho Mínimo (R\$/mês)	R\$120.785,33	R\$125.880,70	R\$29.739,19	R\$77.322,33
Custo Evitado/Ganho Máximo (R\$/mês)	R\$376.167,10	R\$349.496,48	R\$122.361,46	R\$352.193,52
Custo Evitado/Ganho Médio (R\$/mês)	R\$221.272,88	R\$218.159,49	R\$61.427,72	R\$180.208,94
Tamanho da Amostra (n)	60.000,00	60.000,00	60.000,00	60.000,00
Desvio Padrão (R\$/mês)	R\$30.835,72	R\$28.075,09	R\$9.820,62	R\$33.651,70
Beta	0,057%	0,053%	0,065%	0,076%
Tipo da Distribuição	Log-normal μ : 12,297 σ : 0,139	Log-normal μ : 12,285 σ : 0,128	Log-normal μ : 11,013 σ : 0,159	Log-normal μ : 12,085 σ : 0,186

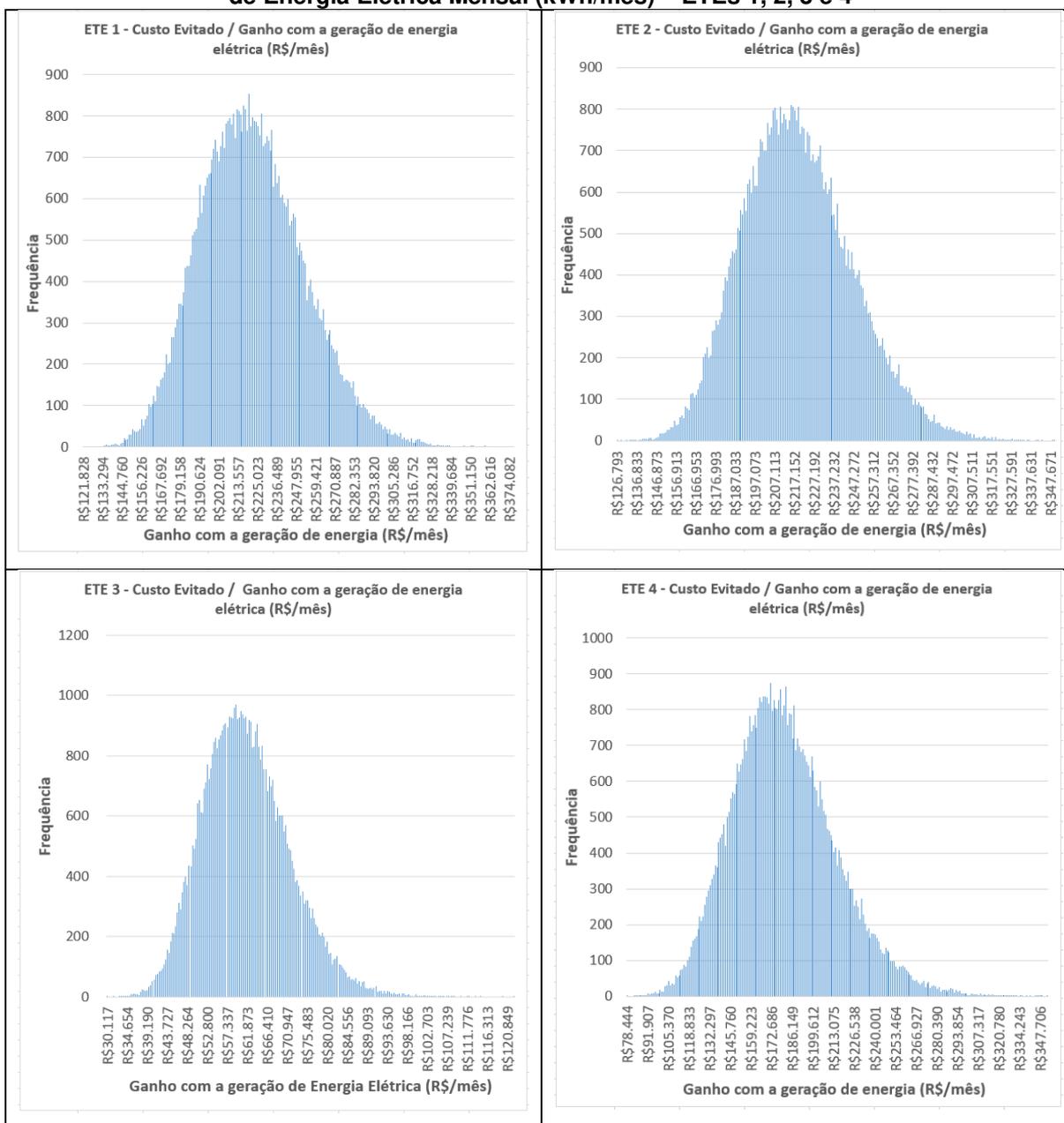
Conforme Figura 4.35 é possível verificar uma relação entre a Vazão Afluente Média e o Custo Evitado / Ganho médio, porém para o caso da DQO Afluente Média não é possível enxergar uma relação com o Custo Evitado / Ganho Médio.

Figura 4.35 – Comparativo entre os valores de Custo Evitado / Ganho Médio e dos dados de Vazão e DQO médios – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.36 - Distribuição de probabilidade dos valores de Custo evitado/Ganho com a geração de Energia Elétrica Mensal (kWh/mês) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

4.5.8 Análise dos VPLs – ETEs 1, 2, 3 e 4

Os dados dos VPLs das ETEs 1, 2, 3 e 4 estão representados na tabela 4.24. Na Figura 4.38 estão representados os histogramas dos VPLs.

Verificou-se que para a ETE 3, o VPL Médio é negativo, fato que torna o investimento nesta Estação não viável. Para as demais estações, os investimentos são viáveis. Os valores dos VPLs para as ETEs 1 e 2 são próximos. Conforme Figura

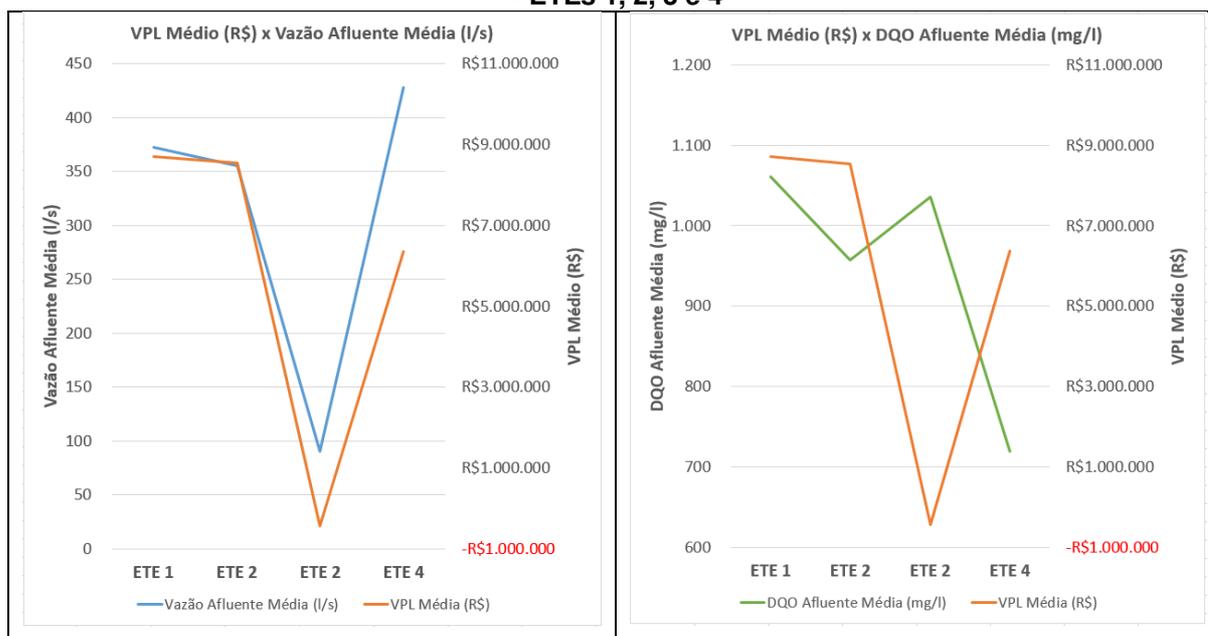
4.37 é possível verificar uma relação entre a Vazão Afluente Média e o VPL médio, porém para o caso da DQO Afluente Média não é possível enxergar uma relação com o VPL.

Tabela 4.24 - Resumo dos parâmetros estatísticos das séries de VPLs – ETEs 1, 2, 3 e 4
Fonte: Autoria Própria

DADOS VPL	ETE 1	ETE 2	ETE 3	ETE 4
VPL Mínima (R\$)	R\$5.635.026,10	R\$6.273.579,80	-R\$1.801.314,26	R\$3.970.669,59
VPL Máxima (R\$)	R\$11.873.173,75	R\$11.196.964,73	R\$899.614,25	R\$8.859.913,06
VPL Média (R\$)	R\$8.711.238,45	R\$8.542.111,43	-R\$443.897,88	R\$6.365.413,28
Tamanho da Amostra (n)	5.000,00	5.000,00	5.000,00	5.000,00
Desvio Padrão (R\$)	R\$813.000,45	R\$709.026,75	R\$445.218,96	R\$761.365,26
Beta	0,118%	0,116%	1,433%	0,168%
Tipo da Distribuição	Erlang k: 116,00 λ : 0,00	Normal μ : 8.542.111,43 σ : 709.026,75	Beta α : 3,847 ζ : 4,142 c: -1774654,19 d: 990640	Normal μ : 6.365.413,28 σ : 761.365,26

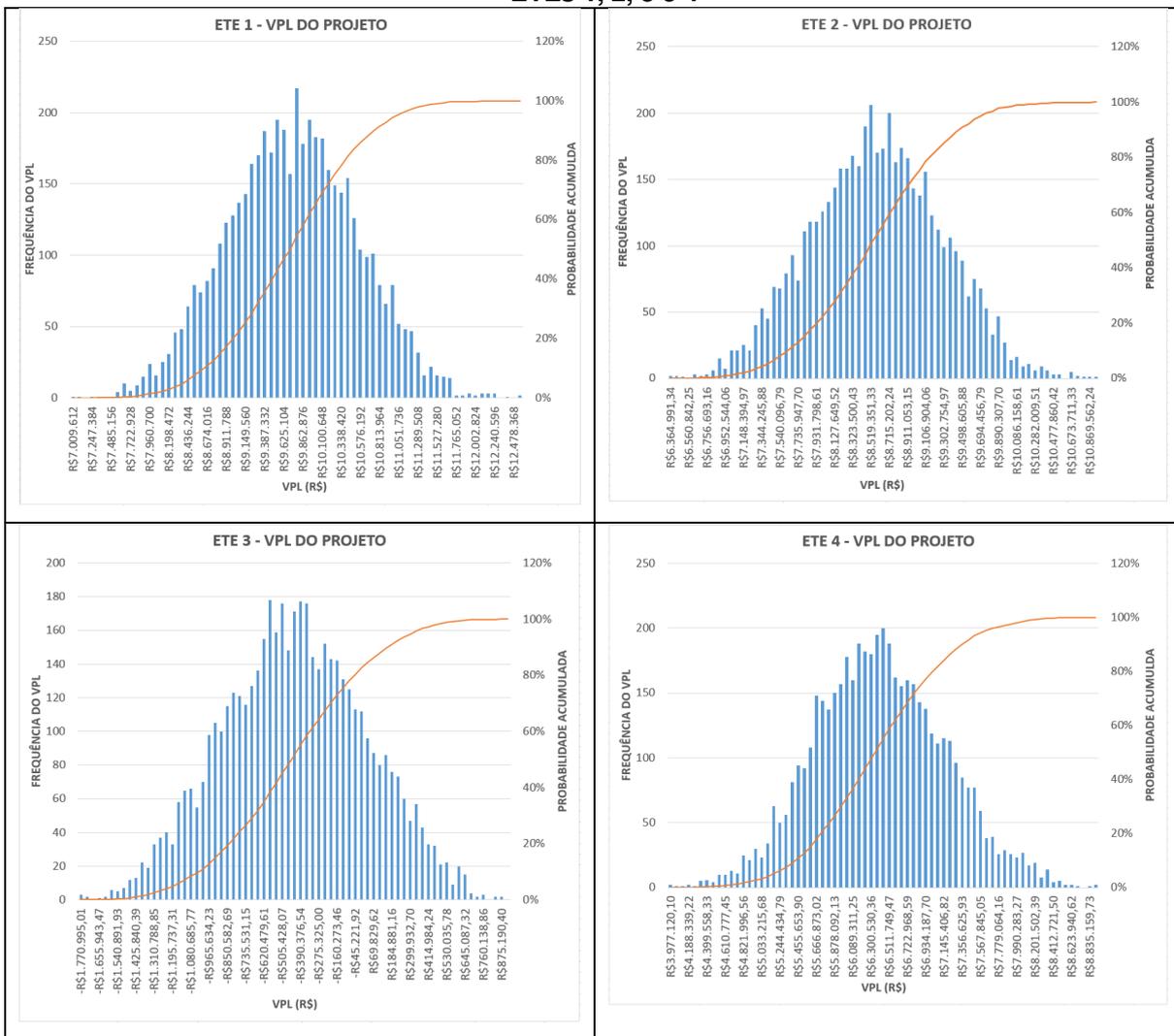
Pode-se observar que a ETE 3 não apresenta viabilidade devido ao valor do VPL ser negativo. Isto confirma os estudos realizados por Brasil (2016) que definem que ETEs com vazão média afluente menor que 250 l/s não apresentam viabilidade para o aproveitamento energético do biogás.

Figura 4.37 – Comparativo entre os valores de VPL Médio e dos dados de Vazão e DQO médios – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

Figura 4.38 - Distribuições de Probabilidade e Curvas de Probabilidade Acumulada dos VPL – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

4.5.9 Análise dos VaR e CVaR – ETEs 1, 2, 3 e 4

Os dados dos VaR e CVaR das ETEs 1, 2, 3 e 4 estão representados na tabela 4.25. Verifica-se que para a ETE 3, todos os valores apresentados são negativos e representam que em todos os casos há prejuízo para os graus de confiança de 95%, 99% e 99,9%. Para as demais ETEs, os valores apresentados são positivos, representando que há ganhos mínimos para graus de confiança de 95%, 99% e 99,9%.

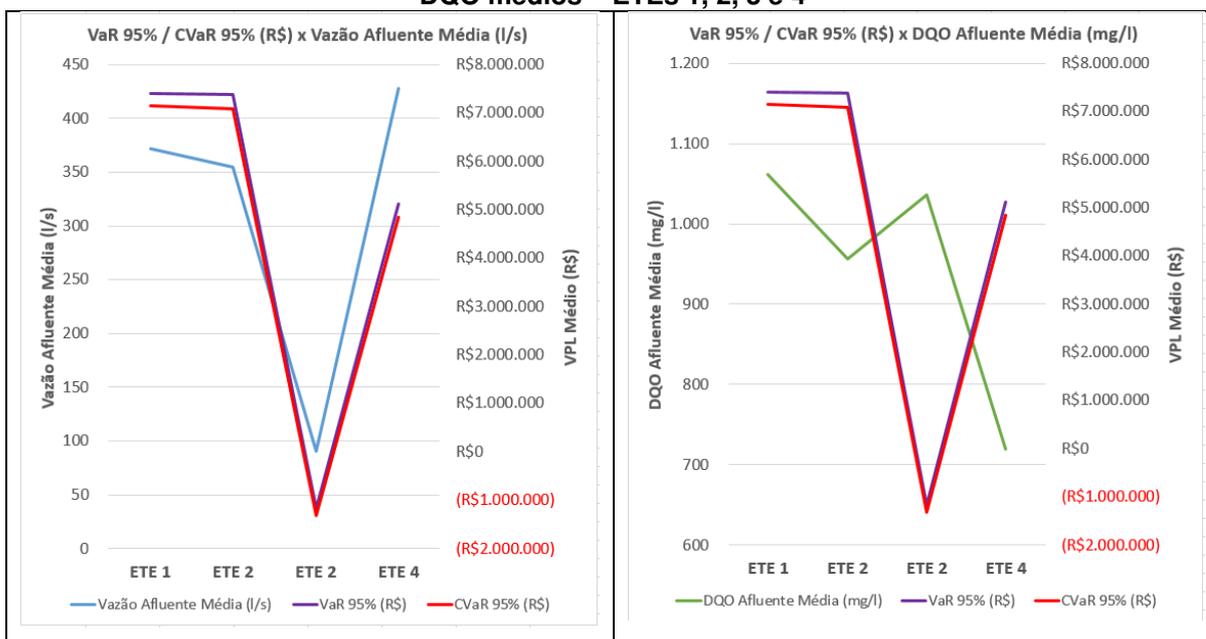
Conforme Figura 4,39 é possível verificar uma relação entre a Vazão Afluente Média e o VaR 95% / CVaR 95%, porém para o caso da DQO Afluente Média não é possível enxergar uma relação com o VaR 95% / CVaR 95%.

Tabela 4.25 - Resumo dos valores de VaR e CVaR – ETEs 1, 2, 3 e 4
Fonte: Autoria Própria

DADOS VaR / CVaR	ETE 1	ETE 2	ETE 3	ETE 4
VaR 95% (R\$)	R\$7.395.673,95	R\$7.368.628,44	-R\$1.170.463,59	R\$5.120.466,07
VaR 99% (R\$)	R\$6.905.020,31	R\$6.940.047,40	-R\$1.429.053,49	R\$4.696.022,14
VaR 99,9% (R\$)	R\$6.425.777,21	R\$6.550.953,60	-R\$1.687.190,52	R\$4.246.119,92
CVaR 95% (R\$)	R\$7.136.492,78	R\$7.080.842,22	-R\$1.327.542,93	R\$4.850.355,34
CVaR 99% (R\$)	R\$6.682.771,32	R\$6.757.159,12	-R\$1.544.799,70	R\$4.467.823,85
CVaR 99,9% (R\$)	R\$6.030.401,65	R\$6.467.741,46	-R\$1.732.840,01	R\$4.131.348,95

Observa-se que para a ETE 3, os valores de VaR e CVaR são negativos. Isto confirma sob a ótica da determinação do risco de investimento que, conforme os estudos realizados por Brasil (2016), ETEs com vazão média afluente menor que 250 l/s não apresentam viabilidade para o aproveitamento energético do biogás.

Figura 4.39 – Comparativo entre os valores de VaR 95% / CVaR 95% e dos dados de Vazão e DQO médios – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

4.5.10 Análise de Sensibilidade – ETEs 1, 2, 3 e 4

Para determinar os valores do VPL Médio e dos Valores de Var e CVaR das ETEs 1, 2, 3 e 4 foram utilizados os mesmos valores de custos operacionais (custos com pessoal para operação do sistema, material para operação e manutenção do sistema, serviço de terceiros e despesas operacionais), investimento (aplicação) e tempo de duração do projeto. Em função disto, foi possível observar que para algumas ETEs o projeto foi muito atrativo e viável, porém para outras o projeto não se tornou viável. Em função disto, foi realizada a análises de sensibilidade para verificar em qual ponto o projeto torna-se viável.

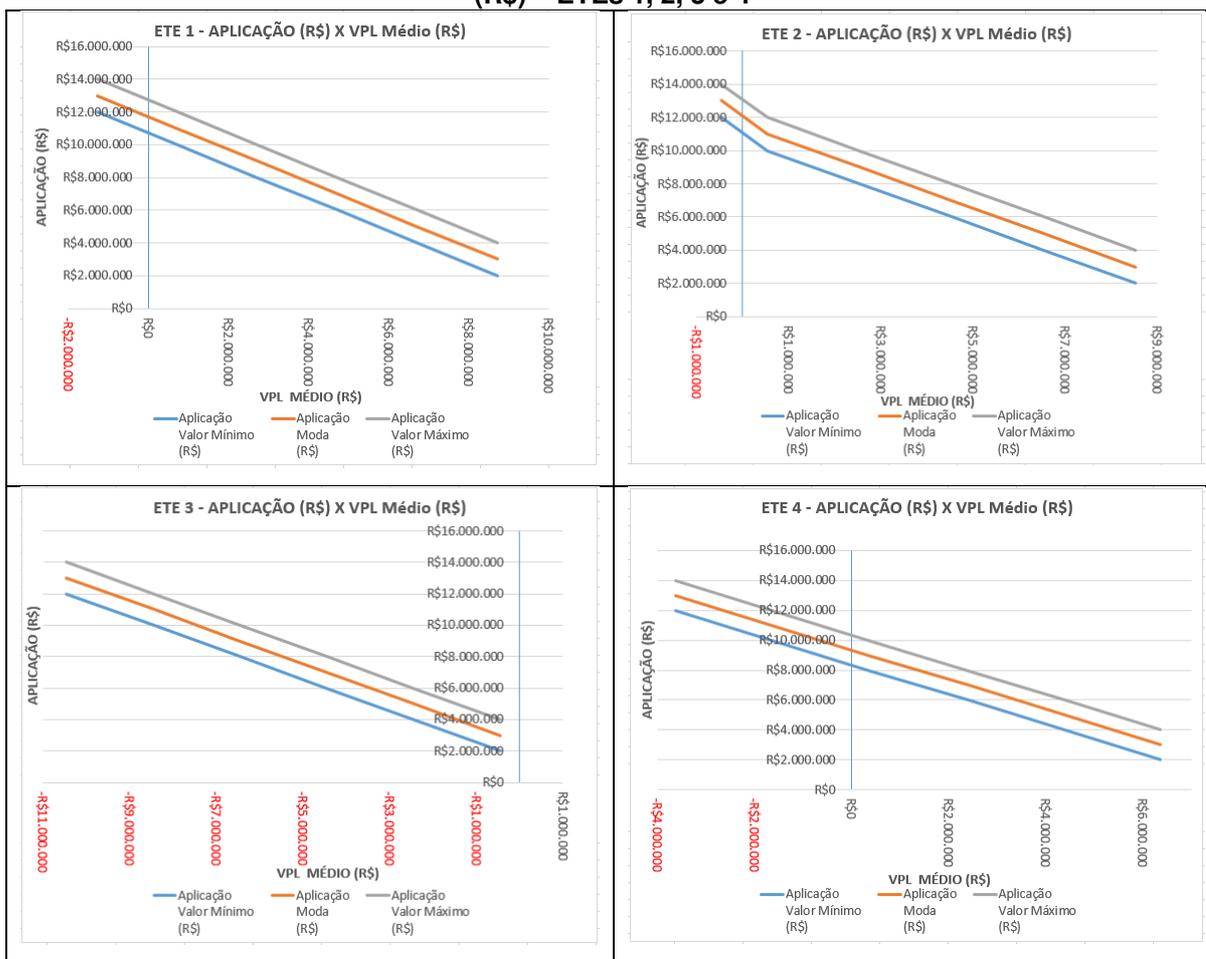
Devido aos valores de custos operacionais, investimento (aplicação) e tempo de duração do projeto seguirem uma distribuição triangular, os valores máximos de mínimos, bem como a moda foram representados nestes gráficos.

4.5.10.1 Análise de Sensibilidade do VPL Médio, VaR 95% e CVaR 95% em relação a variação dos valores de aplicação – ETEs 1, 2, 3 e 4

Para todos os casos é possível verificar que as variáveis se comportam de forma linear. O valor de investimento (aplicação) é inversamente proporcional ao valor do VPL médio. Para a Figura 4.40 é possível verificar que para as ETEs 1 e 2 o valor

de investimento (aplicação) que torna o projeto viável deve ser menor que aproximadamente R\$ 12.000.000,00. Para a ETE 4 este valor está próximo deve ser menor que aproximadamente R\$ 9.000.000,00. No caso da ETE 3 o valor aproximado de investimento (aplicação) para tornar o projeto viável deve ser menor que R\$ 2.000.000,00.

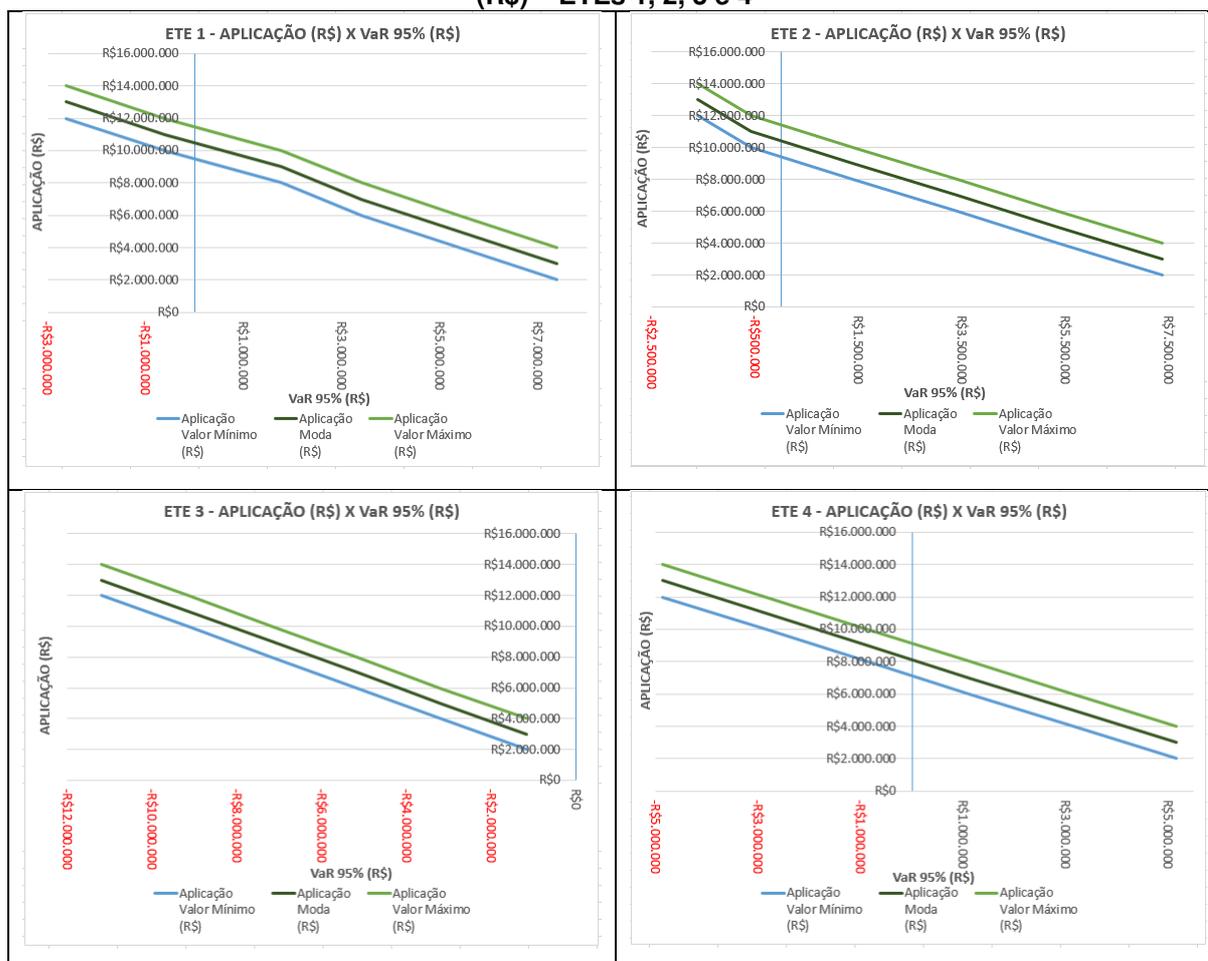
Figura 4.40 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$) em relação a variação da Aplicação (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

O valor de investimento (aplicação) é também inversamente proporcional ao valor de VaR 95% do VPL. Através da Figura 4.41 observa-se que para as ETEs 1 e 2, o VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o investimento (aplicação) é de aproximadamente R\$ 10.500.000,00. Para o caso da ETE 4 este valor é de aproximadamente R\$ 9.000.000,00. No caso da ETE 3, o valor de VaR 95% é de aproximadamente R\$ 2.000.000,00.

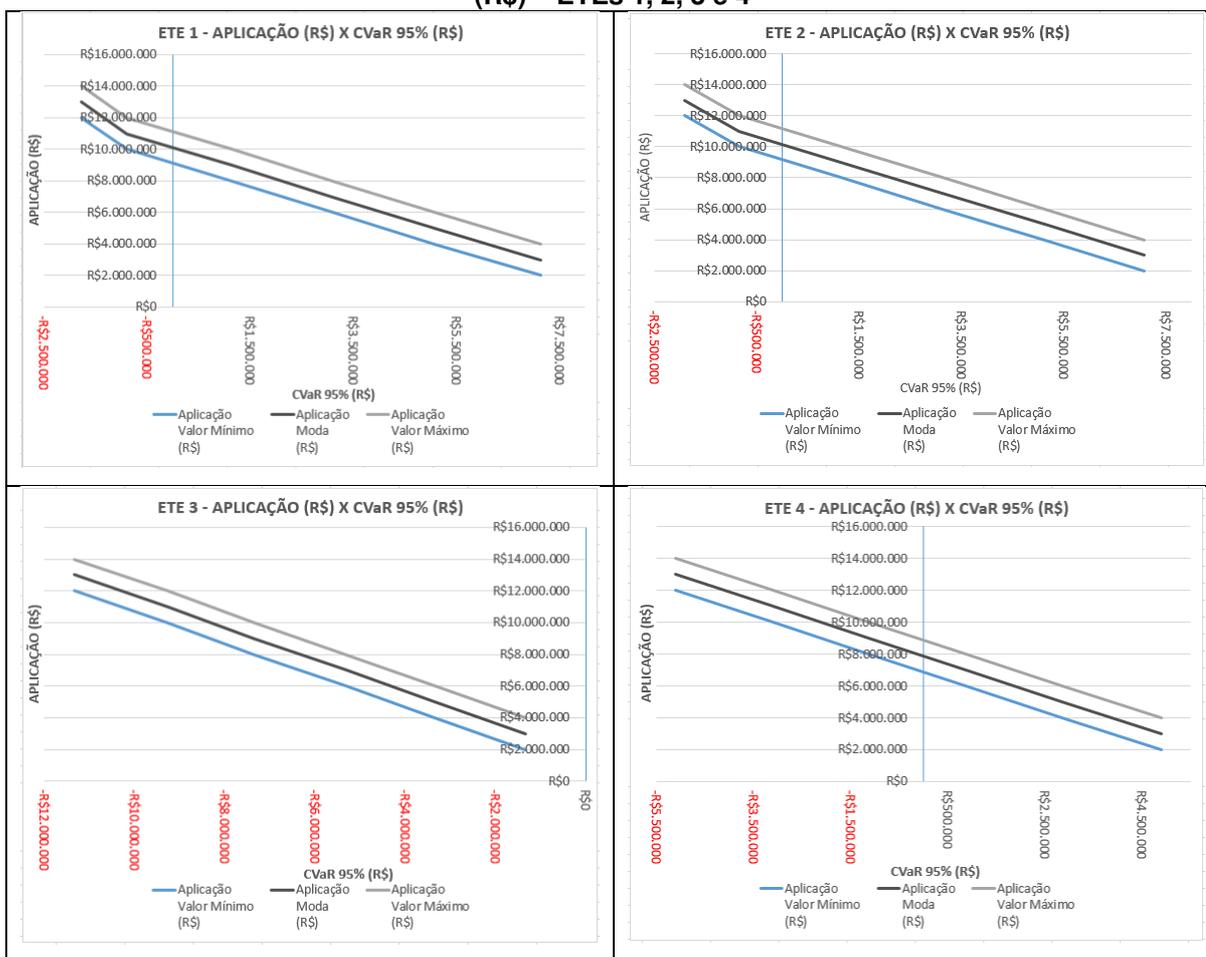
Figura 4.41 – Curvas de sensibilidade do VaR 95% (R\$) em relação a variação da Aplicação (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

O valor de investimento (aplicação) é também inversamente proporcional ao valor de CVaR 95% do VPL. Através da Figura 4.42 observa-se que para as ETEs 1 e 2, o VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o investimento (aplicação) é de aproximadamente R\$ 10.000.000,00. Para o caso da ETE 4 este valor é de aproximadamente R\$ 8.000.000,00. No caso da ETE 3, o valor de VaR 95% é de aproximadamente R\$ 1.800.000,00.

Figura 4.42 – Curvas de sensibilidade do CVaR 95% (R\$) em relação a variação da Aplicação (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4

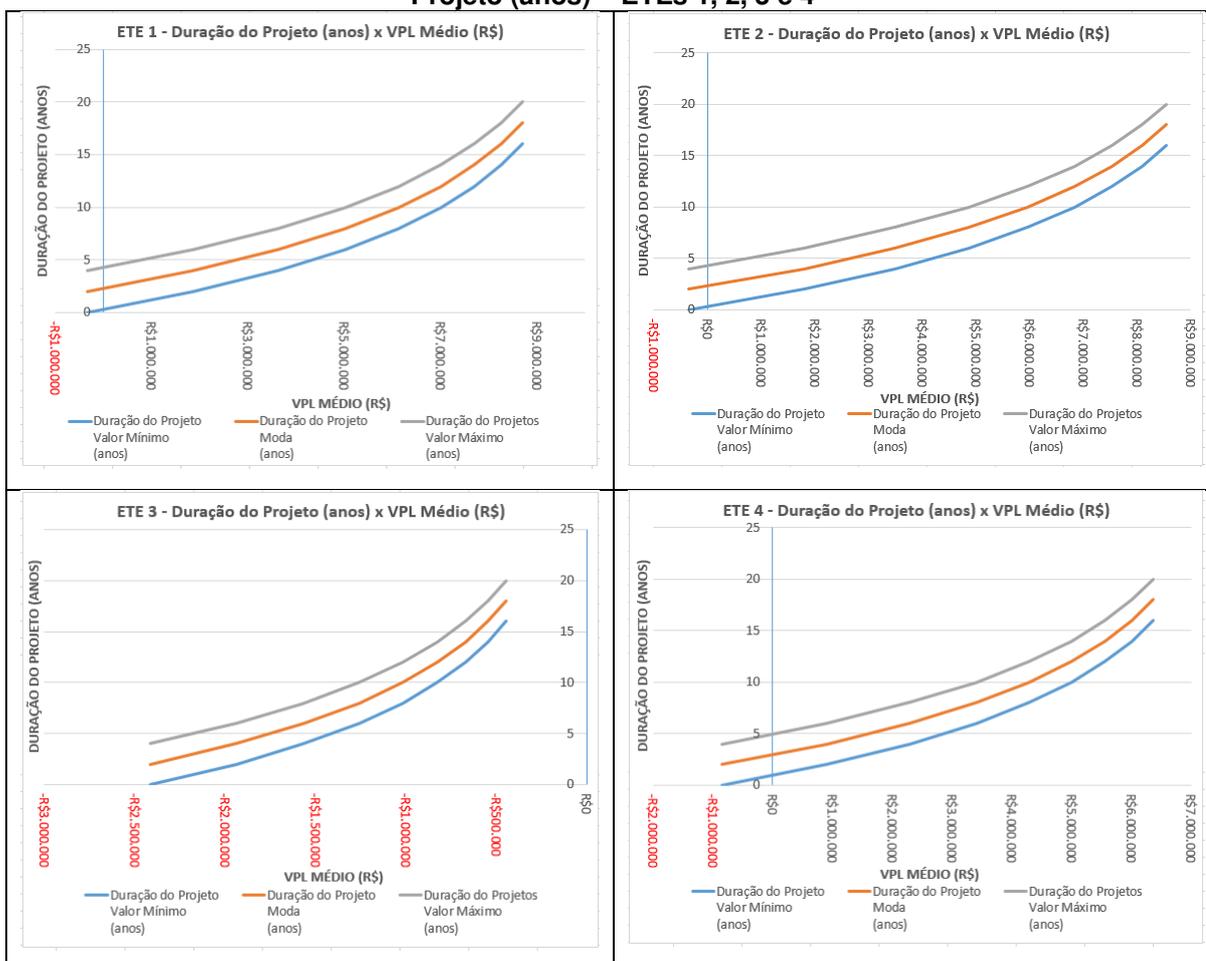


Fonte: Autoria Própria

4.5.10.2 Análise de Sensibilidade do VPL Médio, VaR 95% e CVaR 95% em relação a variação da duração do projeto – ETEs 1, 2, 3 e 4

Para todos os casos é possível verificar que as variáveis se comportam de com o mesmo formato de curva. O tempo de duração do projeto é diretamente proporcional ao valor do VPL médio. Para a Figura 4.43 é possível verificar que para as ETEs 1, 2 e 4, o tempo mínimo aproximado para tornar o projeto viável é dois anos. No caso da ETE 3, o tempo mínimo para torná-lo viável supera os vinte anos.

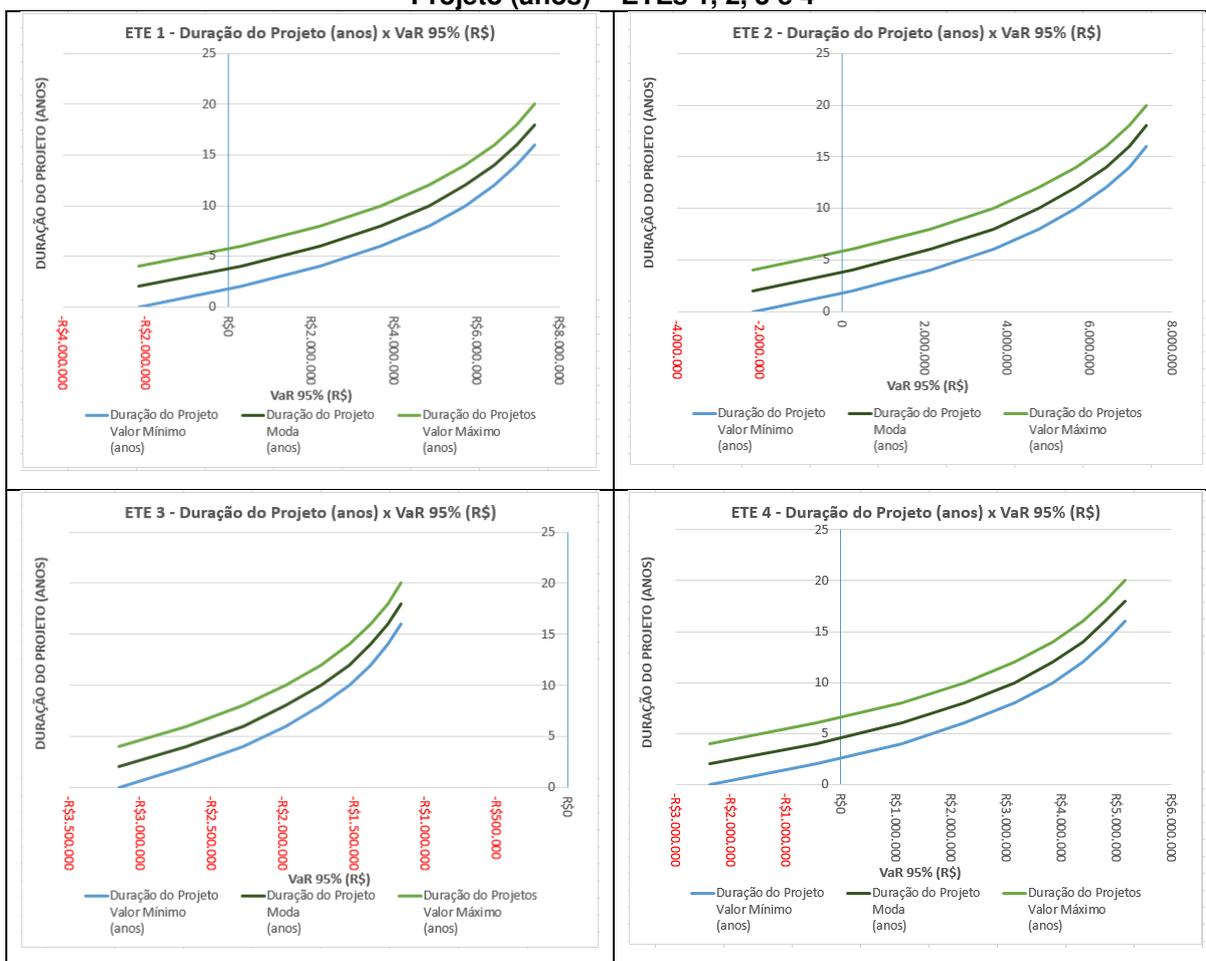
Figura 4.43 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$) em relação a variação da Duração do Projeto (anos) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

O tempo de duração do projeto é também diretamente proporcional ao valor de VaR 95% do VPL e suas curva no gráfico são semelhantes entre si, levando em conta a sua proporcionalidade. Através da Figura 4.44 observa-se que para as ETEs 1, 2 e 4, o VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o tempo de duração do projeto for de aproximadamente 4 anos. No caso da ETE 3, o valor de VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 para tempos de duração do projeto superiores a 25 anos.

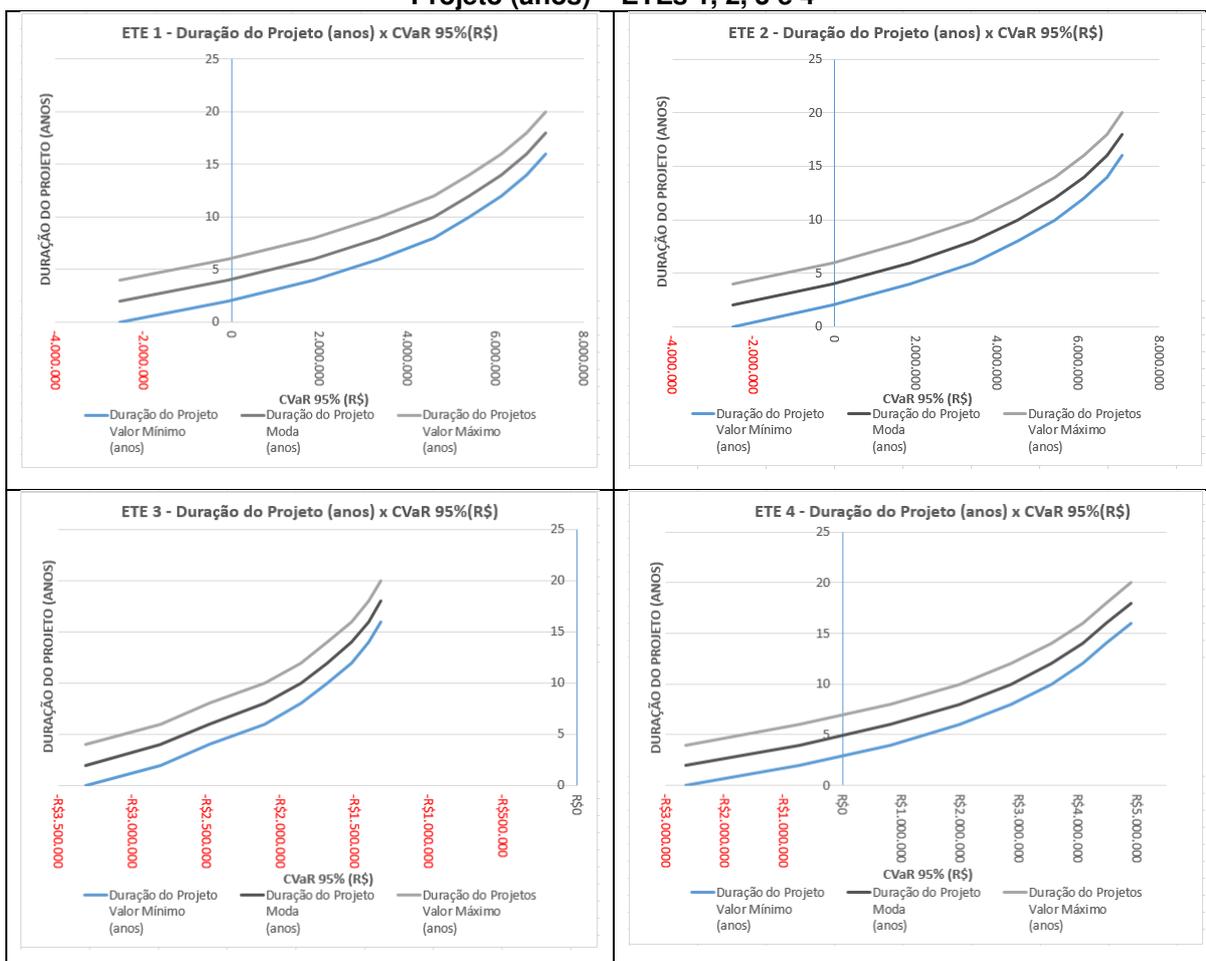
Figura 4.44 – Curvas de sensibilidade de VaR 95% (R\$) em relação a variação da Duração do Projeto (anos) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

O tempo de duração do projeto é também diretamente proporcional ao valor de CVaR 95% do VPL e suas curva no gráfico são semelhantes entre si, levando em conta a sua proporcionalidade. Através da Figura 4.45 observa-se que para as ETEs 1, 2 e 4, o VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o tempo de duração do projeto for de aproximadamente 4 anos. No caso da ETE 3, o valor de VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 para tempos de duração do projeto superiores a 25 anos.

Figura 4.45 – Curvas de sensibilidade de CVaR 95% (R\$) em relação a variação da Duração do Projeto (anos) – ETEs 1, 2, 3 e 4

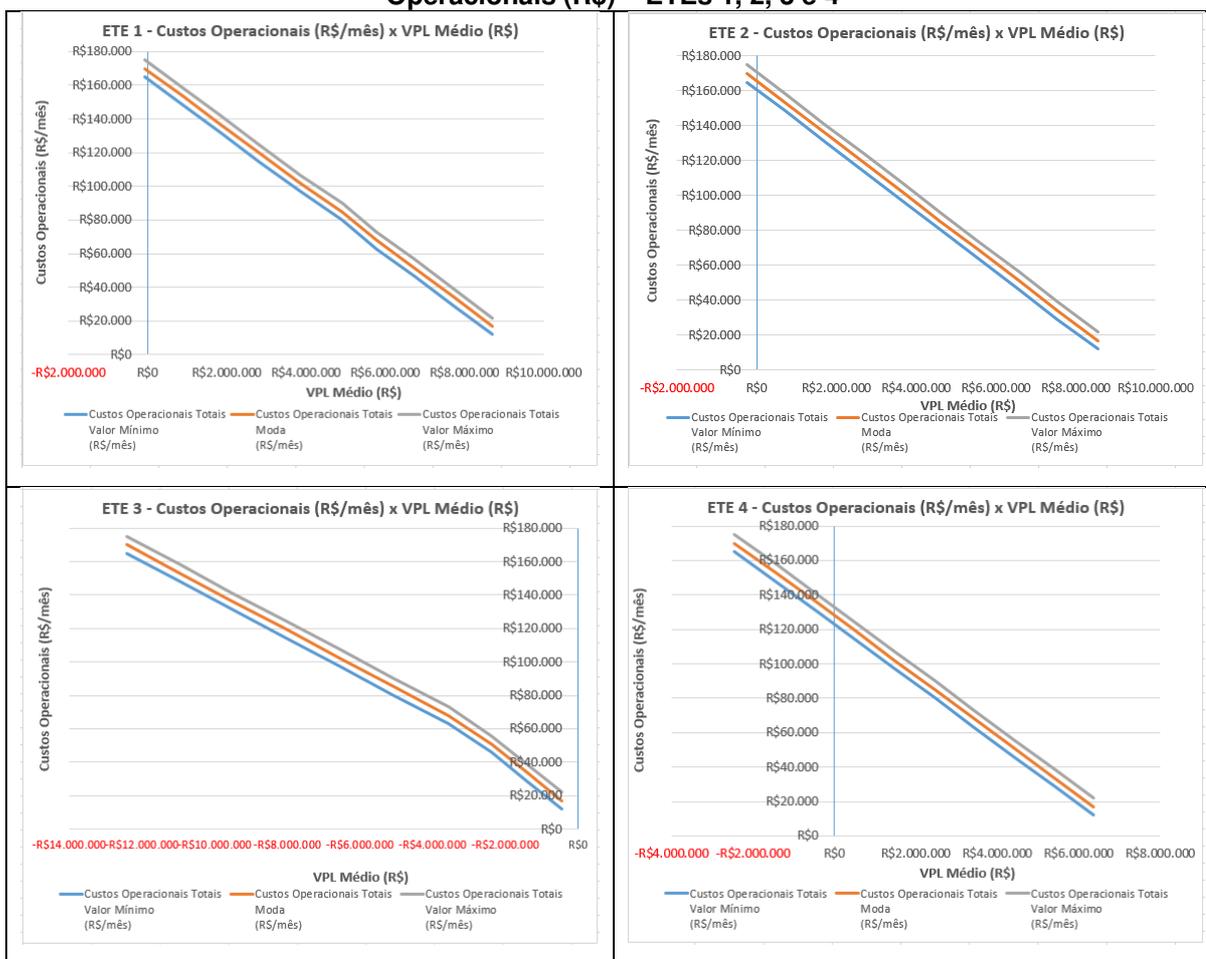


Fonte: Autoria Própria

4.5.10.3 Análise de Sensibilidade do VPL Médio, VaR 95% e CVaR 95% em relação a variação dos Custos Operacionais Mensais – ETEs 1, 2, 3 e 4

Para todos os casos é possível verificar que as variáveis se comportam de forma linear. O valor do custo operacional é inversamente proporcional ao valor do VPL médio. Para a Figura 4.46 é possível verificar que para as ETEs 1 e 2 o valor do Custo Operacional que torna o projeto viável deve ser menor que aproximadamente R\$ 170.000,00. Para a ETE 4 este valor deve ser menor que aproximadamente R\$ 140.000,00, e para a ETE 3 deve ser menor que aproximadamente R\$ 18.000,00.

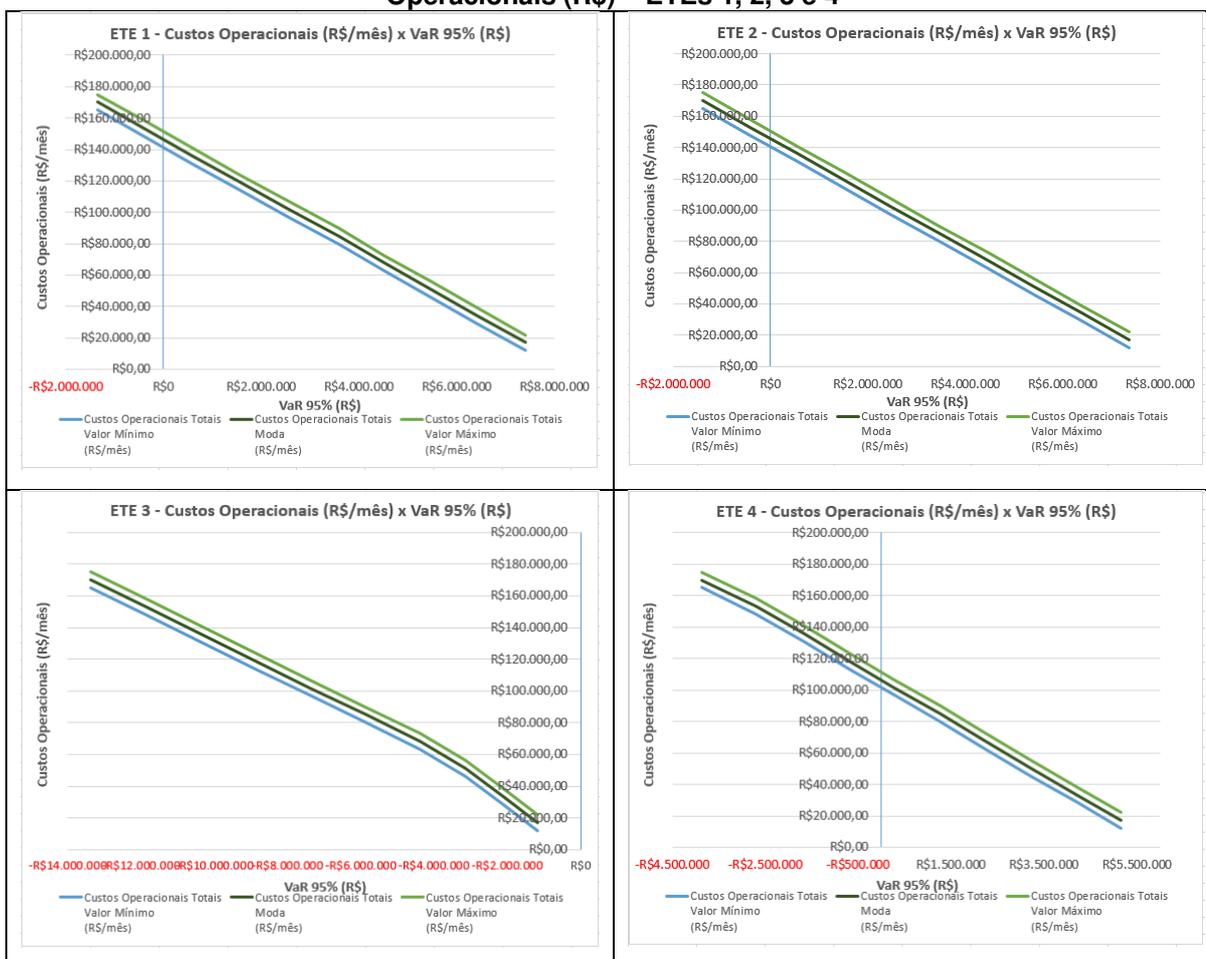
Figura 4.46 – Curvas de sensibilidade de VPL Médio (R\$) em relação a variação dos Custos Operacionais (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

O valor do custo operacional é também inversamente proporcional ao valor de VaR 95% do VPL. Através da Figura 4.47 observa-se que para as ETEs 1 e 2, o VaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o custo operacional for de aproximadamente R\$ 150.000,00. Para o caso da ETE 4 este valor é de aproximadamente R\$ 110.000,00 e para a ETE 3 este valor deve ser de R\$ 20.000,00.

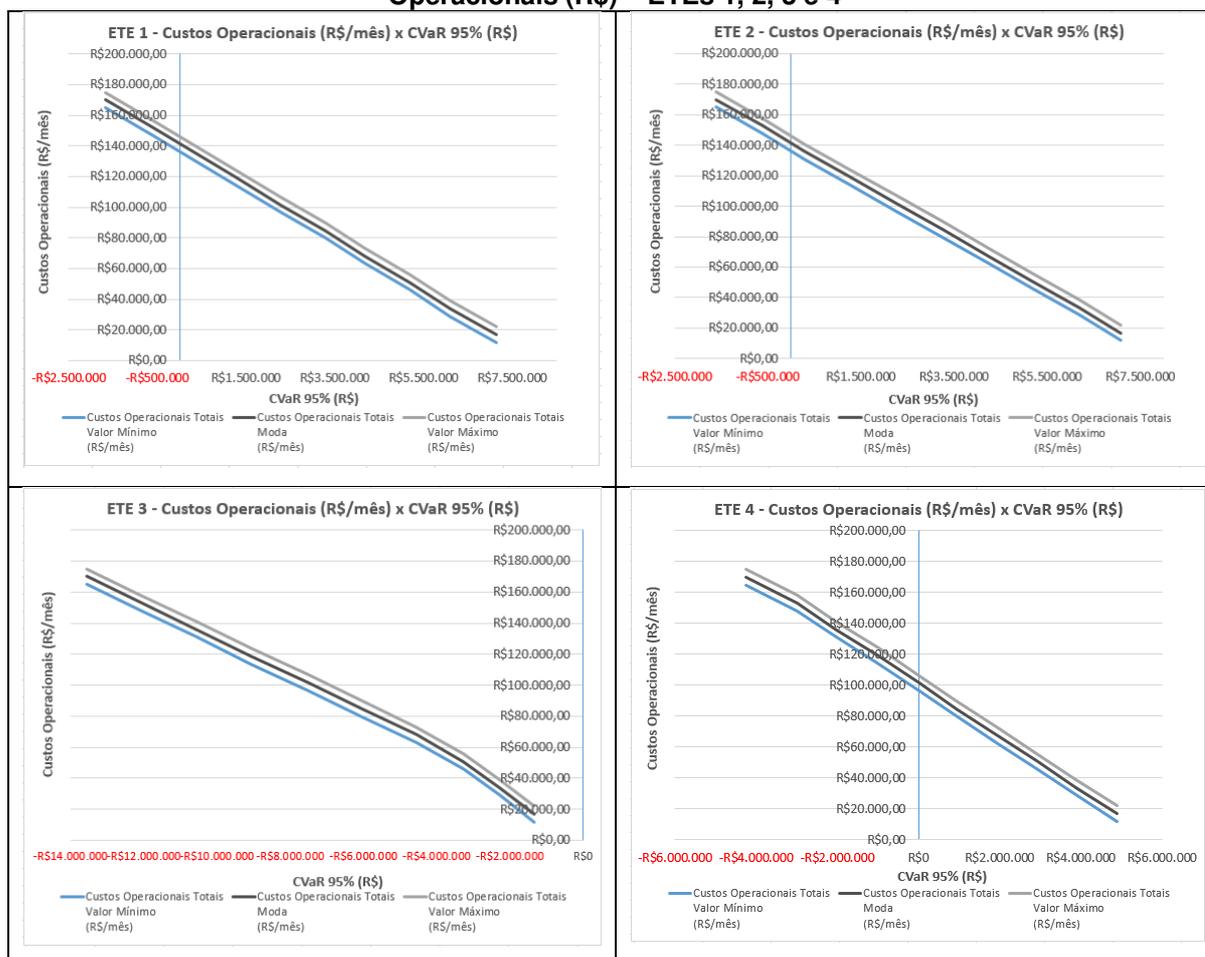
Figura 4.47 – Curvas de sensibilidade de VaR 95% (R\$) em relação a variação dos Custos Operacionais (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

O valor do custo operacional é também inversamente proporcional ao valor de CVaR 95% do VPL. Através da Figura 4.48 observa-se que para as ETEs 1 e 2, o CVaR 95% no projeto é igual a R\$ 0,00 quando o custo operacional for de aproximadamente R\$ 140.000,00. Para o caso da ETE 4 este valor é de aproximadamente R\$ 100.000,00 e para a ETE 3 este valor deve ser de R\$ 10.000,00.

Figura 4.48 – Curvas de sensibilidade de CVaR 95% (R\$) em relação a variação dos Custos Operacionais (R\$) – ETEs 1, 2, 3 e 4



Fonte: Autoria Própria

Observa-se que para as três análises de sensibilidade realizadas para as quatro ETEs estudadas, os valores que representam a ETE 03 confirmam os estudos realizados por Brasil (2016), que ETEs com vazão média afluyente menor que 250 l/s não apresentam viabilidade para o aproveitamento energético do biogás.

4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, baseado nos dados de processo medidos para a ETE estudada, observou-se através de simulações e análises que a implantação de uma central de geração de energia elétrica, cuja fonte primária é o biogás produzido nesta Estação, é viável. A partir deste ponto, foi apresentado também o risco de investimento determinado através das ferramentas VaR e CVaR, para graus de confiança de 95%, 99% e 99,9%.

Visando dar robustez ao método proposto, foram realizadas para outras três ETEs, simulações para verificar se a implantação de uma central de geração de energia elétrica, possui viabilidade técnica-econômica, e quais são os seus riscos para o investidor.

No próximo capítulo são apresentadas as conclusões deste trabalho, e as sugestões para trabalhos futuros.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentado uma metodologia de análise de risco de investimento em sistemas de geração distribuída a partir de biogás produzido em estações de tratamento anaeróbio de esgoto doméstico.

Visando alcançar este objetivo, necessitou-se desenvolver procedimentos e metodologias de análise de viabilidade técnica-econômica utilizando a análise de VPL e de sensibilidade, e de análise de risco utilizando as ferramentas VaR e CVaR, bem como Simulação de Monte Carlo. Visando dar robustez ao método, foi desenvolvido um estudo de caso de análise de viabilidade técnica-econômica, e de risco de investimento, para quatro Estações de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Doméstico.

Para o desenvolvimento da metodologia, inicialmente elaborou-se uma Função de Conversão para determinar a produção diária de CH₄ em Estações de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Doméstico. A Função de Conversão foi baseada no *software* ProBio 1.0, na metodologia de produção de CH₄ proposta por Lobato (2011), e em adaptações realizadas no cálculo de determinação da concentração de metano do biogás, em função da concentração do DQO total do afluente. A partir da definição da função de conversão, elaborou-se a metodologia que considerou: a produção de CH₄ através da amostragem de dados baseados parâmetros estatísticos e não determinísticos; a produção diária e mensal de energia elétrica; variação das modalidades das bandeiras tarifárias baseada no histórico de utilização; a análise de viabilidade técnica-econômica, utilizando de parâmetros como modalidade tarifária, bandeira tarifária, custos de operação e manutenção da central geradora, valores de investimento, impostos, duração do projeto, custo de capital, fluxos de caixa de operacionais e de investimento, impostos e VPL; e a análise de risco através das ferramentas VaR e CVaR, bem como a análise de sensibilidade.

Na fase de simulações e resultados, inicialmente, apresentou-se as características da ETE que iria receber o estudo de caso. A partir da aplicação da metodologia proposta nos dados operacionais desta ETE levantados em campo, foi possível determinar através do valor médio positivo do VPL, que o investimento é viável. Identificou-se para a análise de risco de investimento, através das ferramentas VaR e CVaR (graus de confiança 95%, 99% e 99,9%), que não há perdas para o investidor, sendo informado valores mínimos de ganho com este investimento. Foram

encontrados, através da análise de sensibilidade que: as variações dos valores de investimentos são inversamente proporcionais as variações dos valores de VPL, VaR (95%) e CVaR (95%); a variação do tempo de duração do projeto é diretamente proporcional as variações dos valores de VPL, VaR (95%) e CVaR (95%), e a variação do custo operacional é inversamente proporcional aos valores de VPL, VaR (95%) e CVaR (95%). Também através desta análise levantou-se os valores mínimos de investimento, tempo de duração do projeto e dos custos operacionais que tornam o investimento viável economicamente.

Após realizar a análise na ETE citada, visando dar robustez ao método, foram feitas as mesmas simulações de viabilidade técnica-econômica e do risco de investimento para outras três ETEs. Observou-se que para duas ETEs, a implantação de central de geração de energia elétrica é viável (VPLs positivos). Ao realizar a análise do risco VaR e CVaR (graus de confiança 95%, 99% e 99,9%), constatou-se que para este investimento, não há perdas para o investidor baseados nos graus de confiança definidos durante a análise. Realizou-se análise de sensibilidade para estas três ETEs, e comprovou-se que elas possuem as mesmas proporcionalidades nos resultados.

No caso de uma das três ETEs, que apresenta vazão média afluyente de aproximadamente de 90 l/s, a implantação da central de geração de energia elétrica esta não apresentou viabilidade (VPL negativo), e consequentemente os valores de VaR e CVaR (graus de confiança 95%, 99% e 99,9%) apresentaram as máximas perdas que o investidor poderia ter, caso o investimento fosse realizado. Em relação a análise de sensibilidade, para que este investimento seja viável, torna-se necessário que o valor investido não fosse superior a aproximadamente R\$ 2.000.000,00, ou tenha um tempo de duração do projeto acima dos 25 anos, ou tenha um custo operacional abaixo de R\$ 15.000. Isto comprovou os estudos realizados por Brasil (2016), que ETEs com vazão média afluyente menor que 250 l/s não apresentam viabilidade para o aproveitamento energético do biogás.

Ao realizar uma análise comparativa entre os valores de produção média diária de CH₄, produções médias diária e mensal de energia elétrica, custos evitados (mensal) / ganho (mensal) com geração de energia elétrica, VPLs médios, VaR (95%) e CVaR (95%), com os valores médios de vazão e DQO do afluyente, observou-se interdependências com os dados de vazão média do afluyente. Para os casos de DQO médio não se observou esta interdependência.

Em função dos resultados apresentados nas análises, foi possível verificar estes são satisfatórios, e que a metodologia proposta para análises de viabilidade técnica-econômica, de risco de investimento e sensibilidade, pode ser utilizada para implantação de centrais de geração de energia elétrica em Estações de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Doméstico.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir deste estudo, sugere-se para trabalhos futuros os seguintes temas:

- a) Elaboração de metodologia de análise de viabilidade técnica-econômica e de risco de investimento, aplicado em sistemas de geração distribuída a partir de biogás gerado em biodigestores de estações de tratamento aeróbio de esgoto doméstico; em aterros sanitários; e por meio do substrato da pecuária (dejetos de animais);
- b) Elaboração de metodologia de análise de viabilidade técnica-econômica e de risco de investimento, aplicado em sistemas de secagem térmica do lodo de ETEs e gaseificação do biogás;
- c) Comparativo das produções diárias de CH_4 e energia elétrica entre ETEs com características similares (vazão e DQO do afluente, e processo de tratamento), porém situados em cidades diferentes.
- d) Inclusão das receitas de venda de créditos de carbono nesta metodologia proposta;
- e) Elaborar metodologia de análise de VaR e CVaR para análise do risco de produção diária de CH_4 e Energia Elétrica;
- f) Refinamento no processo de definição dos custos de investimentos e operacionais para implantação e operação de uma Estação de Tratamento Anaeróbio de Esgoto Doméstico.
- g) Determinação do porte mínimo de Estações de Tratamento Anaeróbios de Esgoto Doméstico visando encontrar viabilidade técnica econômica, por meio da metodologia proposta;

REFERÊNCIAS

AAT CONSULTORIA E ENGENHARIA AMBIENTAL. **Estudo de Impacto de Vizinhança – EIV – CS Bioenergia S.A.** Pinhais, 2017. Disponível em http://conselhos.sjp.pr.gov.br/wp-content/uploads/2017/07/CSBioenergia_S%C3%A3oJos%C3%A9.pdf. Acesso em: 25 mar. 2019.

AFONSO, Alexandre Guazelli. **Infra-estrutura e crescimento econômico**. 2000. Dissertação (Mestrado em Economia de Empresas) – Fundação Getúlio Vargas (EAESP/FGV), São Paulo, 2000. Disponível em: <http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/1836/1200100031.pdf>. Acesso em: 24 out. 2016.

ANEEL. **Brasil ultrapassa marca de 1GW em geração distribuída**. 2019. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-marca-de-1gw-em-geracao-distribuida/656877>. Acesso em: 12 out. 2019.

ANEEL. **Matriz de energia elétrica**. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cf> m. Acesso em: 01 de jul. 2019.

ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST – MÓDULO 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. Revisão 5. Data de vigência: 14/12/2012. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo3_Revisao_5_Retifica%C3%A7%C3%A3o_1.pdf. Acesso em: 05 nov. 2015.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2015.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2019.

ANEEL. **Resolução Normativa nº 786, de 17 de outubro de 2017**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2017786.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2019.

ANEEL – **Resultados da Conta Bandeira**. Disponível em: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojOWZiMjk2NzUtOWNiYi00OWUyLTljNTktNmRjZmRkNjcwYTM5IiwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYtctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em 29 jul. 2019.

ARFUX, G. A. B. **Gerenciamento de riscos na comercialização de energia elétrica com uso de instrumentos derivativos**: uma abordagem via teoria de portfólios de Markowitz. 2004. Dissertação. (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica). Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/86923/228653.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 16 mai. 2017.

BRASIL. **1º balanço completo do PAC 2 (janeiro a junho de 2011)**. 2011. Disponível em: <http://www.pac.gov.br/pub/up/relatorio/49d8db11c7ce9549ca01e831e502d23e.pdf>. Acesso em: 25 out. 2016.

BRASIL. **11º Balanço completo do PAC - 4 anos (2007 a 2010)**. 2010. Disponível em: <http://www.pac.gov.br/pub/up/relatorio/6c57986d15d0f160bc09ac0bfd602e74.pdf>. Acesso em: 25 de out. 2016.

BRASIL. **Lei 11.445, de 05 de janeiro de 2007**. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Brasília, DF, jul, 2016. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11445.htm. Acesso em: 29 mar. 2019.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento: Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2017**. Brasília. 2019. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/ae/2017/Diagnostico_AE2017.zip. Acesso em: 01 jul. 2019.

BRASIL, Ministério de Minas e Energia, Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023**. Brasília. 2014. Disponível em: http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/PDE2023_ConsultaPublica.pdf. Acesso em: 09 nov. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Nacional de Energia 2030**. Brasília. Disponível em: http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_10.pdf. Acesso em: 10 nov. 2016.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Instrução Normativa nº 39, de 24 de outubro de 2012**. Regulamenta os procedimentos e as disposições relativos às operações de crédito no âmbito do Programa Saneamento para Todos - Mutuários Públicos, instituído pela Resolução nº 476, de 31 de maio de 2005, e alterado pela Resolução nº 647, de 14 de dezembro de 2010, ambas do Conselho Curador do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço - FGTS, com suas alterações e aditamentos. Disponível em: http://www.lexeditora.com.br/doc_23903507_INSTRUCAO_NORMATIVA_N_39_DE_24_DE_OUTUBRO_DE_2012.aspx. Acesso em: 26 out. 2019.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Instrução Normativa nº 3, de 17 de março de 2016**. Altera a Instrução Normativa nº 39, de 24 de outubro de 2012. Regulamenta os procedimentos e as disposições relativos às operações de crédito no âmbito do Programa Saneamento para Todos – Mutuários PÚBLICOS. Disponível em: http://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/22544440/do1-2016-03-18-instrucao-normativa-n-3-de-17-de-marco-de-2016-22544215. Acesso em: 26 out. 2019.

BRASIL. Receita Federal. **Instrução Normativa SRF nº162, de 31 de dezembro de 1998**. Fixa prazo de vida útil e taxa de depreciação dos bens que relaciona. Disponível em: http://normas.receita.fazenda.gov.br/sijut2consulta/link.action?idAto=15004&visao=o_riginal. Acesso em: 05 abr. 2019.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Análise da viabilidade técnico-econômica de produção de energia elétrica em ETEs no Brasil a partir do biogás**. Brasília. DF. Ministério das Cidades, 2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Guia Técnico de Aproveitamento Energético de Biogás em Estações de Tratamento de Esgoto / PROBIOGÁS**. Brasília. DF. Ministério das Cidades, 2015.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **GUIA TÉCNICO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA DE ENERGIA ELÉTRICA POR BIOGÁS EM ETES / PROBIOGÁS**. Brasília. DF. Ministério das Cidades, 2016.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Resultados do Projeto de Medições de Biogás em Reatores Anaeróbios / PROBIOGÁS**. Brasília. DF. Ministério das Cidades, 2016.

BRASIL. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Probiogás. **Tecnologias de Digestão Anaeróbia com Relevância para o Brasil: Substratos, Digestores e Uso de Biogás / PROBIOGÁS**. Brasília. DF. Ministério das Cidades, 2015.

CAMPOS, José Roberto (coordenador). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. PROSAB, ABES, Rio de Janeiro, 1999. Disponível em: <https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/prosabcamposfinal.pdf>. Acesso em: 07 mai. 2017.

CARDOSO MOREIRA, Hélinah. **Biogás em estações de tratamento de esgotos: os principais legados da cooperação técnica Brasil-Alemanha**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental), Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: http://www.urb.puc-rio.br/dissertacao/dissertacao_helinah_moreira.pdf. Acesso em: 02 jul. 2019.

CARVALHO, Leonel de Magalhães. **Advances on the Sequential Monte Carlo Reliability Assessment of Generation-Transmission Systems using Cross-**

Entropy and Population-Based Methods. 2013. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, Portugal, 2013. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/72688/2/27363.pdf>. Acesso em: 01 mai. 2017.

CETESB. **Biogás:** Pesquisas e Projetos no Brasil. Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo. 2006. Disponível em: <<http://biogas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/27/2014/01/livrobiogas.pdf> >. Acesso em: 30 abr. 2017.

CETESB. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem.** Ano 2009. Disponível em: <http://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/wp-content/uploads/sites/32/2013/11/variaveis.pdf>. Acesso em: 19 fev. 2017.

CHERNICARO, Carlos Augusto Lemos; POSSETTI, Gustavo Rafael Collere. **PROBIO 1.0 – Programa de estimativa de produção de biogás em reatores UASB.** 2015. Disponível em: < <http://site.sanepar.com.br/probio/probio.zip> >. Acesso em: 15 nov. 2016.

COPASA. **ETE Sustentável.** Disponível em: <http://www.copasa.com.br/wps/portal/internet/esgotamento-sanitario/valorizacao-do-esgoto/conteudos/ete-sustentavel>. Acesso em 03 abr. 2019.

COPEL. **NTC 905200 - Acesso de micro e minigeração distribuída ao sistema da COPEL (com compensação de energia).** Emissão: Fevereiro / 2014, Revisão: Outubro / 2018. Disponível em: [https://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcarquivos.nsf/3C55616EDE8B5E618325831D0066CB7D/\\$FILE/NTC905200_Rev04102018.pdf](https://www.copel.com/hpcopel/normas/ntcarquivos.nsf/3C55616EDE8B5E618325831D0066CB7D/$FILE/NTC905200_Rev04102018.pdf). Acesso em 29 abr. 2019.

COSTA, David Freire da. **Geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento de esgoto.** 2006. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia) – IEE / EPUSP / FEA / IF da Universidade de São Paulo. São Paulo. Disponível em: <https://mac.arq.br/wp-content/uploads/2016/03/energia-eletrica-a-partir-do-biogas-tratamento-esgoto.pdf>. Acesso em 26 out. 2019.

DAL BEM, Armando José. **Análise de desempenho de um motor ciclo Otto alimentado com álcool de 75 INPM.** 2008. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18149/tde-17012011-142254/publico/Tesecompleta_Pos_Banca.pdf. Acesso em: 03 abr. 2019.

DAVID, Airton Checoni. **Secagem térmica de lodos de esgoto.** Determinação da umidade de equilíbrio. 2002. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-30042003131628/publico/Revisada.PDF>. Acesso em: 26 abr. 2017.

DIAS, Julio Alberto Silva. **Avaliação da confiabilidade composta baseada em Simulação Monte Carlo com representação da geração eólica.** 2008. Disertação

(Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2008062501.pdf>. Acesso em 19 mar. 2017.

DOS SANTOS MACHADO, Nilton Roberto; FERREIRA, Alexandre Oliveira. **Método de simulação de Monte Carlo em planilha Excel: desenvolvimento de uma ferramenta versátil para análise quantitativa de riscos em gestão de projetos**. Revista de Ciências Gerenciais, v. 16, n. 23, 2015.

EMBASA. Projeto pioneiro em ETE gera energia a partir do tratamento do esgoto. **Jornal da Embasa**, Salvador, ed. 255, p. 4, set. 2016. Disponível em: http://www.embasa.ba.gov.br/images/documents/1084/jornal_da_embasa_10out2016_ed255_arte_web_bx.pdf. Acesso em: 10 abr. 2019.

EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2018, ano base 2017**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2019.

EPE. **Eficiência Energética e Geração Distribuída para os Próximos 10 Anos (2015-2024)**. Abril 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-245/topico-264/DEA%2012-16%20-%20Ef%20energetica%202015-2024%5b1%5d.pdf>. Acesso em 12 out. 2019.

EPE. **Nota Técnica DEA 13/14 - Demanda de Energia 2050**. Rio de Janeiro. 2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Documents/DEA%2013-14%20Demanda%20de%20Energia%202050.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2016.

EVANS, Merran; FORBES, Catherine; HASTINGS, Nicolas; PEACOCK, Brian. **Statistical distributions**. 2001.

FRANÇA JUNIOR, Antônio Tavares de. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/88894/francajunior_at_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em 26 abr. 2017.

GOMES, Heber Pimental. **Sistemas de Saneamento – Eficiência Energética**, 1ª Edição. 366p. João Pessoa Editora Universitária/UFPB, 2010. Disponível em: http://www.lenhs.ct.ufpb.br/wp-content/uploads/arquivos/Livro_Eficiencia_Energetica.pdf. Acesso em: 10 nov. 2016.

GUDER, Ritchie. **Otimização de portfólios de contratos de energia elétrica utilizando algoritmos genéticos multiobjetivo**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009. Disponível em:

<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/88946/269453.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 26 de mar. 2017.

INEE - **O que é geração distribuída.** Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp. Acesso em: 05 nov. 2015.

JORDÃO, Eduardo Pacheco. **Tratamento de esgotos domésticos.** 6ª edição. Rio de Janeiro. 2011.

JORION, Philippe. **Value at Risk: The new benchmark for managing financial risk.** 2nd edition, New York: McGraw-hill, 2001.

LEE, H. H. M. **Práticas de Custo de Capital e Avaliação de Investimentos no Brasil.** 2004. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

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) – Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/ENGD-8KYNF3/tese_n_57___l_via_lobato.pdf?sequence=1. Acesso em 01 set. 2017.

MACHADO, Luiz Leal Netto. **Aspectos técnicos relacionados à geração de energia elétrica a partir do lodo de esgoto.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola de Química, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <http://dissertacoes.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli512.pdf>. Acesso em: 30 abr. de 2017.

MME. **Plano Nacional de Eficiência Energética - Premissas e Diretrizes Básicas.** Versão 18/10/11. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1432134/Plano+Nacional+Efici%C3%Aancia+Energ%C3%A9tica+%28PDF%29/74cc9843-cda5-4427-b623-b8d094ebf863?version=1.1>. Acesso em: 10 nov. 2016.

NOYOLA, A.; CAPDEVILLE, B.; ROQUES, H.; **Anaerobic treatment of domestic sewage with a rotating-stationary fixed film reactor.** 1988, Water Res. 12: 1585-1592.

NOYOLA, A., MORGAN-SAGASTUME, J.M., LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J.E. **Treatment of biogas produced in anaerobic reactors for domestic wastewater: Odor control and Energy/Resource recovery.** Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, v.5, p93-114, 2006.

PECORA, Vanessa. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP:** Estudo de caso. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de Inter

unidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: http://www.iee.usp.br/producao/2006/Teses/tese_vanessapecora.pdf. Acesso em 26 abr. 2017.

POSSETTI, Gustavo Rafael Collere, et al. **Medições em tempo real do biogás produzido em reatores UASB alimentados com esgoto doméstico**. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), Curitiba, 2013.

RIBEIRO, Sylvia Telles. **Precificação ótima dos contratos de gás natural na modalidade interruptível**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/biblioteca/php/mostrateses.php?open=1&arqtese=0621335_09_Indice.html. Acesso em: 26 mar. 2017.

ROSA, André Pereira. **Aproveitamento de biogás e lodo excedente de reatores UASB como fonte de energia renovável em estações de tratamento de esgoto**. 2013. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUBD-9HKGWC/tese_final__andr__rosa.1.pdf?sequence=1. Acesso em 10 mar. 2019.

ROSS, Stephen. A.; WESTERFIELD, Randolph. W.; JAFFE, Jeffrey.; LAMB, Roberto. **Administração financeira**. AMGH Editora, 2015.

RUBINSTEIN, Reuven Y.; KROESE, Dirk P. **Simulation and the monte carlo method**. 3rd. John Wiley & Sons, 2016.

SILVA, Thaísa Carolina Ferreira. **Utilização de biogás de estações de tratamento de esgoto para fins energéticos**. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. Disponível em: http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/106/106131/tde-20052015-182523/publico/Dissertacao_Thaisa_Silva.pdf. Acesso em: 16 nov. 2016.

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

SOARES, Erika Leite de Souza Ferreira. **Estudo da Caracterização Gravimétrica e Poder Calorífico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2011. Disponível em: http://www.getres.ufrj.br/pdf/SOARES_ELSF_EJP_11_T_M_.pdf. Acesso em 01 mar. 2019.

SOUZA, Cláudio Leite. **Estudo das rotas de formação, transporte e consumo dos gases metano e sulfeto de hidrogênio resultantes do tratamento de esgoto**

doméstico em reatores UASB. 2010. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://www.smarh.eng.ufmg.br/defesas/229D.PDF>. Acesso 15 ago. 2018.

SOUZA, C.L.; CHERNICHARO, C.A.L.; AQUINO, S.F. **Quantification of dissolved methane in UASB reactors treating domestic wastewater under different operating conditions.** In: 12th WORLD CONGRESS ON ANAEROBIC DIGESTION, 2010, Guadalajara, Jalisco – México. Proceedings...México: IWA, 2010a.

TORRES, Rodrigo Corrêa. **Avaliação de portfólios de contratos de compra e venda de energia elétrica: uma abordagem pela teoria de opções.** 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Programa de Engenharia Industrial, Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/Busca_etds.php?strSecao=resultado&nrSeq=8675@1. Acesso em: 27 mar. 2017.

URÁN, Pablo Andrés Galvis. **Definição das necessidades de reserva operacional utilizando os conceitos de VaR e CVaR em sistemas hidro-térmico-eólicos.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/169609/338909.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em 14 out. 2018.

URYASEV, S., ROCKAFELLAR, R.T. **Optimization of Conditional Value-at-Risk.** Department of Industrial & Systems Engineering, University of Florida (1999).

von SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** 2. ed. 1996. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais.

von SPERLING, M.; CHERNICHARO, C.A.L. **Biological wastewater treatment in warm climate regions.** IWA Publishing, London, 2005. 1452 p.

WIESMANN, U., Choi, I. S., Dombrowski, E.M. **Historical Development of Wastewater Collection and Treatment, in Fundamentals of Biological Wastewater Treatment.** 2006. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany. doi: 10.1002/9783527609604.ch1