

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Jamson Justi

**MODELO DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA
VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO URBANAS
APÓS A IMPLANTAÇÃO DA REN 482/12**

Campo Grande – MS

Agosto – 2013

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

Jamson Justi

**MODELO DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA
VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO URBANAS APÓS
A IMPLANTAÇÃO DA REN 482/12**

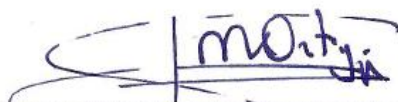
Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, sob a orientação do Prof. Dr. Jéferson Meneguín Ortega.
Área de Concentração: Energia.

Campo Grande – MS
Agosto – 2013


MODELO DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO URBANAS APÓS A IMPLANTAÇÃO DA REN 482/12

Jamson Justi

“Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em *Energia*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul-UFMS.”



Jéferson Meneguim Ortega, Prof. Dr. em Engenharia Elétrica
Orientador




Edson Antonio Batista, Prof. Dr. em Engenharia Elétrica
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

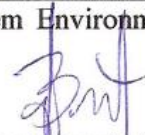
Banca Examinadora:



Jéferson Meneguim Ortega, Prof. Dr. em Engenharia Elétrica
Presidente



Marc Árpád Boncz, Prof. Dr. em Environmental Technology



Edson Antonio Batista, Prof. Dr. em Engenharia Elétrica

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus,
a minha esposa Edrilene Barbosa Lima Justi,
e ao meu irmão Jadson Justi.
Minhas fontes de inspiração.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar. Meu refúgio e minha fortaleza, meu alto retiro e meu libertador, escudo meu, em quem me refugio (Salmos 144:2). Não me desamparou em nenhum momento.

Ao meu orientador, Prof. Jéferson M. Ortega, que confiou em mim, pelo incentivo e paciência, por não ter desistido de mim quando eu quis desistir. Ele foi além de um orientador, mas um servo de Deus usado para me abençoar e mudar a minha história. Tenha a certeza de que eu darei os frutos de seus longos investimentos em mim.

Agradeço a minha mãe que me ensinou os primeiros passos, deu seu exemplo e soube cultivar os valores morais essenciais para o sucesso em todos os meus projetos.

Agradeço ao minha esposa, Edriene Barbosa Lima Justi, pelo tempo que lhe roubei, pela desatenção em tantos momentos em que estive dedicando a este trabalho. Sem os incentivos dela, jamais concluiria este mestrado.

Agradeço ao meu irmão Jadson Justi, uma fonte de inspiração na minha vida, sua trajetória acadêmica me estimulou a nunca desistir dos meus sonhos.

Agradeço também a todos meus amigos do Programa de Pós-Graduação da Engenharia Elétrica, em especial a Sibelis e o Douglas, nossa amizade e experiências serão sempre lembrados.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica (DEL), que direta ou indiretamente contribuíram para concretização deste trabalho e pela presteza que atenderam as minhas necessidades, em especial a professora Luciana e o secretário Gustavo.

Resumo da Dissertação apresentada à UFMS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

MODELO DE SIMULAÇÃO PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO URBANAS APÓS A IMPLANTAÇÃO DA REN 482/12

Jamson Justi

Agosto/2013

Orientador: Jéferson Meneguín Ortega, Dr.

Área de Concentração: Energia.

Palavra Chave: ETE Urbanas, Geração de EE, Geração Distribuída, Dinâmica de Sistemas.

Número de Páginas: 110

RESUMO: Dado ao crescimento populacional e ao crescente apelo ambiental, as estações de tratamentos de esgotos têm se tornado um potencial energético a ser explorado sob a ótica da geração distribuída. Além dos benefícios ambientais e da diversificação da matriz elétrica Brasileira, que atualmente é predominantemente renovável, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico nos mostra que, de 2000 a 2008, houve um aumento considerável de municípios com rede coletora de esgoto nas grandes regiões. Tendo por maior exemplo a região Centro Oeste que saltou de 17,9% para 28,3%. Outro ponto a ser observado é que a criação da Resolução Normativa 482/12 por parte da Aneel alterou de forma significativa o ambiente de geração de energia elétrica (EE) para os novos investidores das empresas de saneamento básico, denominados por microgeradores ou minigeradores de energia elétrica. Neste contexto, foi desenvolvido um modelo de simulação que permite analisar o processo de implantação de um sistema de geração de EE em ETE urbanas dado o seu potencial de geração de biogás por meio de biodigestores modelo RAFA. A construção do modelo de simulação (software) foi baseado na técnica de Dinâmica de Sistemas, sendo utilizado como base para análise econômica alguns parâmetros de entrada das estações. Como resultado, chegou-se a um ambiente computacional capaz de analisar a viabilidade da implantação de um sistema de Geração de EE em ETE urbanas, sob a ótica do investidor. Um estudo de caso realizado através do levantamento dos custos com energia em ETE's de Dourados-MS sinalizou que o investimento neste tipo de empreendimento pode ser viável, além de contribuir para que as empresas de saneamento produzam EE sem Impacto Ambiental e com inovação tecnológica.

Abstract of dissertation presented to UFMS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

SIMULATION MODEL FOR ANALYSIS OF FEASIBILITY OF ELECTRICITY GENERATION IN URBAN WASTE WATER TREATMENT PLANT AFTER DEPLOYMENT OF REN 482/12

Jamson Justi

August/2013

Advisor: Jéferson Meneguín Ortega, Dr.

Area of Concentration (Research Line): Energy

Keywords: Waste Water Treatment Plant, Electric Power Generation, Distributed Generation, Dynamic Systems

Number of Pages: 110

ABSTRACT: Given the populational growth and growing environmental concerns, waste waters treatment plants stations have become a potential source of energy, to be explored from the perspective of distributed generation. Besides the environmental benefits and diversification of Brazilian energy matrix, which is currently predominantly renewable, the National Basic Sanitation Plan shows that, from 2000 to 2008, there was a considerable increase in municipalities with sewage treatment systems in large regions, for example the greater Midwest region, where treatment increased from 17.9% to 28.3%. Another point to be noted is that the creation of Normative Resolution 482/12 by ANEEL significantly altered the environment of electricity generation (EE) for new investments by sanitation companies in microgenerators or minigenerators for the generation of electricity. In this context, we developed a simulation model that allows us to analyze the deployment process of a EE generation system in urban waste water treatment plant (WWTP) because of their potential to generate biogas in wasb type digesters. The construction of the simulation model (software) was based on the Systems Dynamic technique, being used as a basis for economical analysis some input parameters of the stations. So, the model was a computing environment capable of analyzing the feasibility of implementing as EE generator system in as urban WWTP, from the perspective of the investor. A case study conducted by surveying energy costs in the WWTPs of Dourados-MS indicated that an investment in this type of project can be viable, and contribute to the sanitation companies producing EE without Environmental Impact and technological innovation.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 Contextualização	16
1.2 Justificativa	18
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivos Gerais	21
1.3.2 Objetivos Específicos	22
1.4 Revisão Bibliográfica	22
1.4.1 Geração de EE em ETE's	22
1.4.2 Modelagem a partir de Sistemas Dinâmicos	24
1.5 Organização do Trabalho	25
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	27
2.1 Introdução	27
2.2 Biogás	27
2.2.1 Biogás e sua composição	27
2.2.2 Histórico do Biogás	28
2.2.3 Biodigestor	30
2.2.4 Modelo RAFA ou UASB	31
2.3 Aspectos gerais das ETE's	32
2.3.1 Legislação Vigente (REN 482/12)	32
2.3.2 Potencial de Geração de Biogás	33
2.3.3 Impacto do ambiente regulatório na decisão das empresas de saneamento em investir em geração	36
2.4 Tecnologias de Conversão	38
2.4.1 Turbina a Gás	38
2.4.2 Microturbina a Gás	41
2.4.3 Motores a Combustão Interna	41
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA	45
3.1 Introdução	45
3.1.1 Materiais e métodos	45
3.2 Estrutura do modelo proposto	45
3.3 Dinâmica de Sistemas (DS)	46

3.4 Diagrama de Laço Causal (DLC)	49
3.5 Diagramas de Estoque e Fluxo	51
3.6 Módulos Propostos	54
3.6.1 Módulo de Controle / Interface Gráfica do SGEETE.....	54
3.6.2 Relação entre os DEF's	61
3.6.3 Módulo Técnico.....	63
3.6.4 Módulo Ambiental.....	72
3.6.5 Módulo Normativo.....	74
3.6.6 Módulo Econômico.....	83
3.7 Considerações Finais	88
CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO ECONÔMICA	89
4.1 Introdução	89
4.2 Caracterização das ETE's de Dourados – MS	89
4.3 Construção dos Cenários	90
4.3.1 Geração de 30 kW com um Grupo Gerador e Microturbina	91
4.3.2 Geração de 30 kW com um Grupo Gerador e Microturbina variando-se os impostos praticados em MS	95
4.3.3 Geração de 30 kW com um Grupo Gerador e Microturbina considerando o registro de projeto para créditos de carbono	97
CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
5.1 Introdução	101
5.2 Conclusões	101
5.3 Recomendações para Trabalhos Futuros	105
REFERÊNCIAS	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Perfil da matriz elétrica brasileira em 2011	16
Figura 1.2: Percentual de municípios com rede coletora de esgoto, segundo as Grandes Regiões – 2000/2008	17
Figura 1.3: Percentual de municípios com tratamento de esgoto, em ordem decrecente, segundo as Unidades da Federação – 2008	18
Figura 1.4: Benefícios da geração de EE em ETE Urbanas distribuído em quatro grandes blocos	20
Figura 2.1: Biodigestor UASB	31
Figura 2.2: Processo completo do UASB	32
Figura 2.3: Relação entre poder calorífico do biogás e porcentagem de metano	35
Figura 2.4: Fluxo de caixa típico para ETE's que geram EE, baseado na REN 482/12	37
Figura 2.5: Cascadeamento de créditos em ETE Urbanas	38
Figura 2.6: Representação esquemática de uma TG	39
Figura 2.7: Ciclo Brayton aberto e simples	40
Figura 2.8: Ciclo Brayton com cogeração	40
Figura 2.9: Principais componentes de uma Microturbina	42
Figura 2.10: Representação esquemática do funcionamento de um Motor Diesel	42
Figura 2.11: Representação esquemática do funcionamento de um Motor Ciclo Otto	43
Figura 3.1: Estrutura do modelo para análise de viabilidade econômica da geração de EE a partir do biogás em ETE urbanas	47
Figura 3.2: Diagrama de Laço Causal de uma determinada ETE urbana	50
Figura 3.3: Interface inicial do SGEETE	54
Figura 3.4: Tela de especificação da tecnologia Grupo Gerador	55
Figura 3.5: Tela de especificações da tecnologia Microturbina	56
Figura 3.6: Tela de especificação da tecnologia definida pelo usuário	56
Figura 3.7: Painel 1 de inserção de dados	57
Figura 3.8: Ordem de prioridade no cascadeamento de créditos realizados no modelo	57
Figura 3.9: Painel 2 de resultados	58
Figura 3.10: Sistema interligado de todo o modelo do SGEETE, em etapas	59

Figura 3.11: Resultado da análise de investimentos	60
Figura 3.12: Cascadeamento de créditos de todas as ETE's inseridas no modelo	60
Figura 3.13: Relação entre os DEF's desenvolvidos no SGEETE, em etapas	61
Figura 3.14: Diagrama de estoque e fluxo da produção de biogás na ETE	65
Figura 3.15: Relação entre a Potência do Grupo Gerador e seu consumo de biogás ...	68
Figura 3.16: Relação entre vazão consumida e Fator de Carga do Grupo Gerador de 32 Kw	69
Figura 3.17: Relação entre a Potência da Microturbina e seu consumo de biogás	69
Figura 3.18: Relação entre vazão consumida e Fator de Carga da Microturbina de 30 kW	70
Figura 3.19: Diagrama de estoque e fluxo da geração efetiva de EE na ETE	71
Figura 3.20: Diagrama de estoque e fluxo da receita obtida com a comercialização dos créditos de carbono em ETE	73
Figura 3.21: Diagrama de estoque e fluxo do consumo em kWh/mês das dez ETE's que podem ser inseridas no modelo	76
Figura 3.22: Cascadeamento de créditos em ETE Urbanas	78
Figura 3.23: Diagrama de estoque e fluxo que executa o Cascadeamento de créditos nas dez ETE's que podem ser inseridas no modelo	79
Figura 3.24: Diagrama de estoque e fluxo que realiza o cálculo para os consumidores do Grupo B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico	80
Figura 3.25: Diagrama de estoque e fluxo que realiza o cálculo para os consumidores do Grupo A4/Serviço Público/Convencional/Trifásico	82
Figura 3.26: Fluxo de caixa típico para ETE's que geram EE, baseado na REN 482/12	84
Figura 3.27: Modelagem do fluxo de caixa de uma ETE	84
Figura 4.1: Cascadeamento de créditos nas ETE's de Dourados – MS utilizando um Grupo Gerador de 32 kW	91
Figura 4.2: Cascadeamento de créditos nas ETE's de Dourados – MS utilizando um Grupo Gerador de 32 kW com as receitas anuais de cada estação	92
Figura 4.3: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização utilizando um Grupo Gerador de 32 kW	92
Figura 4.4: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.3	93

Figura 4.5: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização utilizando uma Microturbina de 30 kW	94
Figura 4.6: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.4	94
Figura 4.7: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização utilizando um Grupo Gerador de 32 kW, assumindo um reajuste de 10% nos impostos praticados em MS	95
Figura 4.8: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.7	96
Figura 4.9: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização utilizando uma Microturbina de 30 kW, assumindo um reajuste de 10% nos impostos praticados em MS	97
Figura 4.10: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.9	97
Figura 4.11: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização considerando o registro do projeto para créditos de carbono	98
Figura 4.12: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.11	98
Figura 4.13: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização considerando o registro do projeto para créditos de carbono	99
Figura 4.14: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.12	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Comparação entre as tecnologias disponíveis de conversão	44
Tabela 3.1: Símbolos de representação dos diagramas de estoque e fluxo	53
Tabela 3.2: Variáveis do DEF da produção do biogás na ETE	67
Tabela 3.3: Variáveis do DEF da geração efetiva de EE na ETE	71
Tabela 3.4: Variáveis do DEF da receita obtida com a comercialização dos créditos de carbono nas ETE's	73
Tabela 3.5: Variáveis do DEF que recebem os consumos das dez ETE's inseridas no modelo	76
Tabela 3.6: Variáveis do DEF que executam o cascadeamento de créditos nas dez ETE's que podem ser inseridas no modelo	79
Tabela 3.7: Variáveis do DEF que realiza o cálculo para os consumidores do Grupo B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico	80
Tabela 3.8: Variáveis do DEF que realiza o cálculo para os consumidores do Grupo A4/Serviço Público/Convencional/Trifásico	82
Tabela 3.9: Variáveis do DEF do fluxo de caixa de uma ETE	85
Tabela 4.1: Média de consumo das ETE's de Dourados – MS	90

ÍNDICE DE SÍMBOLOS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
AS – Aterro Sanitário
°C – Graus Celsius
CH₄ - Metano
CIP – Contribuição com Iluminação Pública
CNPJ – Cadastro Nacional de Pessoa Jurídica
CO₂ – Dióxido de Carbono
COFINS – Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
CPF – Cadastro de Pessoa Física
DA – Digestão Anaeróbia
DQO – Demanda Química de Oxigênio
DEF – Diagrama de Estoque e Fluxo
DLC – Diagrama de Laço Causal
D_n – Despesas
DS – Dinâmica de Sistemas
EE – Energia Elétrica
ETE – Etação de Tratamento de Esgoto
GD – Mercado de Geração Distribuída
GG – Grupo Gerador
GLP – Gás Liquefeito de Petróleo
h – Hora
ICMS – Imposto Sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviços
kcal – Kilocaloria
Kg – Kilograma
kW – Kilowatt
kWh – Kilowatt-hora
L – Litro
m³ – Metro cúbico
MDL – Mecanismo de desenvolvimento limpo
mg – Miligrama
MS – Mato Grosso do Sul

MW – Megawatt-hora
N^o - Número
NO_x – Óxidos de Nitrogênio
O&M – Operação e Manutenção
PBD – *Payback* Descontado
PBS – *Payback* simples
PCI – Poder Calorífico Inferior
pH – Potencial de Hidrogênio
PIB – Produto Interno Bruto
PIS – Programa de Integração Social
R\$ – Reais
REN – Resolução Normativa
R_n – Receitas
SGEETE – Simulador de Geração de Energia Elétrica em Estações de Tratamento de Esgoto
SODA – *Strategic Options Development and Analysis*
tCO₂_eq - Tonelada de Dióxido de Carbono Equivalentes
TG – Turbina a Gás
TG – Turbina a Gás
TIR – Taxa Interna de Retorno
TM – Tempo Máximo
TMA – Taxa Mínima de Atratividade
UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*
US\$ - Dólares americanos
VPL – Valor Presente Líquido do Investimento

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A utilização do biogás para geração de energia elétrica é extremamente importante, tanto para o meio ambiente como para as empresas de saneamento que desejem aportar este recurso como micro ou minigeradores de energia. De acordo com Figueiredo (2007), diminuir a dependência de combustíveis fósseis e não renováveis ajuda alcançar soluções ambientalmente corretas, como a utilização da biomassa como fonte de energia, e não apenas reduzirá os impactos globais pela queima de combustíveis fósseis como também contribuirá com a matriz energética dos países.

Dados do Balanço Energético Nacional, edição 2012, mostram que as fontes renováveis (hidroeletricidade, biomassa e eólica) responderam por 89% de toda a energia da matriz elétrica brasileira em 2011 (Figura 1.1), ou seja, é possível observar que o Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica predominantemente renovável.

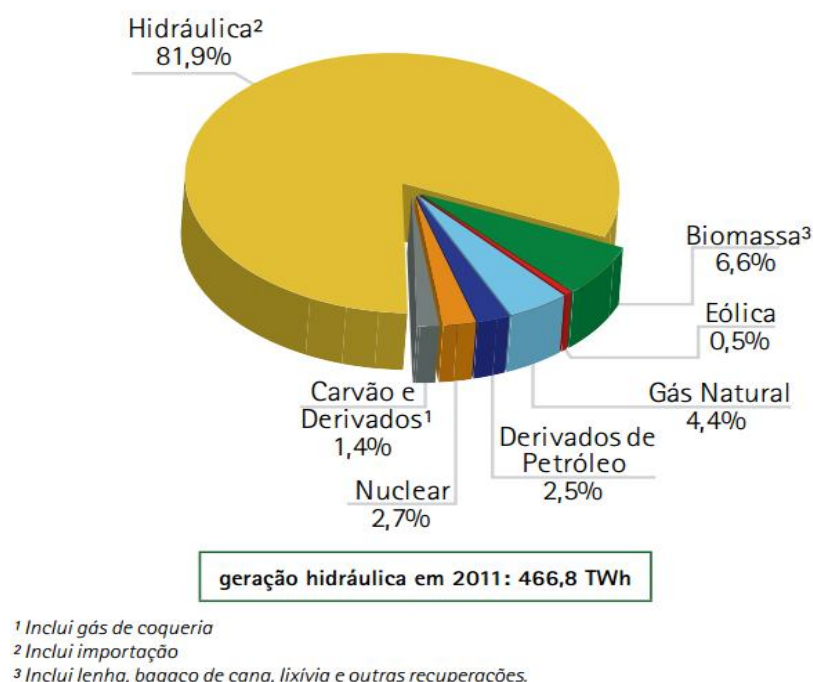
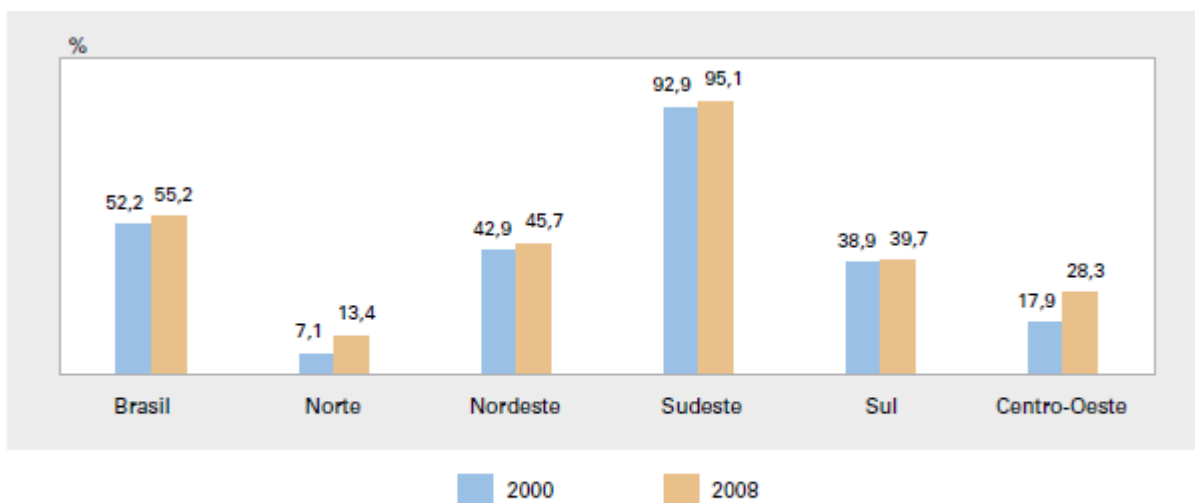


Figura 1.1: Perfil da matriz elétrica brasileira em 2011
Fonte: BEN, 2012.

Dado ao crescimento populacional e ao crescente apelo ambiental, as estações de tratamentos de esgotos têm se tornado um potencial energético a ser explorado sob a ótica da geração distribuída.

Além dos benefícios ambientais e da diversificação da matriz elétrica Brasileira, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB, 2008) nos mostra que, de 2000 a 2008, houve um pequeno aumento no número de municípios com rede coletora de esgoto, mas nas Grandes Regiões alguns avanços foram consideráveis. Na Região Norte, a proporção quase dobrou no período, passando de 7,1%, em 2000, para 13,4%, em 2008. Destaca-se um aumento significativo na Região Centro-Oeste, de 17,9% para 28,3%, conforme observado na Figura 1.2.



Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2000/2008.

Nota: Considera-se o município em que pelo menos um distrito (mesmo que apenas parte dele) tem tratamento de esgoto.

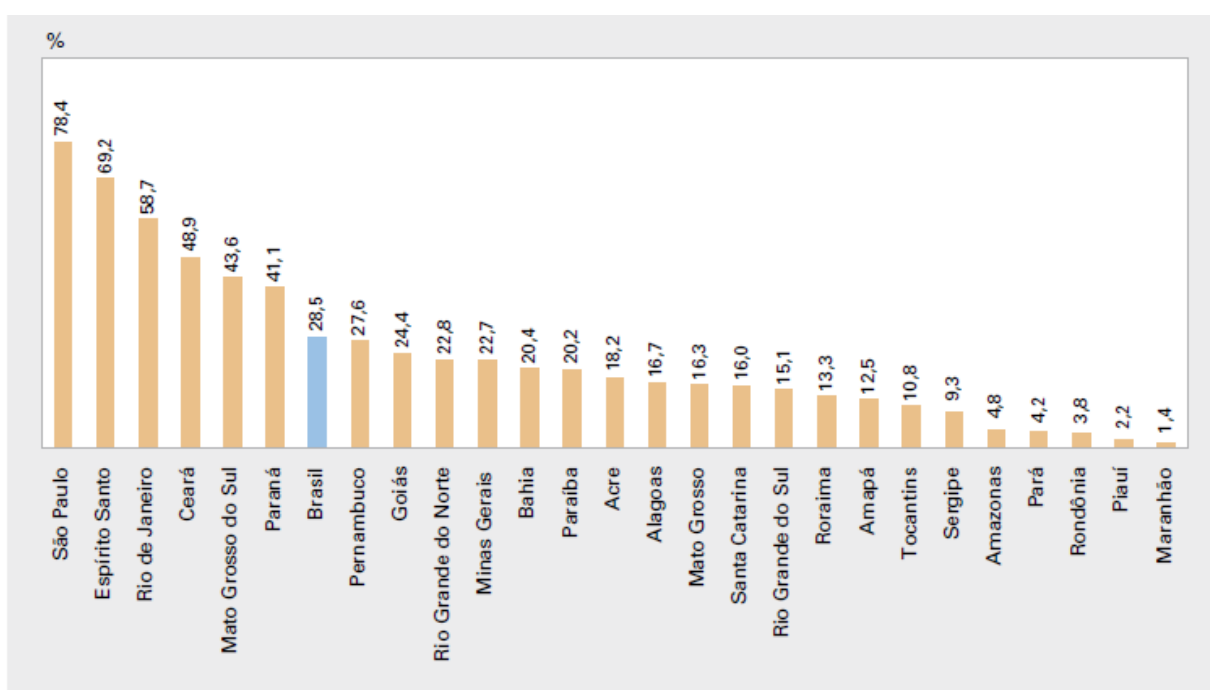
Figura 1.2: Percentual de municípios com rede coletora de esgoto, segundo as Grandes Regiões – 2000/2008

Fonte: PNSB, 2008.

Ainda, de acordo com o PNSB (2008), é importante ressaltar que para se obter condições sanitárias adequadas, não basta que o esgoto seja adequadamente coletado por meio de uma rede geral, mas é necessário também que seja tratado, caso contrário, recursos hídricos ficarão poluídos e haverá proliferação de doenças.

Apesar disso, apenas 28,5% dos municípios brasileiros fizeram tratamento de seu esgoto, o que impacta negativamente na qualidade de nossos recursos hídricos. Mesmo na

Região Sudeste, onde 95,1% dos municípios possuíam coleta de esgoto, menos da metade desses (48,4%) o trataram. Além da Região Sudeste, o melhor desempenho nesse sentido foi observado nas Regiões Centro-Oeste (25,3%) e Sul (24,1%). Na Figura 1.3 mostra-se o percentual de municípios com tratamento de esgotos em ordem decrescente e por regiões. Diante desses dados disponibilizados a sociedade, percebe-se que a geração de energia elétrica em ETE's trará inúmeros benefícios a todos, e poderá, com a redução de custos em EE nas estações haver um investimento em tratamento de esgotos com a compra de novos biodigestores, melhorando assim a qualidade de vida da população.



Fonte: IBGE, Diretoria de Pesquisas, Coordenação de População e Indicadores Sociais, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.

(1) Considera-se o município em que pelo menos um distrito (mesmo que apenas parte dele) tem tratamento de esgoto.

Figura 1.3: Percentual de municípios com tratamento de esgoto, em ordem decrescente, segundo as Unidades da Federação – 2008

Fonte: PNSB, 2008.

1.2 Justificativa

A deficiência no tratamento dos efluentes líquidos residenciais, mais conhecidos como esgoto doméstico, é um problema que atinge todas as áreas do País. Mesmo no Estado de São Paulo, que é responsável por aproximadamente 32,5% do PIB do país, o esgoto é

coletado em mais de 78% das áreas urbanas, e na maioria dos casos, não recebe qualquer tipo de tratamento antes de ser despejado nos cursos de água. O tratamento é composto por uma série de processos que têm como objetivo diminuir o potencial poluidor do esgoto antes de retorná-lo ao meio ambiente (COSTA, 2006).

Ainda, segundo Costa (2006) o aproveitamento energético de um resíduo do processo de tratamento do esgoto objetiva a melhoria do desempenho global do mesmo, reduzindo a emissão de gases efeito estufa, colaborando para aumentar a eficiência energética global da estação de tratamento e conseqüentemente a viabilidade do saneamento básico no País.

De acordo com Coelho (2006), devido a grande demanda de energia elétrica exigida pelos equipamentos usualmente empregados no processo de tratamento de esgoto das estações, a utilização do biogás produzido no processo de digestão anaeróbica para a geração de energia, permite apenas uma redução do consumo de eletricidade. Em média, essa redução é da ordem de 20%. Ainda, segundo a autora, a auto-suficiência energética só é alcançada nos aterros sanitários, justamente por haver uma produção de biogás bem superior aos produzidos em estações de tratamento de esgoto. Por isso, muitos trabalhos foram voltados a geração de EE em AS. Neste sentido, este trabalho indica que dependendo do tamanho da ETE é possível alcançar a auto-suficiência, inclusive com possibilidade de compensação de créditos.

Em 2000 os líderes mundiais assumiram o compromisso de alcançar os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio, um conjunto de oito metas cujo objetivo é tornar o mundo um lugar mais justo, solidário e melhor para se viver, incluindo o objetivo maior de reduzir a pobreza extrema pela metade até 2015 (PNUD, 2012). Dentre as metas estabelecidas para o milênio, a Meta 7 condiz com a geração de EE em ETE urbanas: “Garantir a Sustentabilidade Ambiental”, que propõe reduzir pela metade, até 2015, a proporção da população sem acesso permanente e sustentável a água potável segura e esgotamento sanitário. Deixar de gastar com EE em ETE urbanas implica em mais investimento em esgotamento sanitário por parte dos investidores em saneamento básico.

De acordo com Macedo (2010), no Brasil, ainda são poucos os exemplos de estações de tratamento de efluentes que utilizam o biogás como fonte renovável de energia. Neste sentido, ressalta-se que o uso de biogás proveniente de ETE urbanas, além de reduzir as emissões do gás metano e gerar uma forma de energia renovável, propicia a criação de políticas que aproveitem o biogás e assim, contribuem para melhorar o saneamento básico no Brasil.

É inegável, portanto, que a geração de EE em ETE urbanas traz inúmeros benefícios que podem ser distribuídos em pelo menos quatro blocos centrais (Figura 1.4):

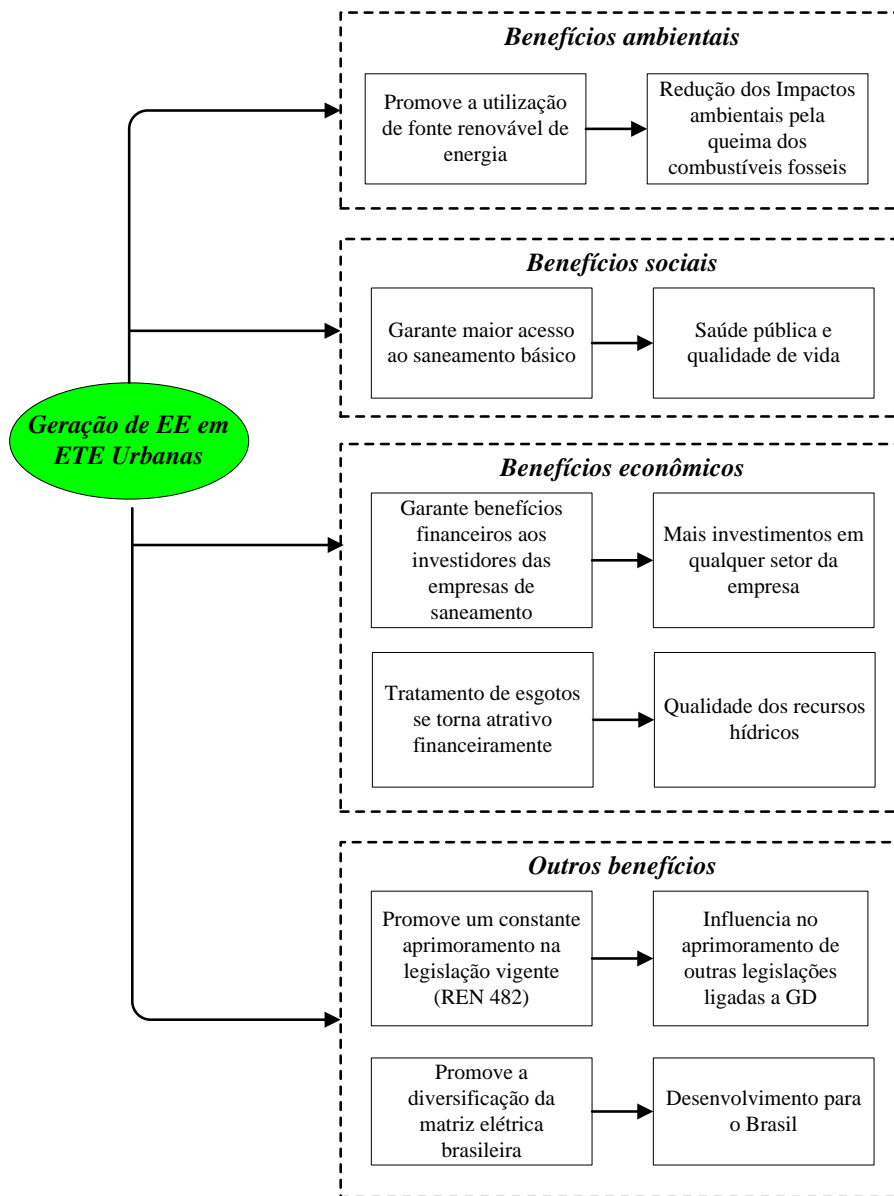


Figura 1.4: Benefícios da geração de EE em ETE Urbanas distribuído em quatro grandes blocos.
Fonte: PRÓPRIA.

Sendo que:

- **Benefícios ambientais:** Dentro dos benefícios ambientais, o fato de se gerar energia elétrica contribui para a promoção da utilização de fontes renováveis

de energia, isso influencia diretamente na redução dos impactos ambientais como a queima, por exemplo, de combustíveis fósseis;

- **Benefícios sociais:** Dentro do bloco social, é possível elencar como um benefício da geração de EE garantia a um maior acesso da população ao saneamento básico, e agir sobre esta realidade, implica em saúde pública e melhora a qualidade de vida das pessoas;
- **Benefícios econômicos:** Como por meio da REN 482/12 não é possível a venda de EE por parte dos produtores de energia, as empresas de saneamento obteriam seus benefícios econômicos / financeiros através do abatimento do proporcional gerado versus os gastos associados do custo da energia consumida em kWh/mês nos locais de geração. Com isso, o “deixar de gastar” com EE se torna receita do empreendimento, a qual pode ser redirecionada para um melhor uso da empresa em outros setores de interesse. É importante ressaltar que diante da REN 482/12, realizar tratamento de esgotos se torna um negócio atrativo, beneficiando diretamente a qualidade dos recursos hídricos. Sendo assim, observa-se que há uma relação estreita entre o bloco econômico e o bloco ambiental;
- **Outros benefícios:** Neste contexto, é possível elencar a promoção de um constante aprimoramento da legislação vigente, influenciando de certa forma em legislações relativas aos autoprodutores de energia, ou seja, com geração acima de 1 MW, onde há a possibilidade de venda de EE.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivos Gerais

Neste contexto, o trabalho teve por objetivo geral desenvolver uma ferramenta utilizando a técnica de Dinâmica de Sistemas para análise da viabilidade econômica de geração de energia elétrica em Estações de Tratamento de Esgoto Urbanas dado o novo ambiente de compensação de créditos criados pela Aneel.

1.3.2 Objetivos Específicos

O trabalho busca representar as relações de influências que afetam as estruturas do sistema, tanto positivas como negativas, caracterizando os diagramas causais, com o estabelecimento dos seguintes objetivos específicos:

- Identificar e estabelecer as relações de causa e efeito entre os principais elementos integrantes do sistema tendo como foco a Geração de Energia Elétrica.
- Desenvolver um modelo de simulação que permita avaliar a viabilidade econômica da produção de energia elétrica a partir de um estudo de caso no Estado do Mato Grosso do Sul.
- Analisar a sensibilidade do processo de tomada de decisão tendo em vista os cenários associados às diferentes estratégias operacionais.
- Analisar o impacto da geração de EE no abatimento de créditos proporcionados pela REN 482/12 apenas de consumidores considerados convencionais. Para tanto, o referido trabalho não realizou a modelagem matemática dos consumidores classificação horo-sazonal, ficando isso como sugestão para futuros trabalhos.

1.4 Revisão Bibliográfica

Para a realização deste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica com objetivo de contextualização do assunto. Apresentam-se alguns estudos já realizados associados à produção de biogás, geração de energia elétrica a partir do biogás, aspectos ambientais e modelagem de sistemas dinâmicos.

1.4.1 Geração de EE em ETE's

Um trabalho semelhante (mas não sob a ótica da compensação de EE) ao realizado nesta dissertação foi o de Santos (2009), onde seu trabalho teve por finalidade avaliar a viabilidade econômica de aproveitamento do potencial energético do biogás produzido na Estação de Tratamento de Efluentes - ETE de Madre de Deus (Salvador - Bahia) para geração

de energia elétrica. Seus objetivos consistiam em identificar o potencial energético dos esgotos afluentes da ETE de Madre de Deus, selecionar a tecnologia de conversão, realizar levantamento dos custos de investimento e manutenção do equipamento, avaliar a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na ETE e analisar os benefícios econômicos e ambientais envolvidos. Os resultados revelaram que o potencial elétrico gerado por 461m³/dia de biogás na ETE de Madre de Deus equivale a aproximadamente 37 kW. O trabalho mostrou que o tempo de recuperação do capital ou *Payback* seria atingido em 2,3 anos, segundo o autor viável para o tempo de vida útil do equipamento de quatro anos. A relação B/C para o valor presente encontrado é igual a 3,55 e a TIR de 61,7% ao ano supera a taxa de juros praticada de 12%. Logo, comprovou-se a viabilidade econômica do investimento para todos os indicadores analisados.

Pécora (2006) desenvolveu um projeto de geração de EE baseado na coleta de esgoto de todo o conjunto residencial da Universidade de São Paulo (USP), coordenado pela Escola Politécnica, financiado pela Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), em um edital voltado à infra-estrutura (CT-INFRA), que teve três objetivos principais: implantar medidas de gestão e de ação de eficiência energética visando reduzir o consumo na Universidade; ampliar a geração distribuída na USP a partir de recursos renováveis e não convencionais de energia e implantar políticas de incentivo permanente ao uso eficiente e racional de energia.

O projeto, em sua primeira etapa, teve como foco a implantação de um sistema de captação, purificação e armazenamento do biogás, produzido por um reator UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket*, também conhecido como biodigestor RAFA – Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente com manto de lodo, localizado no Centro Tecnológico de Hidráulica (CTH) da Universidade de São Paulo-USP. O esgoto tratado foi o proveniente do Conjunto Residencial da USP (CRUSP). A etapa seguinte foi a utilização do biogás, armazenado na primeira etapa, como combustível em um sistema de geração de energia elétrica. Os resultados obtidos foram a produção de 5,27 m³/dia de biogás (calculado a partir de análise do efluente), isso para uma população de cerca de 439 pessoas. Para este projeto em específico, não há possibilidade de se gerar EE para compensação, pois a tecnologia que exige menos biogás, analisada nesta dissertação, tomando por base os Grupo Geradores da marca Fockink, consome 12 m³/h de biogás. Portanto, para o que este trabalho se propõe, há necessidade de se trabalhar em ETE's consideradas de grande porte, ou seja, que atendam grande parte da população de uma determinada cidade.

Costa (2006) avaliou o potencial de geração de energia elétrica por meio do uso do biogás derivado do tratamento de esgoto da ETE da SABESP, em Barueri / SP. O trabalho teve como objetivos a instalação, operação e a realização de estudos comparativos de desempenhos entre as duas tecnologias (Microturbina e motor), para uma mesma faixa de potência de 30 kW, para a geração de energia elétrica a partir de biogás produzido por meio do processo de digestão anaeróbia de tratamento de esgoto. Os resultados de Costa são animadores. Se levar em consideração a produção de biogás nas cinco maiores unidades de tratamento de esgoto da SABESP na Grande São Paulo, com uma vazão de esgoto de aproximadamente 37.100 m³/dia, o potencial de geração seria de 2,858 MW. E se todo o esgoto de São Paulo fosse tratado o potencial de geração se elevaria a 20,820 MW, isso para uma população de 44.442.795 de habitantes.

1.4.2 Modelagem a partir de Sistemas Dinâmicos

Como este trabalho se propõe a desenvolver um modelo de simulação via Dinâmica de Sistemas, torna-se importante o comportamento dos fluxos de informação, bens e serviços que dirigem a estrutura dos empreendimentos. Neste contexto, diversos trabalhos tem se proposto a utilização de Dinâmica de Sistemas na sua modelagem, mas nenhum deles realizou uma modelagem focada em geração de EE em ETE Urbanas, vale ressaltar que até o presente momento não foi aplicada em nenhum trabalho científico nacional ou internacional a modelagem em dinâmica de sistemas em ETE's.

Silva (2009) analisou a influência dos aspectos regulatórios na viabilidade dos sistemas de cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro do Estado de Mato Grosso do Sul utilizando a técnica de Dinâmica de Sistemas, uma vez que a técnica permitiu realizar simulações das diversas formas de contratação disponíveis, de modo a maximizar os lucros e, conseqüentemente, diminuir o tempo de retorno dos investimentos necessários para a implantação das unidades de cogeração em suas plantas industriais.

Lourenzani *et al.* (1999), analisa por meio da metodologia de Simulação Dinâmica, o comportamento dos fluxos de informação, bens e serviços que dirigem a estrutura de empreendimentos Agroindustriais de Pequeno Porte utilizando o processo de mapeamento causal, uma estrutura básica para a simulação dinâmica onde é construído para avaliar, compreender e controlar os fatores interdependentes do sistema. A validação e implementação

deste protótipo na forma de simuladores (*management flight simulators*) contribuiu para a melhoria e elaboração de diretrizes para a sustentabilidade do setor.

Sob ótica de Dinâmica de Sistemas, Ortega (2001) enfatiza que a modelagem através desta técnica busca representar as relações de influências entre as estruturas do sistema que afetam as externalidades tanto positivas como negativas, caracterizando os diagramas causais. As informações contidas no diagrama causal podem ser traduzidas através de um modelo de simulação, que permite avaliar através de cenários os riscos associados à tomada de decisão (estratégias) por parte das gerências.

1.5 Organização do Trabalho

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos.

No capítulo introdutório foram descritos a contextualização do assunto, a justificativa e os objetivos geral e específicos, além de apresentar a revisão bibliográfica sobre a produção de energia elétrica em ETE urbanas, e modelagens de sistemas dinâmicos.

No capítulo 2 foram abordados os fundamentos teóricos necessários à realização deste estudo, tais como biogás e sua composição, bem como seu histórico. Também é descrito o tipo de biodigestor mais adequado para a produção de biogás em ETE's.

Como o ambiente de negócios mudou consideravelmente com a nova legislação do setor elétrico, ou seja, a REN 482/12, foi explicada as mudanças provocadas pela legislação vigente e o impacto que ela têm no retorno financeiro de um projeto de geração de EE.

Também no capítulo 2 foi comentado sobre o impacto do ambiente regulatório na decisão das empresas de saneamento em investir em geração e os tipos de tecnologias utilizadas para a conversão do biogás em EE.

No capítulo 3 é apresentado a estrutura do modelo proposto e a modelagem matemática do problema de viabilidade econômica de geração de energia elétrica em estações de tratamento de esgotos urbanas. Os diagramas de laços causais permitem entender as inter-relações das forças sistêmicas num contexto global, permitindo assim a implementação do modelo via técnica de dinâmica de sistemas.

No capítulo 4 foram descritos os diversos cenários utilizados neste trabalho para apresentada a modelagem observando os diversos cenários, baseado em estudo de caso de

ETE's da cidade de Dourados sob a concessão da Sanesul. Os resultados da simulação demonstram um retorno aceitável sobre o investimento.

O capítulo 5 apresenta-se a discussão dos resultados e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Introdução

Neste capítulo descreve-se uma breve fundamentação teórica sobre o biogás, sobre o tipo de biodigestor mais adequado para a produção de biogás em ETE urbanas e sobre os tipos de tecnologias existentes visando a geração de EE. Também será descrito a resolução normativa da Aneel (REN 482/12), bem como os benefícios da geração de EE em estações de tratamento de esgotos diante da nova legislação do setor elétrico.

2.2 Biogás

2.2.1 Biogás e sua composição

Segundo o Centro Nacional de Referência em Biomassa (CENBIO, 2008), o biogás é formado a partir da degradação anaeróbia da matéria orgânica sendo composto principalmente por metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2).

Coelho (2006) define o biogás como sendo uma mistura resultante da fermentação anaeróbia de material orgânico encontrado em resíduos animais e vegetais, lodo de esgoto, lixo ou efluentes industriais, como vinhaça, restos de matadouros, curtumes e fábricas de alimentos.

Wereko-Brobby & Hagen (2000) afirmam que composição típica do biogás é cerca de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de hidrogênio, nitrogênio, amônia, ácido sulfídrico, monóxido de carbono, aminas voláteis e oxigênio. Pécora (2006), por sua vez, relata que a produção do metano depende da eficiência do processo. Sendo assim, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de metano, de 15% a 55% de dióxido de carbono e 5% de outros gases. Acrescenta-se aqui, que na verdade a composição do biogás depende muito da composição original do resíduo.

2.2.2 Histórico do Biogás

O biogás ou “gás dos pântanos” foi descoberto em 1667 (CLASSEN, 1999). Mas somente em 1776 é que foi de fato conhecida a presença do gás metano. Esta descoberta é atribuída ao físico italiano Alessandro Volta (CECCHINI, 1992).

Em 1884, Ulysse Grayon, aluno de Louis Pasteur, realizou a fermentação anaeróbia de uma mistura de estrume e água, à temperatura de 35°C, obtendo 100 L de biogás por m³ de matéria. Devido ao grande volume de biogás obtido, Pasteur concluiu que este gás poderia ser utilizado para aquecimento e iluminação.

Em 1890, foi projetada por Donald Cameron uma fossa séptica para a cidade de Exeter, Inglaterra, sendo o gás produzido utilizado para a iluminação pública (NOGUEIRA, 1986).

Mas somente em meados do século XX, por meio do avanço da engenharia bioquímica, dos estudos cinéticos, de projetos de bioreatores, de ampliação da escala de sistemas, é que os processos anaeróbios avançaram significativamente (CRAVEIRO, 1994).

Com a necessidade de combustível imposta pela Segunda Guerra Mundial desenvolveram-se diversos procedimentos para obter metano, a partir da digestão anaeróbia de grande variedade de materiais orgânicos (UNESCO, 1984).

De acordo com Amaral (2004), a crise mundial do petróleo, em 1973, colocou em foco o preço da energia, incentivando o uso e pesquisa da produção de biogás a partir de processos de DA, bem como as questões das fontes renováveis de energia. Nishimura (2009) complementa afirmando que crise do petróleo na década de 70 levou muitos países, desenvolvidos e subdesenvolvidos, a utilizarem os biodigestores como fonte de energia alternativa, entre os quais o Brasil.

Na China e na Índia os biodigestores já são utilizados por muito tempo, e já existe a cultura de como adotar o manejo correto, desde a sua construção até operação. Só para se ter uma ideia, (BURFORD, 1979) *apud* (TECPAR, 2012) relata que a China, por exemplo, possui em torno de 7 milhões de biodigestores em operação. Destacam-se também a Índia com mais de 36.000 digestores, a Coréia do Sul com aproximadamente 27.000, a Tailândia com 225 e as Filipinas com 100.

Ainda, segundo Amaral (2004), apesar da digestão anaeróbica ter atingido seu auge na década de 70, como fonte de produção de combustível – o biogás, o fato de esta tecnologia proporcionar a depuração de efluentes contaminantes e gerar produtos que podem ter entre

outras características a de biofertilização, favoreceu grandes avanços tecnológicos na digestão anaeróbica, nos anos 90. Assim sendo, a produção de biogás, antes vista como objetivo principal da opção de digestão anaeróbica, atualmente, passa a ser apresentada, juntamente com a depuração de efluentes biologicamente aproveitáveis como justificativa para a implantação e desenvolvimento desta tecnologia.

No Brasil, os principais modelos de biodigestores implantados foram o Chinês e o Indiano (CENBIO, 2008). Apesar dos biodigestores empregados na China e na Índia terem tido grande sucesso, o Brasil teve algumas dificuldades na sua implementação, fazendo com que esta tecnologia fosse deixada de lado pelos produtores rurais. Dentre as dificuldades encontradas pode-se destacar (TECPAR, 2012):

- Construção em alvenaria inadequada, fazendo com que a vedação não fosse eficiente, com isso havia vazamento de biogás e o oxigênio atmosférico por sua vez, contaminava o interior do biodigestor, e conseqüentemente sua eficiência diminuía ou até mesmo zerava;
- Entupimento da entrada, impedindo que a matéria orgânica alimentasse os microrganismos no interior do biodigestor;
- Introdução da eletrificação rural a preço subsidiado;
- Gás sulfídrico no Biogás, que causa mal cheiro e é corrosivo;
- Temperatura baixa no inverno, que diminui ou elimina a produção do biogás.

Depois de aproximadamente 30 anos, os biodigestores surgiram novamente como uma alternativa aos produtores, graças ao surgimento de novos materiais para a construção dos mesmos. Outro fator que impulsionou a produção de biogás é a possibilidade de gerar EE, já que as demandas energéticas estão cada vez maiores e os custos da EE tradicional cada vez mais elevado (OLIVEIRA, 2005).

Serão abordados no próximo item os tipos de biodigestores existentes, dentre eles será analisado também o biodigestor modelo RAFA (Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente) ou UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*), principal biodigestor utilizado para a geração de EE em ETE urbanas, justamente por potencializar a geração do gás metano.

Quando se projeta uma ETE é analisado o tipo de biodigestor que será utilizado para o tratamento do afluente. É realizado um estudo que informa qual é a melhor opção de tratamento de acordo com o leito do rio. Algumas ETE's utilizam processos aeróbios, estes

apresentam em geral eficiências de remoção de matéria orgânica superiores a processos anaeróbios. Visando a geração de EE é importante que se tenha um processo anaeróbio, pois só este processo possui uma capacidade de geração de EE, já que o processo aeróbio produz CO₂, H₂O e minerais, impedindo a produção de EE ou qualquer reaproveitamento.

Portanto, quando a ETE possui um sistema aeróbio, não é interessante e nem viável que se substitua todo o processo por biodigestores modelo RAFA, mas o que é viável e bastante utilizado em cidades do Brasil é inserir uma etapa anaeróbia precedendo o processo, ou seja, um sistema híbrido. Esta conjunção de técnicas apresenta melhor eficiência de remoção de compostos orgânicos e, caso se utilize processos de aeração prolongada, o lodo geralmente já sai do sistema estabilizado (MACEDO, 2010). Outra possibilidade para geração de EE, tendo em vista que um sistema aeróbio resulta em um crescimento excessivo de bactérias, que devem ser removidas frequentemente, é alimentar um biodigestor anaeróbio com este lodo de excesso, como é comumente chamado, esta é uma tecnologia bastante utilizada na Europa.

2.2.3 Biodigestor

Os biodigestores nada mais são do que reatores anaeróbios, onde o material orgânico é decomposto por bactérias metanogênicas, resultando no final do processo em efluente tratado e biogás. Eles podem ser utilizados para tratar esgotos urbanos, lodos de ETEs, dejetos animais, efluentes e resíduos rurais e industriais que contenham elevada carga orgânica, e outras fontes de biomassa. Quanto maior a carga orgânica do material a ser digerido no biodigestor, maior será a produção de biogás, desde que respeitadas as condições necessárias para seu bom funcionamento (MACEDO, 2010).

Há uma grande diversidade de biodigestores disponíveis e a escolha do tipo depende basicamente de dois aspectos: a finalidade na qual o biodigestor está sendo construído e também da disponibilidade do espaço onde será instalado. É importante ressaltar que ao construir um biodigestor, por mais simples que seja, deve haver uma preocupação com a segurança, já que o metano produzido no biogás é um combustível inflamável (MACEDO, 2010).

Os tipos de biodigestores mais difundidos são os modelos indiano, chinês e canadense, sendo este último o mais utilizado recentemente, principalmente pelo desenvolvimento de geomembranas que facilitam a instalação dos biodigestores (KUNZ,

2004). Para este trabalho, especificamente, focado em geração de biogás em ETE urbanas, o principal biodigestor é o RAFA ou UASB, que será detalhado mais adiante.

2.2.4 Modelo RAFA ou UASB

O biodigestor modelo RAFA (Figura 2.1), cuja sigla original é UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*) foi desenvolvido por Lettinga. É um biodigestor com retenção interna de lodo, com a incorporação de um separador diferente para os sólidos suspensos e para o gás (PÉCORA, 2006).

Este reator também recebe o nome de “reator anaeróbio de manta de lodo”, a biomassa cresce de forma dispersa e as bactérias tendem a aglutinar, isto favorece a proliferação de outras bactérias. Esta aglutinação beneficia o aumento e a eficiência do sistema.

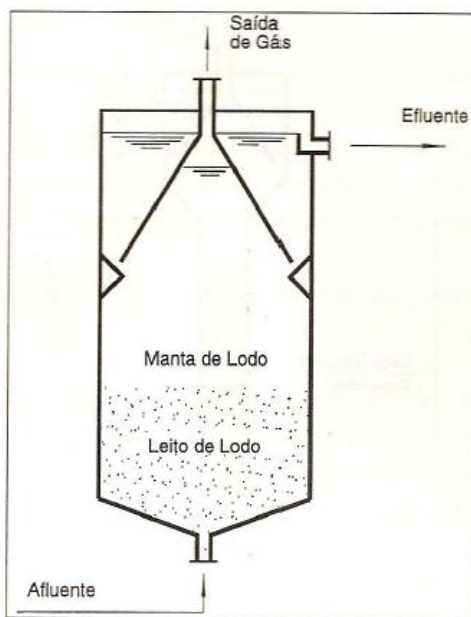


Figura 2.1: Representação esquemática de um biodigestor UASB
Fonte: CHERNICHARO, 1997.

Neste biodigestor, a concentração de biomassa é elevada, ou seja, o volume requerido para o funcionamento do sistema é menor do que o de outros sistemas de tratamento.

Como o fluxo é ascendente, o lodo é dirigido para a parte superior do tanque, onde há um dispositivo de separação do sólido e do efluente tratado. Por meio deste dispositivo é

garantido que a biomassa não saia do sistema. Neste processo, é claro, são gerados gases, basicamente metano e gás carbônico, estes são coletados, podendo ser utilizados para a geração de EE, no caso do metano, ou mesmo, queimados em “flares”.

Os reatores anaeróbios de fluxo ascendente não necessitam de decantadores primários, sendo precedidos apenas de gradeamento, desarenador e medidor de vazão (Figura 2.2). A produção de lodo é baixa e o mesmo já sai estabilizado, podendo ser simplesmente desidratados em leitos de secagem. Estes reatores normalmente são fechados, evitando a emissão de maus odores, cuja geração pode ser minimizada com um projeto bem elaborado (MACEDO, 2010).

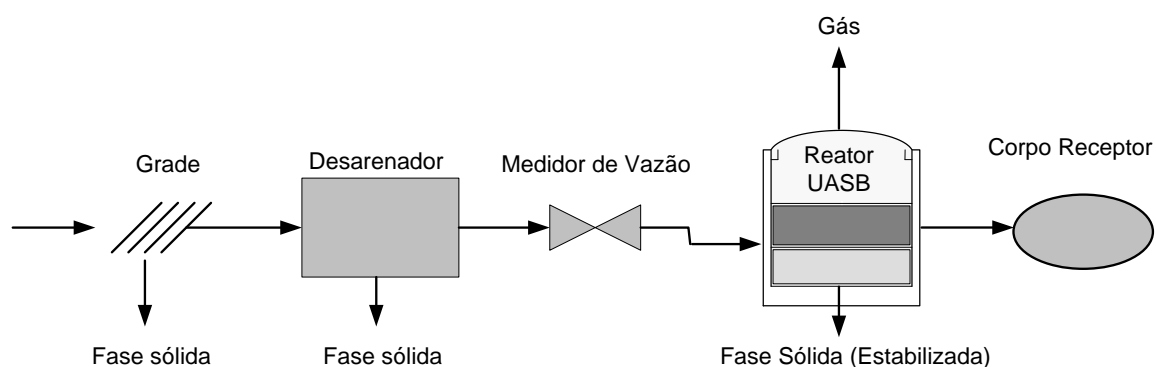


Figura 2.2: Processo completo do UASB
Fonte: Adaptação de MACEDO, 2010.

2.3 Aspectos gerais das ETEs

2.3.1 Legislação Vigente (REN 482/12)

A Resolução Normativa 482 da Aneel de 17 de abril de 2012 (ANEEL, 2012) estabeleceu as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e também instituiu o método de compensação de energia elétrica. Essa resolução deve ser compreendida como um importante marco regulatório no que diz respeito ao acesso efetivo de pequenos produtores às redes de distribuição.

Nesta resolução são definidas duas categorias em que se enquadram os pequenos produtores de energia elétrica: a primeira, de microgeração distribuída contempla os

produtores que possuem potência instalada de até 100 kW. A segunda categoria contempla os produtores que possuem potência instalada superior a 100 kW e igual ou inferior a 1 MW. Em ambos os casos, as fontes de energia devem ser provenientes de energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação em questão.

O sistema de compensação de energia elétrica instituído pela Agência Nacional de Energia Elétrica funciona semelhantemente ao método adotado em alguns países, denominado “*net metering*”, ou seja, não há venda da energia produzida, e sim créditos gerados, e de acordo com Stadler (2010) esse sistema está implantado em pelo menos 10 países e em 43 estados dos Estados Unidos (EUA), onde o consumo a ser faturado, referente à energia elétrica ativa, é a diferença entre a energia consumida e a injetada, por posto horário, quando for o caso. O excedente, que não foi compensado no mês corrente, deve ser utilizado para compensar o consumo dos meses subsequentes. Além disso, os créditos devem ser utilizados dentro de um prazo máximo de 36 meses, após este período eles expiram para o cliente e os créditos que restarem são revertidos em prol de modicidade tarifária.

Além da possibilidade de compensar os créditos no próprio local de geração de EE, por meio desta resolução é possível cadastrar outros estabelecimentos que são denominados como “participantes do sistema de compensação”, desde que possua o mesmo CNPJ ou CPF. Ou seja, o que restou de créditos em um determinado mês pode ser utilizado nos meses subsequentes em outros estabelecimentos, e se houver participantes o suficiente, os créditos são completamente diluídos ao longo das compensações, aproveitando assim todo o benefício que a geração distribuída pode proporcionar ao mini ou microgerador.

Embora não se possa comercializar esta energia elétrica, a criação dessa resolução foi um importante passo ao crescimento da GD no Brasil, já que as distribuidoras de energia elétrica foram obrigadas a criarem manuais de conexão para os produtores que desejam inserir a energia gerada na rede da distribuidora. Uma das primeiras empresas do setor elétrico a disponibilizar um manual de acesso à rede de distribuição para seus clientes foi a Companhia Paranaense de Energia (COPEL), antes mesmo da criação da REN 482.

2.3.2 Potencial de Geração de biogás

A viabilidade de geração de EE de uma ETE não se dá somente pelo incentivo regulatório, mas também pelo viés financeiro. As empresas de saneamento como toda

empresa, se importa com a relação custo benefício, e isso parte de uma análise de investimentos.

Coelho *et al* (2003) afirma que o biogás gerado em estações de tratamento de esgotos não permite a autossuficiência de operação da ETE, porém, há vários fatores que podem culminar em uma autossuficiência. É sabido que, os maiores gastos com EE em uma ETE são causados por bombeamento. A produção específica em kWh/m³ depende da concentração do esgoto da ETE e se há certa constância na vazão de entrada de esgoto da estação. É importante frisar também que a autossuficiência depende do relevo da cidade e necessidade de recalque da ETE.

Em algumas ETE's analisadas no estado de Mato Grosso do Sul, como em Dourados (segunda maior cidade do estado), e em Ponta Porã, verificou-se que é possível alcançar a autossuficiência, com a possibilidade, inclusive, de se gerar créditos que podem ser utilizados em outras ETE's do mesmo grupo da Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul (SANESUL, 2013).

A partir de dados obtidos em análises do efluente antes e após seu tratamento no biodigestor, tais como DQO (Demanda Química de Oxigênio) e Volume de esgoto da ETE, é possível estimar o volume de biogás gerado, com isso é possível escolher o tipo de tecnologia que será utilizada para geração de EE. Este conhecimento será determinante para saber o tempo em que a tecnologia ficará em operação dado o volume de biogás produzido. No caso do estudo realizado em ETE's da cidade de Dourados, o biogás gerado é suficiente para o funcionamento de um Grupo Gerador ciclo Otto ou de uma microturbina de até 36 kW operando 24h/dia. Para este trabalho, será analisado a geração de EE de um Grupo Gerador ou de uma Microturbina na faixa de 30 kW.

De acordo com Pécora (2006) outros fatores também podem influenciar na geração biogás, dos quais se pode destacar: impermeabilidade do ar, natureza do substrato, composição dos resíduos, teor da água, temperatura e pH. Alves (2000) vai além afirmando que a presença de substâncias não combustíveis no biogás, como água e dióxido de carbono, prejudica o processo de queima, tornando-o menos eficiente, uma vez que, presentes na combustão absorvem parte da energia gerada. Ou seja, à medida que a concentração de impurezas aumenta, o poder calorífico do biogás diminui.

O Gráfico (Figura 2.3) elaborado por Alves (2000) mostra a relação existente entre o poder calorífico do biogás e a porcentagem de metano, fato já comprovado por Silva (1983),

que demonstrou em suas pesquisas que de acordo com a quantidade de metano no biogás, o seu poder calorífico aumenta, pois o CO_2 , outro produto da digestão anaeróbia, é a forma mais oxidada do carbono, não podendo ser mais queimado.

Algumas ETE's utilizam processos aeróbios, estes apresentam em geral eficiências de remoção de matéria orgânica superiores a processos anaeróbios, no entanto, nestas ETE's, toda a matéria orgânica presente é concentrada em CO_2 , H_2O e em outros produtos oxidados, não sendo possível o aproveitamento direto do biogás. Além do que, neste tipo de ETE, a produção de biomassa chega a uns 40% do total de DQO, sendo necessária a eliminação frequente deste lodo, que em seguida, e com alta eficiência, pode ser transformado em biogás. Visando a geração de EE é importante que se tenha um processo anaeróbio, pois este processo, naturalmente possui uma capacidade maior de geração de EE.

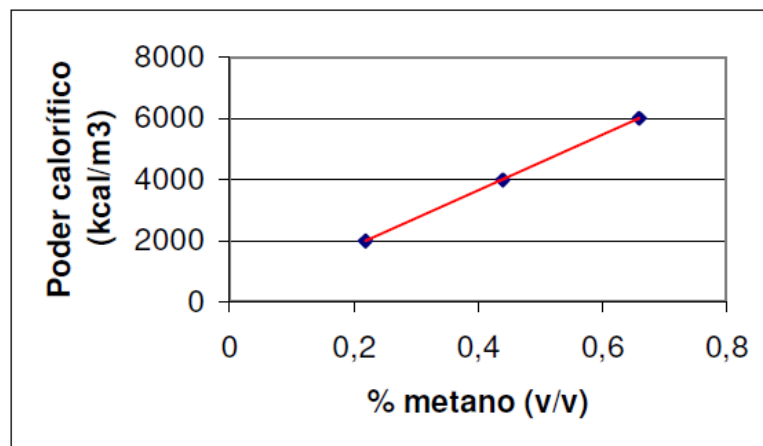


Figura 2.3: Relação entre poder calorífico do biogás e porcentagem de metano
Fonte: ALVES, 2000.

Portanto, quando a ETE possui um sistema aeróbio, não é interessante e nem viável que se substitua todo o processo por biodigestores modelo RAFA (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente) ou UASB (*Up-flow Anaerobic Sludge Blanket*), mas o que é viável e bastante utilizado em cidades do Brasil é inserir uma etapa anaeróbia precedendo o processo, ou seja, um sistema híbrido. Esta conjunção de técnicas apresenta melhor eficiência de remoção de compostos orgânicos e, caso se utilize processos de aeração prolongada, o lodo geralmente já sai do sistema estabilizado (MACEDO, 2010).

2.3.3 Impacto do ambiente regulatório na decisão das empresas de saneamento em investir em geração

Antes de 2012 havia falta de um arcabouço claro e objetivo de normas e regras que permitisse a disponibilização da energia elétrica (com geração de até 1 MW, pois acima disto ainda há entraves regulatórios) produzida a partir do metano proveniente de ETE's, isso inviabilizava a implantação do sistema de geração por seus altos custos na fase inicial. Com a criação da REN 482/12 tem-se a vantagem da inserção de EE em baixa tensão e isso por si só reduz consideravelmente os custos com o sistema de geração.

Diante da não possibilidade da venda de EE, de acordo com a legislação vigente, tem-se a possibilidade de créditos gerados, que são compensados em primeira instância na ETE geradora de EE, logo após nas unidades previamente cadastradas. Sendo assim, em uma análise de viabilidade financeira, têm-se que as despesas evitadas são equivalentes as receitas oriundas da geração de energia através do biogás.

Neste trabalho, considerou-se a instalação de um Grupo Gerador de 32 kW ou de uma Microturbina com potência instalada de 30 kW em uma ETE da cidade de Dourados – MS. Esta potência foi definida após o levantamento da produção de biogás, realizada pela empresa SANESUL em uma de suas ETE's na cidade. Vale salientar que, como já explicado, que a ETE avaliada neste trabalho possui biogás suficiente para geração de cerca de 36 kW.

Após ser feito um levantamento da conta de energia das ETE's de Dourados, conforme pode ser observado na Figura 2.4, foi considerado que no mês “zero” há o investimento no Grupo Gerador (GG) ou Microturbina e que somente dentro de um período de três meses haverá o *start-up* do Grupo Gerador. Este período pode ser entendido como adequações ou adaptações para o correto funcionamento do equipamento ou até mesmo como um atraso para o início do projeto.

A partir do terceiro mês a ETE já tem condições de gerar EE e de injetá-la na rede de distribuição, sendo assim, as receitas são resultantes da diferença entre o montante gerado de energia e o consumo de cada ETE. Tomando como base o consumo de energia das ETE's de Dourados no ano de 2012, verificou-se que o consumo em kWh/mês na “ETE 1” é minimizado ao equivalente valor de conexão e a despesa evitada em R\$ se torna receita no terceiro mês, ou seja, $R1=D1$.

No quarto mês, os créditos excedentes da ETE 1 são utilizados para compensar o gasto na ETE 2, pois a REN 482 especifica que os créditos que restarem de um ponto de geração devem ser abatidos em meses subsequentes, ou no próprio local de geração, ou em outros locais previamente cadastrados. Desta forma, a despesa 2 (D_2) da ETE 1 somada a despesa da ETE 2 se tornam a Receita 2 (R_2). Este processo se repete para os demais meses e pontos de consumo da empresa até que todo o crédito associado à energia gerada na ETE 1 seja abatido nas contas associadas aos pontos de consumo da empresa. Este processo é explicado graficamente em maior detalhes no Capítulo 3, por meio da Figura 3.22.

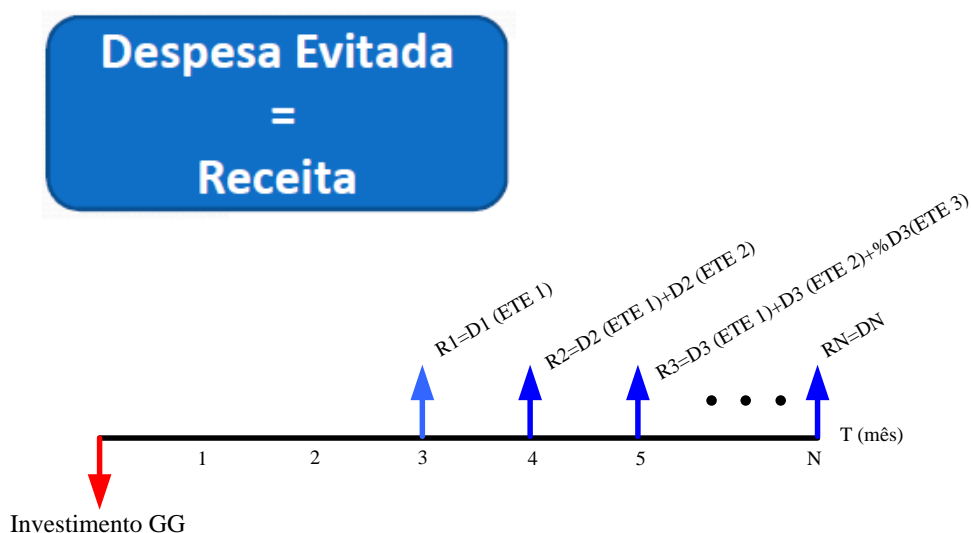


Figura 2.4: Fluxo de caixa típico para ETE's que geram EE, baseado na REN 482/12
Fonte: PRÓPRIA.

De acordo com a Figura 2.5, é possível observar que há um “cascateamento” de créditos que são gerados e compensados nas demais ETE's, sempre em ordem de prioridade. Percebe-se que diante deste novo ambiente regulatório, a forma de analisar a viabilidade de um negócio mudou consideravelmente, pois não há mais a possibilidade da venda de EE.

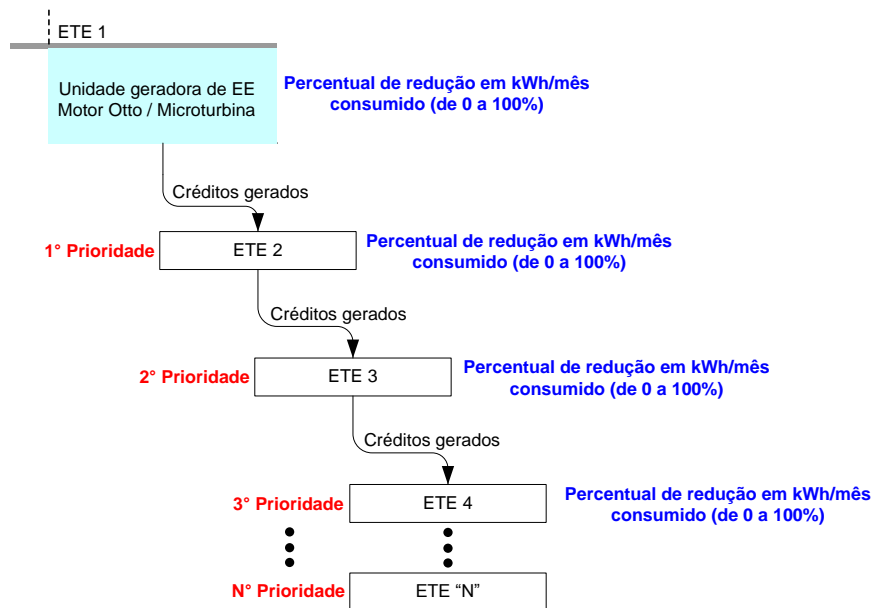


Figura 2.5: Cascateamento de créditos em ETE Urbanas
Fonte: PRÓPRIA.

2.4 Tecnologias de Conversão

Existem muitas tecnologias disponíveis para a conversão de energia do biogás. Entende-se aqui por conversão energética a transformação de uma energia em outra energia. Portanto, no caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia mecânica por meio da combustão controlada do gás. A energia mecânica, por sua vez, ativa um gerador que a converte novamente em EE.

Além disso, o biogás gerado também pode ser utilizado para a cogeração, como por exemplo, na queima direta em caldeiras. Também existe outro tipo de tecnologia, porém ainda pouco difundida e não comercial, como a célula combustível. Já os motores ciclo otto e as Microturbinas são largamente utilizados e são de fácil aquisição.

2.4.1 Turbina a Gás

De acordo com Pécora (2006) as turbinas a gás (Figura 2.6) estacionárias foram desenvolvidas a partir das turbinas usadas em aviação, onde o fluido é o gás da câmara de

combustão. Ainda segundo Van Wylen (2003), os gases que são gerados em aterros sanitários (AS), produtos da decomposição do lixo urbano, que apresenta como principal fonte de energia o metano, tem sido coletados em aterros municipais de lixo são utilizados para a geração de EE por meio de TG. Isso é possível devido a grande produção de metano pelos AS de médio e grande porte. Porém em ETE's é mais viável, dependendo da vazão de operação, a utilização do Motor Ciclo Otto e de Microturbinas para a geração de EE.

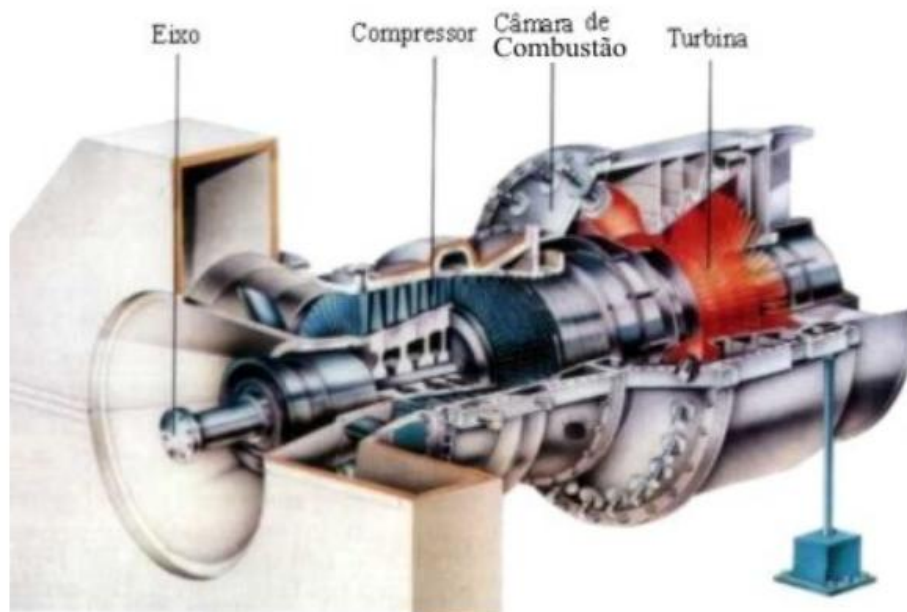


Figura 2.6: Representação esquemática de uma TG
Fonte: BRANCO, 2005.

Como é possível observar na Figura 2.7, a TG é composta de um compressor de ar, câmara de combustão e uma turbina a gás (Ciclo Brayton). O ar atmosférico é aspirado e comprimido no compressor e encaminhado a uma alta pressão à câmara de combustão. Neste instante o ar é misturado com o combustível pulverizado e então é provocada a ignição. O gás é enviado a TG com alta pressão e temperatura, neste momento ocorre a expansão dos gases até a pressão de exaustão. O resultado deste processo é a obtenção de potência no eixo da turbina. Parte desta potência é utilizada no compressor, nos equipamentos auxiliares e o resto, a potência líquida, pode ser utilizada para o acionamento de um gerador elétrico (VAN WYLEN, 2003).

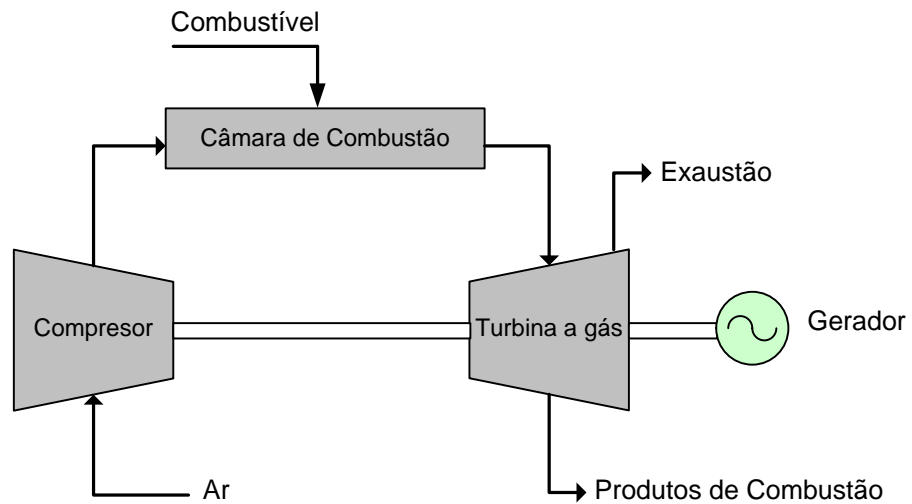


Figura 2.7: Ciclo Brayton aberto e simples
Fonte: PRÓPRIA.

De acordo com Pécora (2006) o rendimento térmico do ciclo Brayton é de aproximadamente 35%, mas, atualmente, existem turbinas que atingem um rendimento de 41,9%.

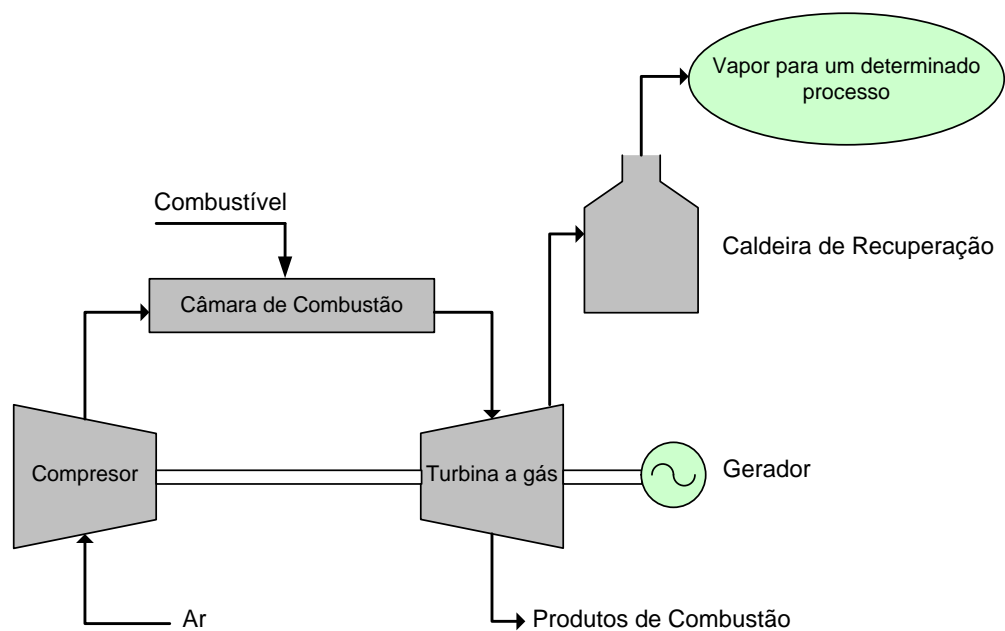


Figura 2.8: Ciclo Brayton com cogeração
Fonte: PRÓPRIA.

Existe também a possibilidade da adição de uma caldeira de recuperação de calor. Neste caso, os gases de exaustão da turbina são direcionados para a caldeira, de modo a gerar vapor. Este vapor é então utilizado no processo industrial, conforme mostrado na Figura 2.8.

2.4.2 Microturbina a Gás

As Microturbinas são turbinas de pequeno porte que geralmente operam na faixa de 20 a 250 kW, e se instalados em conjunto de módulos pode gerar cerca de 1,5 MW, podendo ser utilizadas com vários tipos de combustíveis, tais como:

- Biogás;
- Gás natural;
- GLP (gás liquefeito de petróleo);
- Gás de poços de petróleo;
- Diesel/Gás oil e
- Querosene.

O funcionamento da Microturbina é semelhante às TG's de grande porte, ou seja, o ar é aspirado e forçado para o interior da turbina a uma alta velocidade de pressão, este ar a alta pressão é então encaminhado à câmara de combustão, onde ocorre a ignição por meio da reação química entre o ar e o combustível injetado. É importante frisar que este processo é controlado para que se ocorra o mínimo possível de emissão e máxima eficiência. O gás então é enviado à turbina a alta pressão e temperatura onde ocorre a expansão dos gases através das palhetas da turbina, produzindo assim trabalho. Os gases que não são aproveitados são descartados na atmosfera. A Figura 2.9 mostra os principais componentes de uma Microturbina.

2.4.3 Motores a Combustão Interna

Em 1867, Nikolaus August Otto, um engenheiro alemão, desenvolveu o ciclo Otto de quatro tempos, que é largamente utilizado em transportes até nos dias de hoje.

Em 1892, surge então o motor a diesel, por meio do engenheiro alemão Rudolph Diesel. O motor a diesel é projetado para ser mais pesado e mais potente do que os motores a gasolina e utiliza óleo como combustível. Eles são usados em máquinas pesadas, locomotivas, navios e em alguns automóveis (PÉCORA, 2006). Na Figura 2.10 representa-se esquematicamente o funcionamento de um motor a diesel.

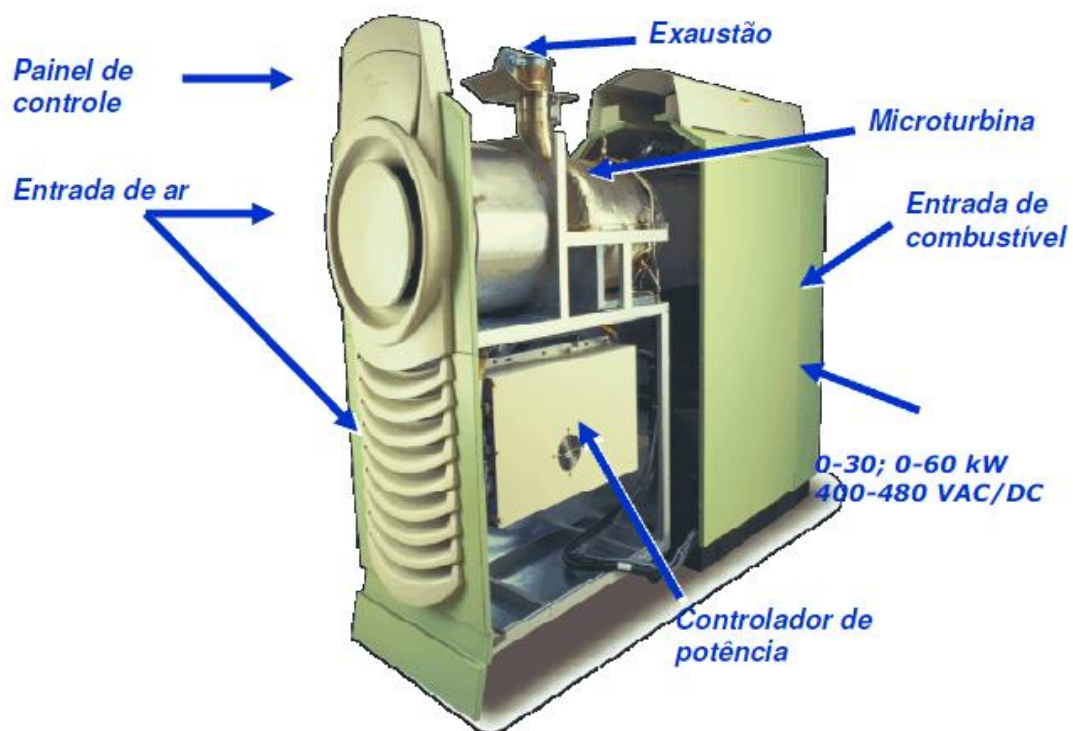


Figura 2.9: Principais componentes de uma Microturbina
 Fonte: MONTEIRO, 2004.

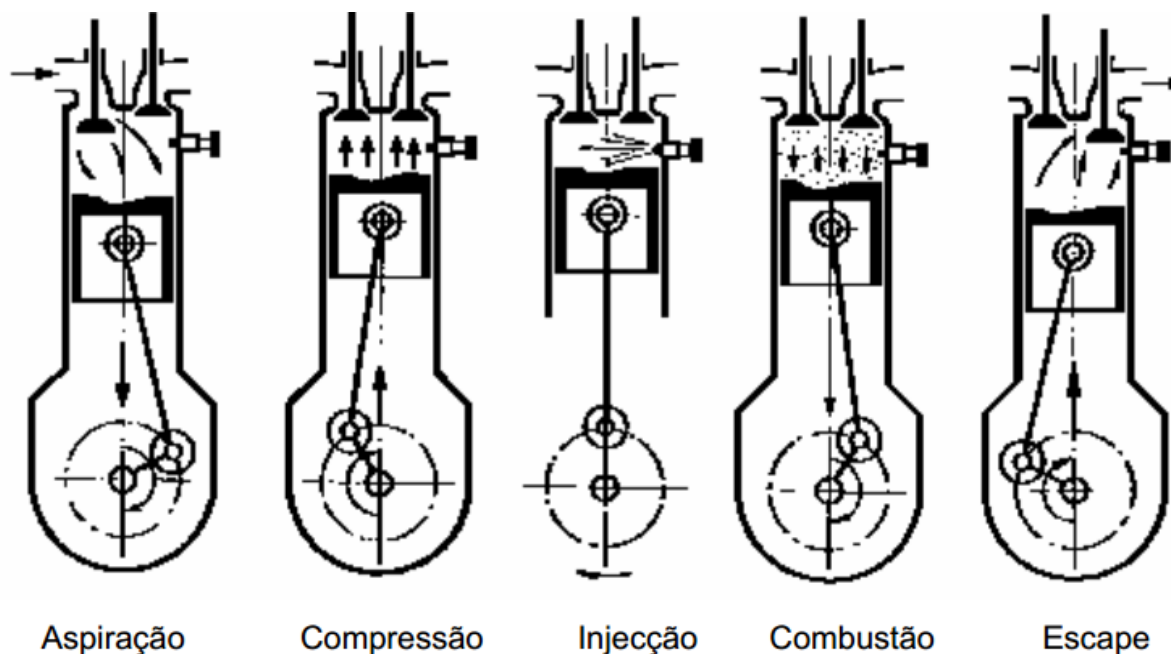


Figura 2.10: Representação esquemática do funcionamento de um motor diesel
 Fonte: DANTE, 2003.

São motores que se aproximam do ciclo de combustão interna da ignição por centelha. Seu rendimento é função apenas da relação de compressão (VAN WYLEN, 2003).

Aplicam-se tanto para geração de energia elétrica, pelo acoplamento de um gerador ao motor, quanto à geração de energia mecânica, que pode ser empregada no acionamento de bomba hidráulica, compressor ou veículo (PÉCORA, 2006).

De acordo com Pécora (2006) e Costa (2006) a diferença básica entre o ciclo Otto e o Diesel está na forma em que ocorre a combustão. No ciclo Diesel, a combustão ocorre pela compressão do combustível na câmara de combustão, enquanto no ciclo Otto, a combustão ocorre pela ignição do combustível através de uma fagulha na câmara de combustão. O ciclo Otto consiste em expansão/resfriamento adiabático, seguido de resfriamento a volume constante, aquecimento/compressão adiabático e aquecimento a volume constante. A válvula de entrada de ar abre no tempo preciso para permitir a entrada de ar (misturado ao combustível) no cilindro. A vela dá ignição na mistura no cilindro, o que cria a explosão. A força da explosão é transferida ao pistão. O pistão desce e sobe em um movimento periódico. A força do pistão é transferida através da manivela para o eixo de transmissão. A Figura 2.11 mostra o esquema de funcionamento de um Motor Ciclo Otto.

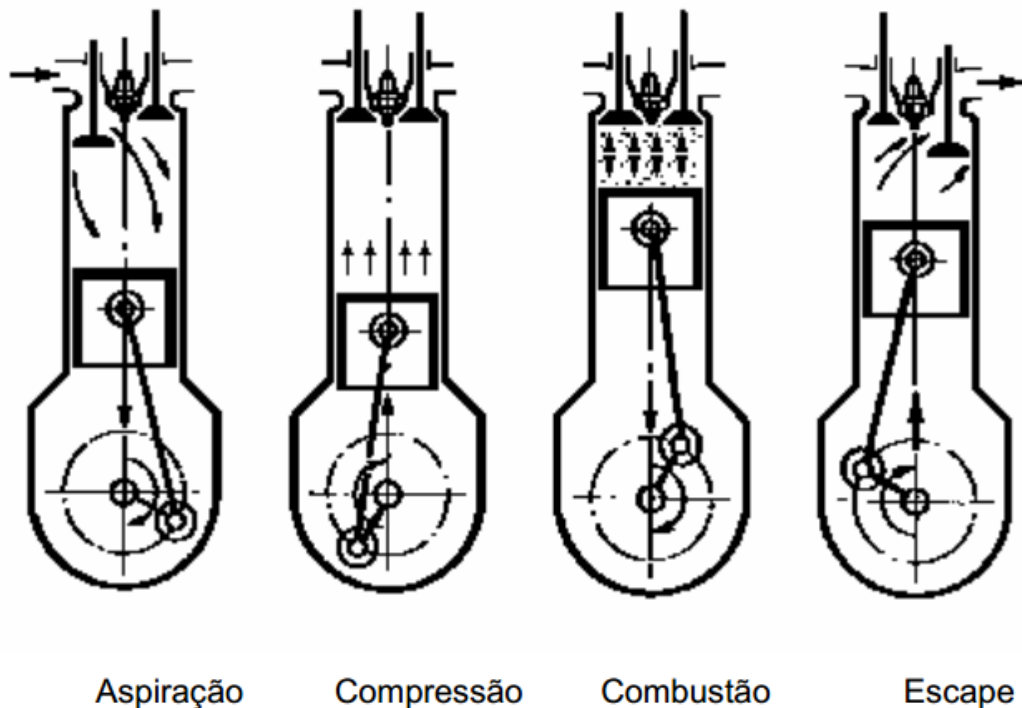


Figura 2.11: Representação esquemática do funcionamento de um Motor Ciclo Otto
Fonte: Dante, 2003

2.4.4 Comparação entre as tecnologias de conversão

Dentre as tecnologias disponíveis comercialmente encontram os motores ciclo otto a biogás, os motores ciclo diesel a biogás, as TG's para pequeno porte e as Microturbinas capstones. Na Tabela 2.1 mostra-se as principais diferenças entre as tecnologias disponíveis atualmente.

Tabela 2.1: Comparação entre as tecnologias disponíveis de conversão

	Motor Ciclo Otto	Motor Ciclo Diesel	TG de pequeno porte	Microturbina
Potência	30 kW - 20 MW	16 kW a 98 kW	500 kW - 150 MW	30 kW - 100 kW
Rendimento com Biogás	30 a 34%	30 a 35%	20 a 30%	24 a 28%
Emissões de NO_x	< que 3000 ppm	Por volta de 27 ppm	De 35 a 50 ppm	< que 9 ppm

Fonte: Adaptação de PÉCORÁ , 2006.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

3.1 Introdução

Neste capítulo é apresentada a estrutura do modelo e a modelagem matemática do problema de viabilidade econômica de geração de energia elétrica em estações de tratamento de esgotos urbanas. Os diagramas de laços causais permitem entender as inter-relações das forças sistêmicas num contexto global, permitindo assim a implementação do modelo via técnica de dinâmica de sistemas.

A seguir, são expostos os materiais e métodos empregados neste trabalho, os parâmetros e as equações que serviram de base para a elaboração do modelo.

3.1.1 Materiais e Métodos

De forma a realizar uma modelagem do sistema de geração de biogás, geração de EE e análises de decisão por meio de indicadores financeiros em ETE urbanas, foi utilizado como ferramenta principal neste trabalho o software Powersim Studio Enterprise 2003, nele é possível desenvolver a dinâmica de sistemas, inventada por Jay Forrester na década de 1960 (FORRESTER, 1961).

Antes de realizar o modelamento em DS (método quantitativo) é necessário realizar de forma representativa e empírica todo o sistema, portanto, também é demonstrado por meio da Figura 3.2 o diagrama de laço causal que contempla a presença de todos os módulos desenvolvidos neste trabalho, esta é uma importante técnica para o entendimento do processo antes da realização da modelagem matemática.

3.2 Estrutura do modelo proposto

Para analisar a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás em estações de tratamento de esgoto urbanas, este trabalho propõe o modelo estruturado em cinco módulos principais (Figura 3.1):

- Módulo de controle/interface gráfica;
- Módulo técnico;

- Módulo ambiental;
- Módulo normativo;
- Módulo econômico.

O módulo de controle/interface gráfica tem por objetivo variar os *inputs* do sistema, com o objetivo de realizar “*n*” simulações, onde se verifica de forma rápida e precisa a viabilidade do empreendimento e dados aproximados de geração de biogás, bem como o impacto da variação da tarifa anual de EE e dos dados de entrada da estação, como vazão de esgoto e análise DQO.

O módulo técnico tem por objetivo modelar a geração do biogás nas estações de esgotos urbanas, determinando assim a quantidade de biogás em m³/mês produzido pelo local onde será recebido o sistema de geração de EE. No segundo momento e através da quantidade de biogás obtida, é calculada a geração efetiva de EE nas estações.

O módulo ambiental demonstra a conversão do biogás em toneladas de dióxido de carbono equivalente e também mostra o possível ganho mensal com a comercialização dos créditos de carbono. Este módulo depende da geração efetiva de EE encontrada no módulo técnico.

O módulo normativo tem por objetivo modelar a resolução normativa 482/12 da Aneel, pois até o início de 2012 havia possibilidade de venda de EE para a concessionária de energia. Com a criação desta resolução, não existe mais venda, e sim créditos gerados, isso alterou o ambiente de análise financeira de forma considerável. Este módulo depende também da geração efetiva de EE por mês encontrado no módulo técnico.

Por último, módulo econômico visa analisar o impacto que este novo ambiente regulatório proporciona para os novos investidores de EE, ele depende dos resultados obtidos pelo módulo normativo e também de resultados obtidos por meio do módulo ambiental. Através deste módulo é possível encontrar e analisar os resultados dos indicadores financeiros com o intuito de se verificar a viabilidade do empreendimento.

3.3 Dinâmica de sistemas (DS)

A técnica de Dinâmica de Sistemas surgiu inicialmente na década de 60, com o trabalho de Jay Forrester no MIT (Massachusetts Institute of Technology). Sua teoria foi baseada em sistemas de *feedback* e de controle com a finalidade de avaliar negócios e

contextos organizacionais e sociais. Isto fez com que fosse desenvolvida uma metodologia analítica de modelagem (FLOOD, 1997).

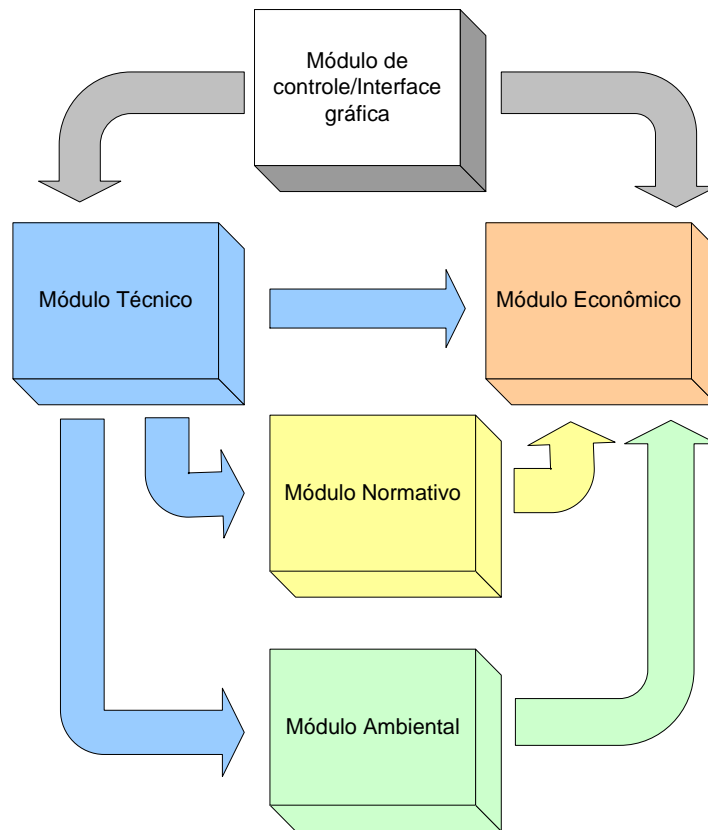


Figura 3.1: Estrutura do modelo para análise de viabilidade econômica da geração de EE a partir do biogás em ETE urbanas.
Fonte: PRÓPRIA.

Forrester (1961) desenvolveu uma técnica de modelagem, análise e simulação de sistemas que possuem inter-relacionamentos complexos e processos não-lineares, utilizando conceitos de gestão, teoria de sistemas de controle e de simulação computacional, permitindo compreender a operação do sistema real, determinar os fatores que exercem maior influência sobre o sistema, avaliar as consequências da implementação de diversas formas de controle e obter funções de controle viáveis que garantam a máxima satisfação.

Saito (2000) ressalta que uma visão do que representa a Dinâmica de Sistemas pode ser aceita como aquela que tem sua ênfase na estrutura e no processo dentro da estrutura, assumindo que essa é a melhor maneira que o comportamento dinâmico no “mundo real” pode ser caracterizado. A Dinâmica de Sistemas considera então, o comportamento sendo causa principalmente de sua estrutura. Estrutura, nesse caso não consiste somente em aspectos

físicos de plantas e processos de produção, mas também com referências importantes a políticas e tradições, ambas tangíveis e intangíveis, que dominam as tomadas de decisões.

Partindo desse ponto de vista a Técnica de Dinâmica de Sistemas assume que análises de uma situação podem ser compreendidas de um ponto de vista objetivo externo, e que a estrutura e o processo dinâmico do “mundo real” podem ser recriados em ambos os sistemas de diagramas e modelos matemáticos. Essas ideias podem ser transmitidas para um contexto organizacional (SOUZA, 2010).

Através da DS é possível exercitar o pensamento sistêmico e compreender a influência de partes em causas e efeitos, muitas vezes, distantes no tempo e no espaço. Ao empregarem-se os fundamentos do Pensamento Sistêmico na pesquisa científica, pode-se obter uma visão mais completa da realidade dos fatos e por consequência construir modelos que melhor espelham a realidade (OLIVEIRA, 2011).

Para representar a modelagem da geração de biogás e de EE em ETE urbanas, é necessário o uso combinado de métodos qualitativos (aspectos estratégicos) e quantitativos (aspectos operacionais). Neste sentido, existem duas abordagens demonstradas por PIDD (1998) e de acordo com o autor atuam em conjunto:

- *Hard*: procura a solução de problemas através de uma maneira sistematizada, abrangendo três técnicas de modelagem (Programação matemática, simulação computacional e métodos heurísticos).
- *Soft*: procura compreender uma determinada situação sem se preocupar diretamente com a resolução de um suposto problema, abrangendo quatro técnicas (Dinâmica de Sistemas, Metodologia de Sistemas *Soft* (*Soft System Methodology*), Mapeamento Cognitivo e SODA (*Strategic Options Development Analysis*)).

A técnica de DS se justifica pois permite lidar com as duas abordagens, ou seja: Diagrama de Laço Causal (DLC), usados na modelagem dos aspectos estratégicos (quali-Soft) e Diagramas de Estoque e Fluxo usados na modelagem dos aspectos operacionais (quanti-Hard) (ANDRADE, 1997).

3.4 Diagrama de laço causal

Os diagramas de laço causal (DLC), de natureza qualitativa, são estruturas em forma de grafos, utilizados para a visualização de qualquer sistema, através da identificação de suas características estruturais, das relações de causa e efeito e dos tempos de espera (*delays* ou atrasos) presentes no comportamento do sistema. Estas estruturas facilitam a representação do problema real, ou seja, permitem a visualização de como seus elementos interagem e influenciam o todo, e o consequente desenvolvimento dos modelos matemáticos (ORTEGOSA, 2006).

No DLC, uma relação de causa e efeito indica a influência que uma variável exerce sobre outra, ou seja, o efeito de qualquer outra variável é ignorado quando é analisada uma relação causal. É enfatizado pela simplicidade de representação do comportamento de um sistema, através do mapeamento dos seus elementos formadores e dos relacionamentos entre eles, isto é, de que forma um elemento influencia o comportamento de outro (SOUZA, 2010).

Identificando as variáveis de interesse, é possível apresentar uma proposta de modelagem baseada na técnica de Dinâmica de Sistemas (DS), permitindo a simulação, análise e discussão de problemas complexos (problemas de difícil formulação matemática ou com grande espaço de busca) e não lineares, formando uma via importante para focar e tomar decisões concernentes ao problema.

O diagrama de laço causal é utilizado para análise econômica e visa identificar as relações de influência sob a ótica dos novos investidores das empresas de saneamento básico no processo de tomada de decisão a respeito do seu investimento em produção de energia elétrica. Souza (2010) afirma que análise das alternativas de investimento corresponde, somente, a uma parte do processo de solução do problema, tendo em vista que o emprego de técnicas adequadas de modelagem é essencial para que haja resultados confiáveis e representativos.

Na Figura 3.2 ilustra-se o diagrama de laço causal apresentando as relações de causa e efeito para as variáveis de interesse, como determinantes para a produção de energia elétrica nas estações de tratamento de esgotos, sob a ótica do investidor em saneamento básico.

Na construção do DLC considerou-se o número de habitantes atendidos pela ETE produzindo biomassa. O fluxo de biomassa é representado pela vazão de esgoto denominado na Figura 3.2 como “Vazão de Esgoto (Q)”.

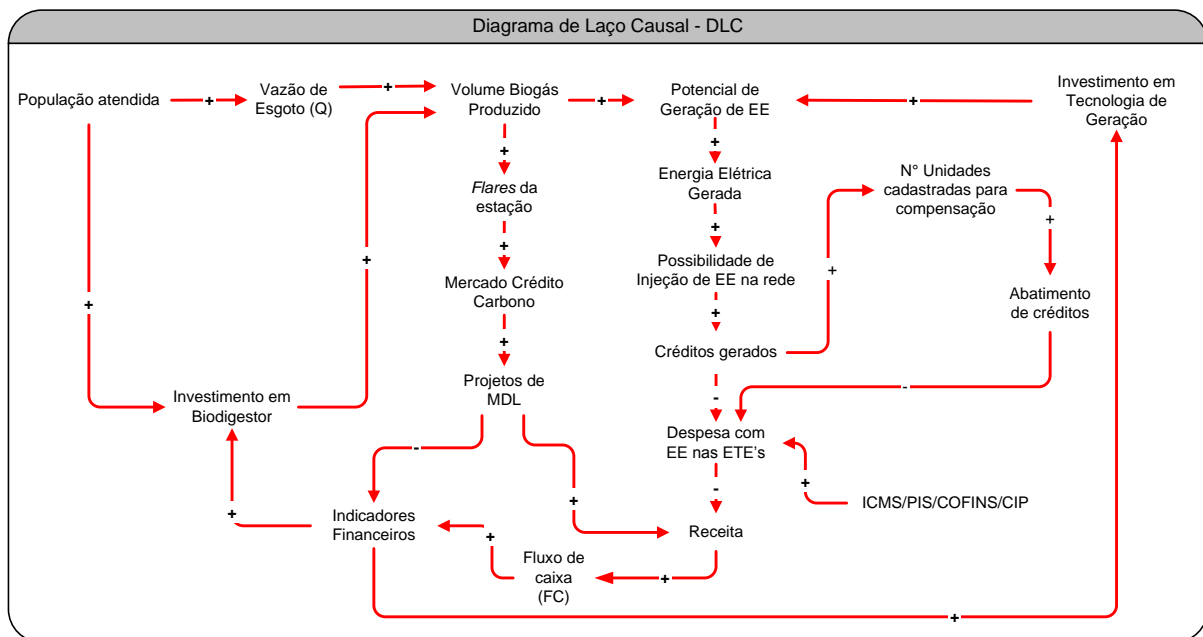


Figura 3.2: Diagrama de Laço Causal de uma determinada ETE urbana
Fonte: PRÓPRIA.

É importante ressaltar que o DLC foi construído em função do conhecimento relativo ao sistema, onde, por muitas vezes, resulta da subjetividade e intuição do modelador (SOUZA, 2010).

Analisando a Figura 3.2, é possível observar que quanto maior for o número de habitantes atendidos por uma ETE “N”, maior é o fluxo de biomassa que entra no sistema, este sistema pode ser representado por biodigestores modelo RAFA (de fluxo ascendente). Sendo assim, quanto maior for a quantidade de biomassa que entra no sistema, maior será a produção de biogás, isso considerando a realimentação representada na figura como investimento em biodigestor, pois um número maior de clientes habitantes obriga novos investimentos em tratamento de esgoto por parte dos gestores de saneamento básico.

Um volume maior de biogás gerado implica em um maior potencial de geração de EE, já que a geração de EE, realizada por meio da conversão de biogás em eletricidade, conseguida basicamente por meio de Grupo Geradores, Microturbinas, etc. depende exclusivamente da quantidade de biogás que é produzido, ou seja, quanto maior o volume de biogás produzido, maior é a capacidade do equipamento de gerar EE.

Quanto maior for o potencial de geração de EE na ETE, maior será também o investimento na tecnologia de conversão de biogás e maior será a receita do empreendimento.

Analisando o lado esquerdo da Figura 3.2, observa-se que há a possibilidade de se comercializar a redução de emissão de CO₂ no mercado de créditos de carbono, ou em projetos de MDL diversos, isso aumenta o fluxo de caixa, melhorando assim os indicadores financeiros. Embora pareça lucrativo, para receber créditos de carbono o projeto deve satisfazer uma série de regras burocráticas que demandam tempo e paciência do gestor, além de um alto preço gasto com a implantação do projeto, sendo, portanto, para a capacidade de produção de biogás (e queimados nos *flares*) em ETE's, inviável. Esta conclusão será detalhada e analisada nos capítulos 4 e 5.

Com uma maior produção de EE, é possível injetar mais EE na rede de distribuição. De acordo com a REN 482/12 não há mais a possibilidade de venda de EE por parte dos pequenos produtores de EE, porém, quanto maior a produção de EE, maior são os créditos gerados, estes por sua vez, são abatidos nos meses subsequentes na própria estação, ou em estações de tratamento previamente cadastradas para este fim. Quanto maior forem os créditos gerados, menores são as despesas com EE na ETE. Menor despesa culmina em uma maior receita. Para este tipo de investimento, ou seja, geração de EE em ETE urbanas, a despesa do sistema se torna em receita do empreendimento.

No lado direito da Figura 3.2 é possível observar que quanto maior forem os créditos gerados, maior serão as unidades cadastradas para o abatimento dos créditos. Ainda do lado direito, percebe-se a influência que os impostos têm na despesa com EE na ETE e receita.

Com o diagrama de Laço causal é possível representar a estrutura geral do sistema, auxiliando assim na visualização dos principais laços do modelo, isso é denominado como uma abordagem qualitativa. Visando a resolução total do que este trabalho se propõe a realizar, uma abordagem quantitativa foi realizada por meio dos diagramas de estoque e fluxo, visando representar nas relações entre as variáveis e acentuar a existência dos laços de realimentação na representação do sistema.

3.5 Diagramas de Estoque e Fluxo

Os Diagramas de Estoque e Fluxo (DEF) são diagramas com representações mais elaboradas da dinâmica de funcionamento dos sistemas, pois possibilitam que haja uma operacionalização no sistema, ou seja, a visualização de seu comportamento por meio de modelos de simulação computacional. Durante o processo de modelagem com o intuito de construir um modelo de simulação computacional, é sugerido que os DLC sejam adotados

previamente ao DEF visando uma maior compreensão do comportamento do sistema (ANDRADE, 1997).

O DEF pode ser descrito através de uma linguagem composta de alguns elementos como:

- Variável de nível: também designadas de estoque (*stock*) ou de estado, representam o estado do sistema em um dado instante, e as acumulações (integrações) se o fluxo é contínuo, ou somatórias se os fluxos são discretos.
- Variável taxa: também designada variável de fluxo (*flow*), determina a que velocidade uma variável de nível muda de valor. O seu valor é baseado somente em variáveis de nível e constantes, não dependendo de valores passados e nem de outras variáveis de taxa.
- Variável auxiliar: representam uma operação algébrica com qualquer combinação de variáveis de estoque, de fluxo, constantes, e até mesmo com outras variáveis auxiliares.
- Constantes: são invariantes ao longo da simulação, pois variáveis de taxa e auxiliares dependem muitas vezes de tais elementos.
- Fontes ou Sumidouros: que representam a fonte e o destino.
- Linhas de Fluxo: representam um fluxo físico (representam quantidades conservativas, que podem ser movidas de um lugar para outro no sistema); um fluxo de informação (desempenham papel de interconexão entre fluxos físicos, isto é, auxiliam na tomada de decisão); e um fluxo de inicialização de variáveis de nível.











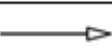




O software empregado neste trabalho utiliza a simbologia ilustrada pela Tabela 3.1 na representação do DEF.

Cardozo (2000) ressalta que a abordagem de um problema a partir da perspectiva de DS, compreende as oito etapas descritas abaixo:

- Aquisição de conhecimentos sobre o sistema, identificando as variáveis mais importantes do modelo;
- Especificação do comportamento dinâmico;

- Construção do diagrama de laço causal representando os "mapas mentais" dos analistas e tomadores de decisão, os quais visam o entendimento explícito de um problema e a busca das relações entre os componentes da estrutura;
- Construção do diagrama de estoque e fluxo;
- Estimativa de valores dos parâmetros;
- Verificação da consistência ou simulação do modelo;
- Análise de sensibilidade; e
- Aplicação de testes de políticas

Tabela 3.1: Símbolos de representação dos diagramas de estoque e fluxo.

Símbolo	Representação
	Variável de nível
	Variável de nível com mais de uma dimensão
	Variável de taxa
	Variável de taxa com mais de uma dimensão
	Variável auxiliar
	Variável auxiliar com mais de uma dimensão
	Constante
	Constante com mais de uma dimensão
	Fonte ou Sumidouro
	Fluxo físico
	Fluxo de informação
	Fluxo de inicialização
	Direção na transferência da conexão da variável: entrada (in)
	Direção na transferência da conexão da variável: saída (out)
	Direção na transferência da conexão da variável: entrada e saída (in-out)

Fonte: OLIVEIRA, 2011.

3.6 Módulos Propostos

Sob a ótica de DS, o modelo proposto, que permite a análise dos aspectos relacionados a geração de EE e o abatimento de créditos em ETE urbanas, foi estruturado em cinco módulos principais (módulo de controle/interface gráfica, módulo técnico, módulo ambiental, módulo normativo e módulo econômico), conforme descrito a seguir.

3.6.1 Módulo de controle / Interface Gráfica do SGEETE

Na interface inicial do software, conforme Figura 3.3, deve-se selecionar a tecnologia desejada para a simulação da geração de EE nas Estações de Tratamento de Esgoto, a saber: Grupo Gerador, Microturbina e Definido pelo usuário. Sendo que, por meio desta ultima seleção há a possibilidade de modificar os parâmetros pré-estabelecidos para as tecnologias, como Potência Nominal, Eficiência Elétrica, consumo de biogás da tecnologia, bem como o preço do equipamento de geração e impostos e frete.

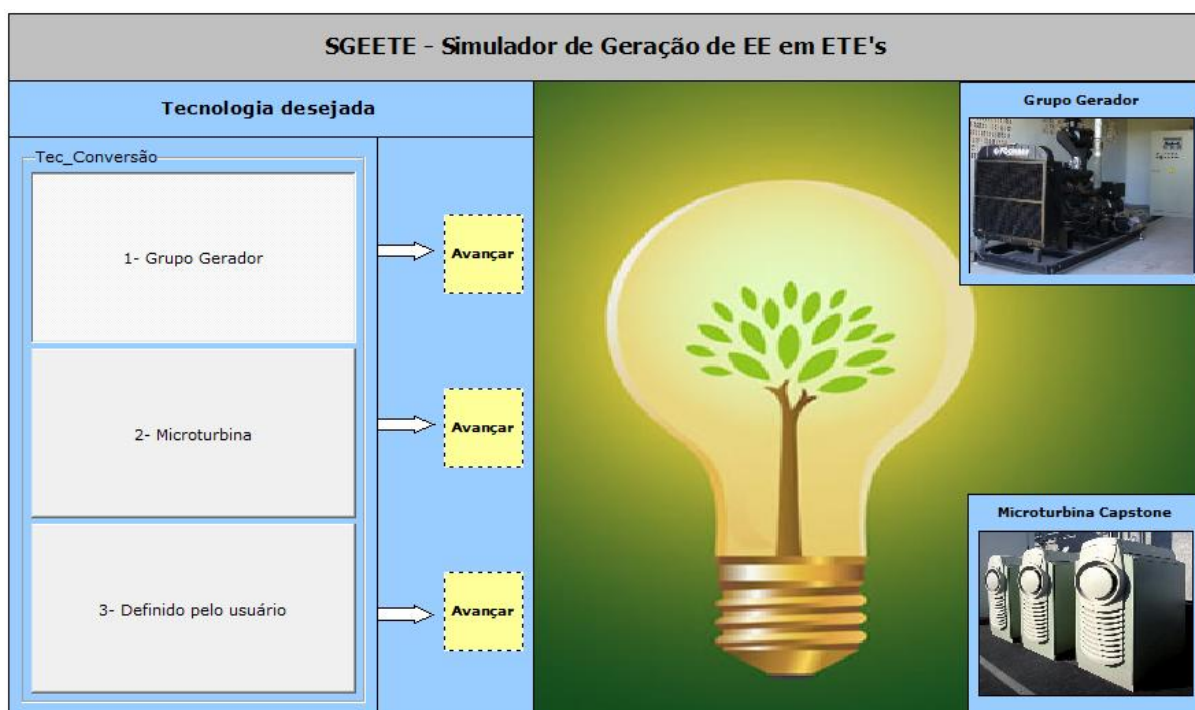


Figura 3.3: Interface inicial do SGEETE

A escolha de somente dois tipos de tecnologia de conversão se deve ao fato de estas tecnologias serem mais adequadas para o uso em ETE's, pois a capacidade de geração de

biogás nas estações de esgoto não são suficientes a ponto de necessitar de uma tecnologia com uma maior capacidade de geração de EE como uma Turbina a Gás (TG's), por exemplo.

Na Figura 3.4 ilustra-se a tecnologia selecionada do Grupo Gerador, os modelos setados nesta interface foram os da empresa Fockink (FOCKINK, 2012). Portanto o usuário possui uma gama de Grupo Geradores que compreendem desde 32 kW até 120 kW como capacidade de geração, a plena carga. Mesmo possuindo parâmetros pré-fixados, há a possibilidade de acrescentar ao valor da tecnologia, gastos como frete e impostos relativos ao equipamento.

Especificações da tecnologia

Grupo Gerador Fockink



Especificações da Tecnologia



<i>Potência nominal</i>	32,00 kW
<i>Potência em KVA</i>	40,00 kVA
<i>Eficiência elétrica</i>	30,45 %
<i>Consumo da tecnologia</i>	17,00 m³/hr
<i>"Overhaul" do equipamento (horas)</i>	5000:00:00
<i>Frete do equipamento (% do investimento)</i>	0,00 %
<i>Impostos do equipamento (% do investimento)</i>	0,00 %
<i>Custo do equipamento (com frete + impostos)</i>	118.000,00 R\$

Início

Avançar

Figura 3.4: Tela de especificação da tecnologia Grupo Gerador.

Na Figura 3.5 mostra-se a tecnologia selecionada da Microturbina, os modelos setados nesta interface foram os da empresa Capstone (Capstone, 2012). Portanto o usuário possui uma gama de Microturbinas que variam de 30 kW até 1000 kW como capacidade de geração, a plena carga. Mesmo possuindo parâmetros pré-fixados, há a possibilidade de acrescentar ao valor da tecnologia, gastos como frete e impostos relativos ao equipamento.

Na Figura 3.6 demonstra-se por sua vez a tecnologia que pode ser definida pelo usuário e que não compreende a gama de equipamentos disponíveis no banco de dados do software. Dados como a potência nominal, eficiência elétrica, consumo da tecnologia, *overhall* do equipamento, frete do equipamento e impostos, podem ser inseridos pelo usuário.

Especificações da tecnologia

Microturbina Capstone



Especificações da Tecnologia

C30 HP



Potência Nominal	30,00 kW
Eficiência Elétrica	26,00 %
Consumo da tecnologia	12,00 m³/hr
"Overhaul" do equipamento (horas)	40000:00:00
Frete do equipamento (% do investimento)	0,00 %
Impostos do equipamento (% do investimento)	0,00 %
Custo do equipamento (com frete + impostos)	200.000,00 R\$

Início

Avançar

Figura 3.5: Tela de especificações da tecnologia Microturbina.

Especificações da tecnologia

Tecnologia definida pelo usuário



Insira os dados da tecnologia

Potência Nominal	<input type="text" value="0,00 kW"/>
Eficiência Elétrica	<input type="text" value="0,00 %"/>
Consumo da tecnologia	<input type="text" value="0,00 m³/hr"/>
"Overhaul" do equipamento (horas)	<input type="text" value="00:00:00"/>
Frete do equipamento (% do investimento)	<input type="text" value="0,00 %"/>
Impostos do equipamento (% do investimento)	<input type="text" value="0,00 %"/>
Custo do equipamento (sem frete e impostos)	<input type="text" value="0,00 R\$"/>

Início

Avançar

Figura 3.6: Tela de especificação da tecnologia definida pelo usuário.

Na Figura 3.7 mostra-se o Painel 1, onde deve-se inserir os consumos em kWh/mês referentes aos doze meses do ano de cada estação a ser analisada. O SGEETE foi projetado para a inserção de até 10 ETE's, sendo que a ETE que mais consome EE é obrigatoriamente a ETE que deve receber a tecnologia de geração. As demais ETE's inseridas são ordenadas em ordem decrescente de consumo, conforme exemplificado na Figura 3.8.



Figura 3.7: Pannel 1 de inserção de dados.

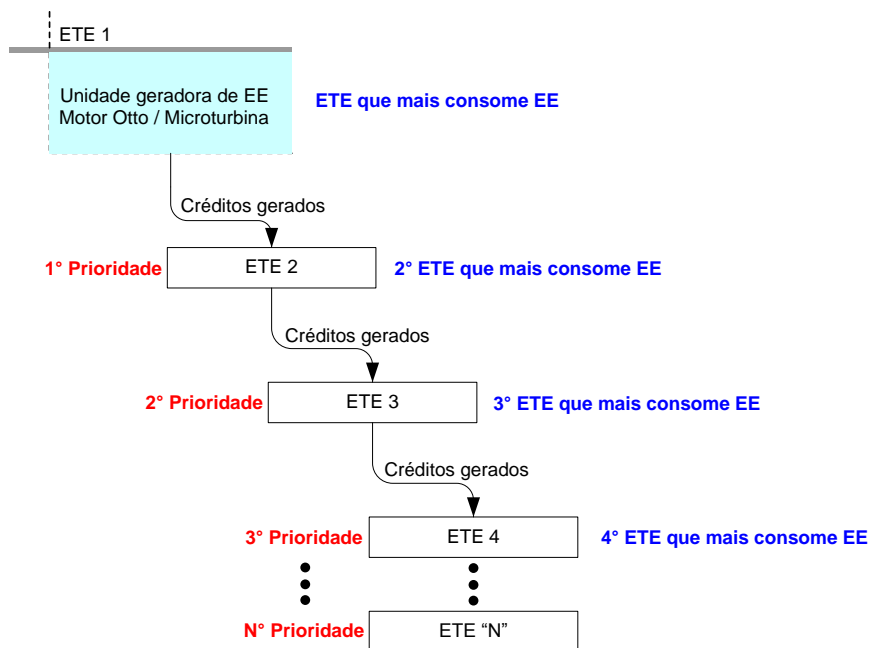


Figura 3.8: Ordem de prioridade no cascateamento de créditos realizados no modelo.

No Pannel 1 é possível também realizar uma simulação com valores padrão de referência e também selecionar, assim que inseridos os consumos, se a estação compreende a classificação B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico ou A4/Serviço Público/Convencional/Trifásico. O SGEETE foi projetado para realizar os cálculos para essas duas classificações. Ficando como sugestão de futuros trabalhos o complemento para a classificação horo-sazonal.

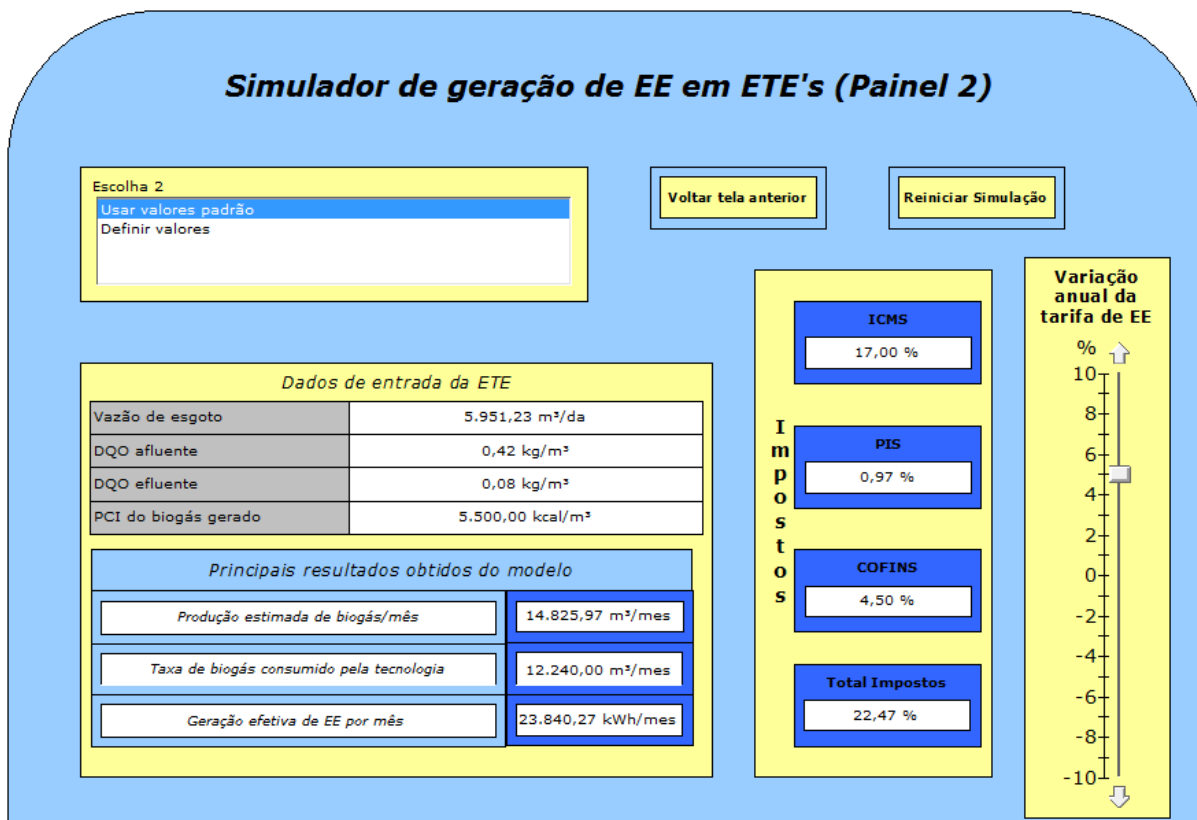


Figura 3.9: Painel 2 de resultados.

No Painel 2 (Figura 3.9), módulo de controle, é possível realizar as diversas simulações imagináveis de acordo com a modelagem dinâmica, mostrando assim a grande capacidade do software na análise do sistema como um todo. Neste painel, os parâmetros que podem ser alterados são:

- Vazão de esgoto de entrada da estação;
- Análise DQO;
- PCI do biogás gerado;
- Impostos de esfera municipal, estadual e federal, como PIS, COFINS e ICMS;
- Variação anual da tarifa de EE com incremento variando de -10% a +10% (ano a ano).

Como resultado para o usuário, tem-se:

- Produção estimada de biogás;
- Taxa de biogás consumido pela tecnologia;

- Geração efetiva de EE por mês;

O impacto da alteração de parâmetros como: vazão de esgoto, análise DQO, PCI do biogás, impostos e variação da taxa anual de energia afetam consideravelmente o módulo econômico do SGEETE, já que todo o sistema é interligado, conforme Figura 3.10.

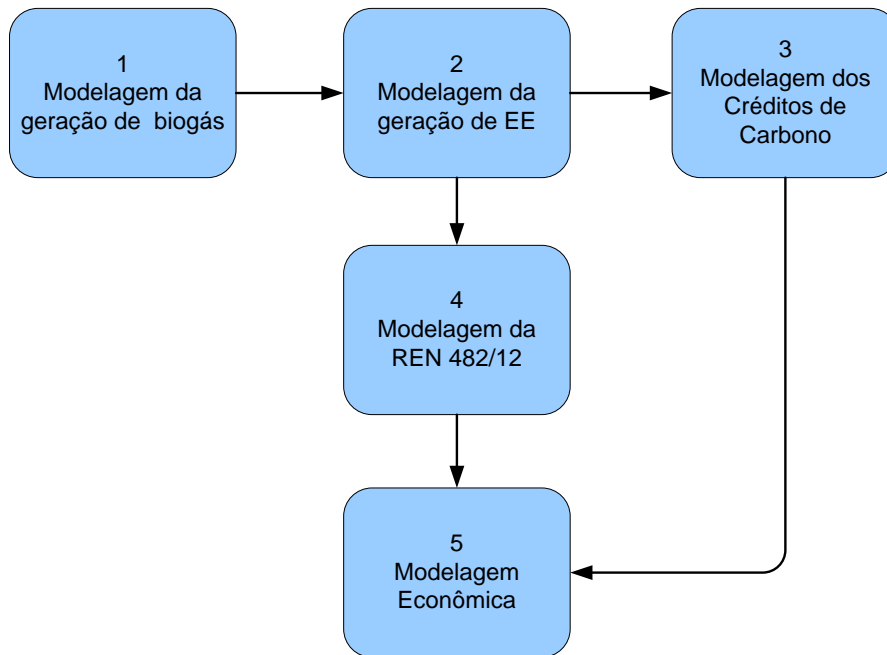


Figura 3.10: Sistema interligado de todo o modelo do SGEETE, em etapas.
Fonte: PRÓPRIA.

O resultado da modelagem da geração de biogás, demonstrado na etapa 1 no diagrama acima, é utilizado para o cálculo da geração de EE (etapa 2), o resultado da geração de EE é utilizado como entrada para a modelagem da resolução normativa 482 da Aneel (etapa 4), o resultado da modelagem dos aspectos normativos é a entrada para o módulo econômico (etapa 5), assim como a modelagem dos créditos de carbono (etapa 3). O resultado da modelagem dos créditos de carbono pode ou não ser utilizado no módulo econômico, já que entra como uma soma em receitas.

Na Figura 3.11 demonstra-se o resultado econômico que é mostrado ao usuário após a alteração dos parâmetros, os resultados obtidos nesta análise são:

- Método da Taxa Interna de Retorno (TIR);
- Método do Valor Presente Líquido (VPL);
- Método do *Payback* Simples (PBS);
- Método do *Payback* Descontado (PBD).

Para uma fácil visualização dos resultados é mostrado também sob a forma de gráfico o comportamento do VPL em função da Taxa de Descapitalização. Sendo que o ponto onde o VPL atinge o valor zero no gráfico é a TIR, e o VPL obtido se dá exatamente neste ponto.

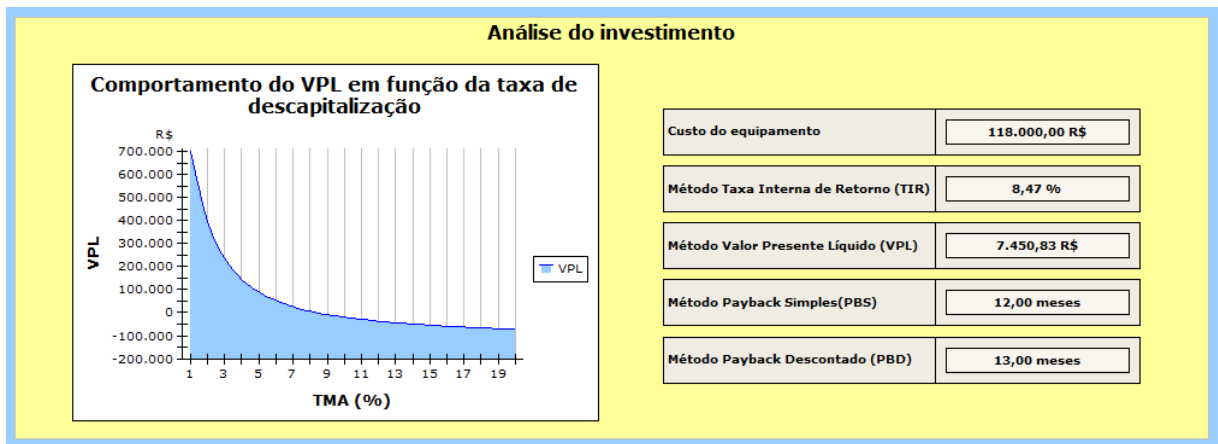


Figura 3.11: Resultado da análise de investimentos.

Cascadeamento de Créditos de todas as ETEs inseridas no modelo

Data	ETE Geradora	ETE 2	ETE 3	ETE 4	ETE 5	ETE 6
01/01/2013	9.516,22 kWh/mes	-6.514,00 kWh/mes	-4.010,00 kWh/mes	-1.493,00 kWh/mes	-1.520,00 kWh/mes	-1.429,00 kWh/mes
01/02/2013	9.116,22 kWh/mes	2.422,22 kWh/mes	-2.297,78 kWh/mes	-1.493,00 kWh/mes	-2.120,00 kWh/mes	-1.447,00 kWh/mes
01/03/2013	8.596,22 kWh/mes	751,22 kWh/mes	-4.228,78 kWh/mes	-1.493,00 kWh/mes	-1.960,00 kWh/mes	-2.069,00 kWh/mes
01/04/2013	9.476,22 kWh/mes	2.431,22 kWh/mes	-1.728,78 kWh/mes	-1.493,00 kWh/mes	-1.960,00 kWh/mes	-1.393,00 kWh/mes
01/05/2013	9.916,22 kWh/mes	3.241,22 kWh/mes	-1.358,78 kWh/mes	-1.493,00 kWh/mes	-2.320,00 kWh/mes	-1.769,00 kWh/mes
01/06/2013	9.636,22 kWh/mes	2.553,22 kWh/mes	-2.026,78 kWh/mes	-3.309,00 kWh/mes	-1.720,00 kWh/mes	-1.862,00 kWh/mes
01/07/2013	8.356,22 kWh/mes	1.701,22 kWh/mes	-3.578,78 kWh/mes	-6.629,00 kWh/mes	-2.080,00 kWh/mes	-1.906,00 kWh/mes
01/08/2013	9.516,22 kWh/mes	1.307,22 kWh/mes	-2.052,78 kWh/mes	-3.405,00 kWh/mes	-2.000,00 kWh/mes	-1.804,00 kWh/mes
01/09/2013	8.436,22 kWh/mes	2.935,22 kWh/mes	-784,78 kWh/mes	-3.069,00 kWh/mes	-1.720,00 kWh/mes	-1.907,00 kWh/mes
01/10/2013	7.596,22 kWh/mes	1.675,22 kWh/mes	-2.354,78 kWh/mes	-3.487,00 kWh/mes	-2.120,00 kWh/mes	-1.760,00 kWh/mes
01/11/2013	9.476,22 kWh/mes	-686,78 kWh/mes	-4.050,00 kWh/mes	-3.538,00 kWh/mes	-1.680,00 kWh/mes	-1.786,00 kWh/mes
01/12/2013	8.956,22 kWh/mes	2.003,22 kWh/mes	-1.416,78 kWh/mes	-3.345,00 kWh/mes	-1.920,00 kWh/mes	-2.062,00 kWh/mes
01/01/2014						

Figura 3.12: Cascadeamento de créditos de todas as ETE's inseridas no modelo.

Como último resultado do Painel 2, tem-se o cascadeamento de créditos de todas as ETE's inseridas no modelo (Figura 3.12). Esta tabela é importante para a visualização do

momento em que os créditos gerados não estão sendo mais abatidos, isto é simbolizado pelo sinal negativo dos créditos.

3.6.2 Relação entre os DEF's

De forma a facilitar o entendimento das entradas e saídas dos DEF's demonstrados nos itens 3.6.3 ao 3.6.6 será analisada a figura 3.13.

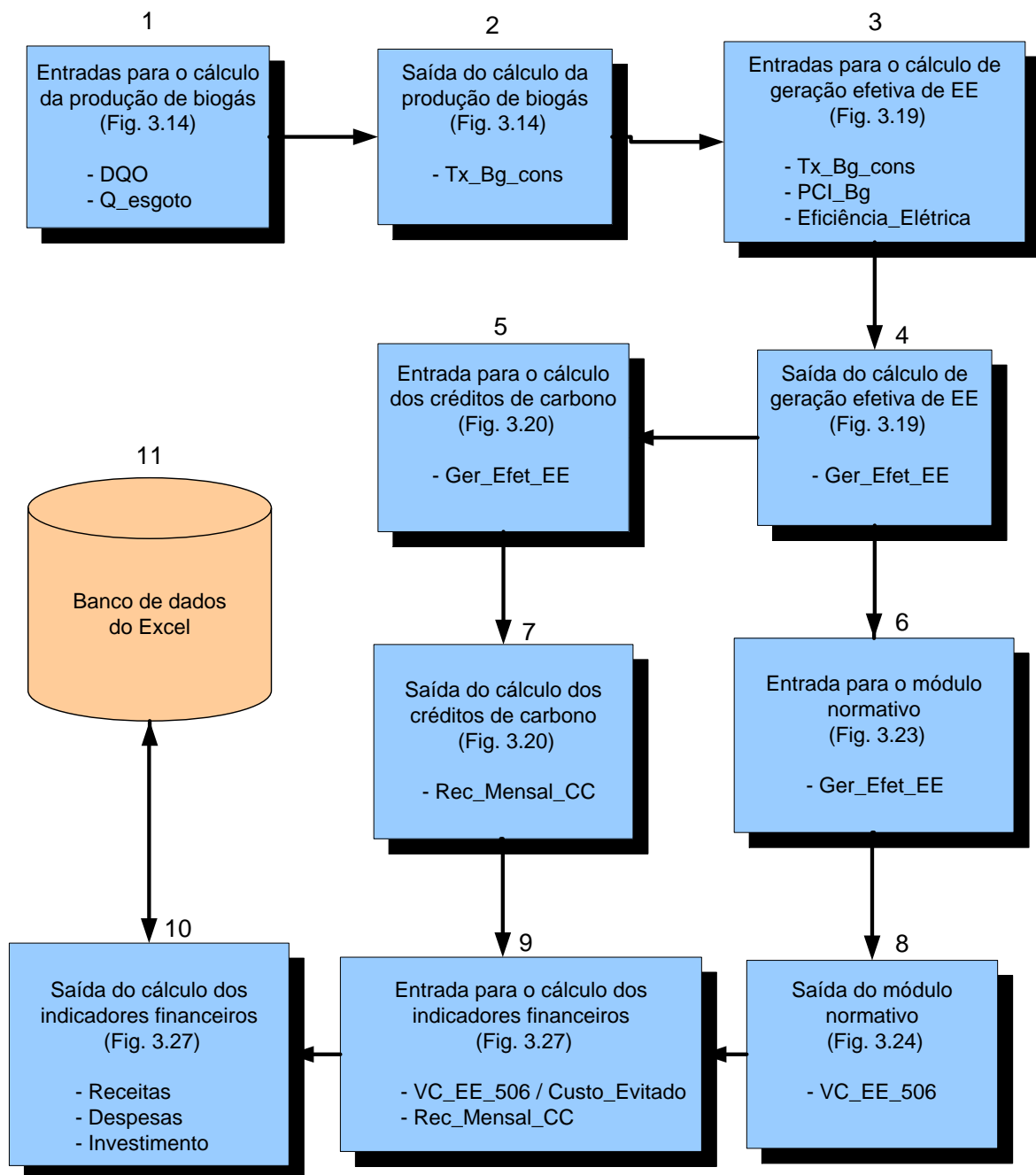


Figura 3.13: Relação entre os DEF's desenvolvidos no SGEETE, em etapas.

Fonte: PRÓPRIA

Na etapa 1, por meio da figura 3.14 tem-se como entradas para o cálculo da produção de biogás a análise DQO representada no DEF como duas variáveis auxiliares denominadas de “DQO_afluente” e “DQO_efluente”, e a vazão de entrada do esgoto da ETE representada no DEF como uma variável auxiliar denominada de “Q_esgoto”. Como saída da Figura 3.14 tem-se a taxa de biogás que é consumida pela tecnologia que foi previamente selecionada pelo usuário, representada no DEF como uma variável auxiliar denominada de “Tx_Bg_cons” (Etapa 2).

O resultado obtido na etapa 2 do processo, ou seja, a taxa de biogás que é consumida pela tecnologia, é a entrada para o DEF da Figura 3.19 (etapa 3), utilizado para o cálculo da geração efetiva de EE. Neste ponto, tem-se também como entrada o PCI do biogás gerado, além da eficiência elétrica da tecnologia selecionada, representados como variáveis auxiliares, denominados respectivamente de “PCI_Bg” e “Eficiência_Elétrica”.

Na etapa 4, como resultado da Figura 3.19 tem-se a Geração efetiva de EE, representada no DEF como uma variável auxiliar denominada de “Ger_Efet_EE”, que por sua vez é a entrada para o cálculo dos créditos de carbono (etapa 5) mostrado no DEF da figura 3.20. A variável auxiliar “Ger_Efet_EE” também é um dado de entrada para o módulo normativo (etapa 6), conforme observado na Figura 3.23, que avalia o comportamento dos créditos gerados e compensados.

Na etapa 7, como saída do cálculo dos créditos de carbono (Figura 3.20) tem-se a receita mensal de EE, representado no DEF como uma variável auxiliar denominada de “Rec_Mensal_CC”, com a possível comercialização dos créditos de carbono. A saída do módulo normativo (etapa 8) é o valor da conta de EE calculado de acordo com o cascadeamento de créditos (ver Fig. 3.22) e baseado na fórmula elencada na cartilha da Aneel (Equações 3.17 e 3.18). Tanto a saída do módulo normativo (etapa 8), quanto a saída do cálculo dos créditos de carbono (etapa 7) são entradas para o cálculo dos indicadores financeiros, conforme pode ser observado na Figura 3.27.

Na etapa 9, no cálculo dos indicadores financeiros, a variável auxiliar denominada de “Rec_Mensal_CC” pode ou não ser levada em consideração, pois a possível comercialização dos créditos de carbono é uma opção do investidor que realizará a simulação no SGEETE. Como saída do cálculo dos indicadores financeiros tem-se: Receitas, Despesas e Investimento. Estes dados de saída encontrados na etapa 10 são exportados para as planilhas do Excel, sendo esta utilizada como banco de dados do software desenvolvido (etapa 11). Todas as leis,

custos referentes aos tipos de consumidores, consumo de todas as estações, bem como os cálculos dos indicadores financeiros, se encontram nesse banco de dados criado.

É importante frisar que o fluxo de informações das etapas 10 e 11 são uma via de duas mãos, conforme observado na Figura 3.13, ou seja, ao mesmo tempo em que o Excel é utilizado como banco de dados e alguns cálculos complexos, o Powersim importa os dados encontrados nas planilhas, isso para um tratamento final no Módulo de controle/Interface Gráfica do SGEETE. Como resultado de exportação/importação de dados têm-se as Figuras 3.11 e 3.12 geradas para a tomada de decisão do gestor.

3.6.3 Módulo Técnico

O módulo técnico inclui tanto a modelagem da produção de biogás, quanto a modelagem da geração de EE a partir do biogás gerado. Como dados de entrada para a produção de biogás em ETE's têm-se a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a vazão de entrada de esgoto (Q_{esgoto}). De acordo com Chernicharo (1997) e Cassini (2003) é possível estimar a geração de biogás em ETE's da seguinte forma:

$$DQO_{CH_4} = Q_{med} \times [(S_0 - S) - (Y_{obs} \times S_0)] \quad (3.1)$$

onde,

DQO_{CH_4} : parcela de DQO convertida em gás metano ($Kg_{DQO_{CH_4}}/dia$);

Q_{med} : vazão afluyente média (m^3/dia);

S_0 : DQO do afluyente (mg/l);

S : DQO do efluyente (mg/l);

Y_{obs} : coeficiente de produção de sólidos, em termos de DQO

($0,11$ a $0,23 Kg_{DQO_{olodo}}/Kg_{DQO_{aplicada}}$).

Para a correção da temperatura operacional do reator tem-se:

$$K(t) = \frac{(P \times K)}{[R \times (273 + t)]} \quad (3.2)$$

em que,

$K(t)$: fator de correção para a temperatura operacional do reator;

P : pressão atmosférica (1 atm);

K : COD correspondente a um mol de CH_4 (64 gDQO/mol);

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

t : temperatura operacional do reator (20 a 27°C).

A produção volumétrica do metano é encontrada através da seguinte relação:

$$Q_{CH_4} = \frac{DQO_{CH_4}}{K(t)} \quad (3.3)$$

em que,

Q_{CH_4} : produção volumétrica de metano (m³/dia);

Considerando-se a produção de metano igual a 75% de todo o biogás produzido tem-se:

$$Q_{biogás} = \frac{Q_{CH_4}}{0,75} \quad (3.4)$$

onde,

$Q_{biogás}$: produção volumétrica de biogás (m³/dia).

Considerando-se a produção real de biogás em cerca de 60% da produção teórica, tem-se:

$$Q_{real} = Q_{biogás} \times 0,6 \quad (3.5)$$

em que,

Q_{real} : produção real de biogás (m³/dia).

O resultado obtido pela equação 3.5, ou seja, Q_{real} , corresponde a variável de taxa da Figura 3.14, denominada de “Tx_Prod_Bg”. Sendo assim, Figura 3.14 apresenta a modelagem da produção do biogás na ETE, lembrando que, o biogás que não é utilizado para o abatimento de créditos, é queimado diretamente nos *flares* da estação.

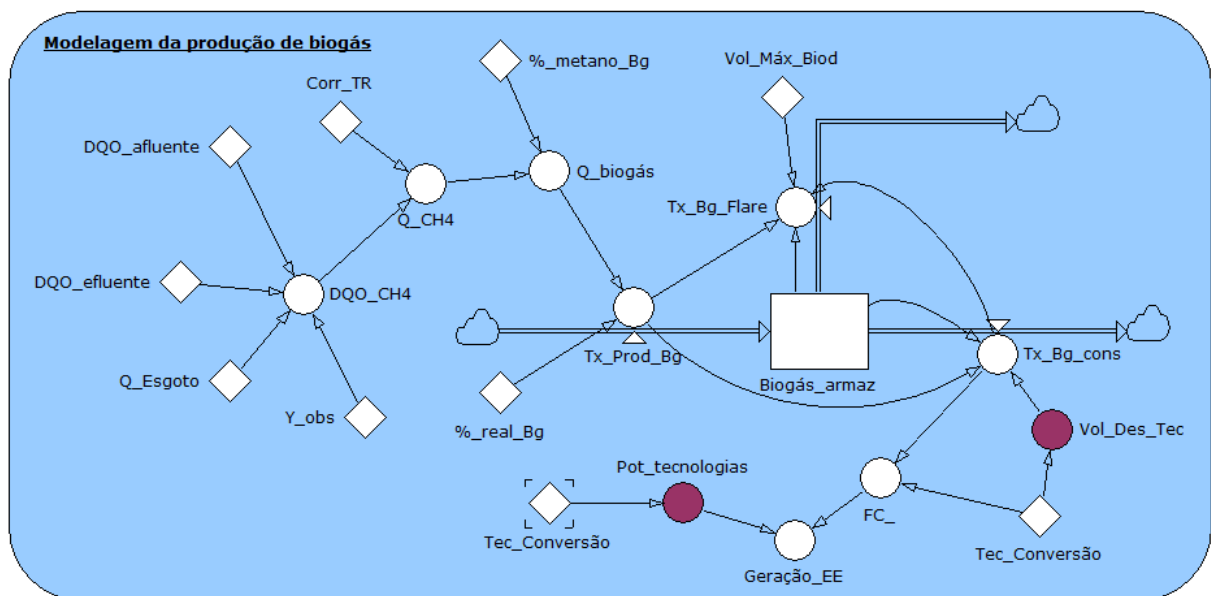


Figura 3.14: Diagrama de estoque e fluxo da produção de biogás na ETE.

Observando a figura 3.14, é possível notar quatro símbolos importantes do DEF: Biogás_armaz, Tx_Bg_cons, Tx_Bg_Flare e Vol_Máx_Biod. A variável de nível, denominada de Biogás_armaz representa tanto um gasômetro armazenador de biogás, de forma a manter constante o biogás injetado na tecnologia de EE, quanto o próprio volume do biodigestor.

Embora neste trabalho considera-se que ETE's de grande porte não necessitem de gasômetro, pois o biogás gerado por meio dos biodigestores RAFA conseguem manter um fluxo constante de biogás para suprir a demanda da tecnologia selecionada pelo usuário, cabe realizar a modelagem dinâmica de todo o processo, já que o trabalho se propõe a fazer uma ferramenta geral de decisão do ponto de vista do investidor. Sendo assim, o Biogás_armaz pode ser assim expresso:

$$Biogás_armaz = +dt \times Tx_Prod_Bg \quad (3.6)$$

Onde,

Biogás_armaz: Biogás armazenado no biodigestor (m^3);

$+dt$: Fluxo com variação temporal (derivada);

Tx_Prod_Bg: igual ao *Bg_gerado*, ou seja, biogás gerado por mês na Estação de Tratamento de Esgoto ($m^3/mês$);

A variável de taxa, denominada de “Tx_Bg_cons” na Figura 3.14, pode ser assim analisada, de acordo com a lógica computacional da modelagem em DS:

Restrição para ação:

$$Vol_Des_Tec \geq \frac{Biogás_armaz}{timestep} + Tx_Prod_Bg \quad (3.7)$$

Onde,

Vol_Des_Tec: Volume desejado da tecnologia selecionada à potência nominal (m^3/h).

Ação tomada de acordo com a restrição positiva imposta (restrição 3.7)

$$\frac{Biogás_armaz}{timestep} \quad (3.8)$$

Ação tomada de acordo com a restrição negativa imposta (restrição 3.7)

$$Vol_Des_Tec \quad (3.9)$$

A variável de taxa, denominada de “Tx_Bg_Flare” na Figura 3.14, pode ser assim analisada, de acordo com a lógica computacional da modelagem do sistema:

$$\left(\frac{Biogás_armaz}{timestep} + Tx_{ProdBg} - Tx_Bg_cons \right) > Vol_Máx_Biod \quad (3.10)$$

Onde,

$Vol_Máx_Biod$: Volume máximo do biodigestor ($m^3/mês$).

Ação tomada de acordo com a restrição positiva imposta acima (restrição 3.10)

$$\left(\frac{Biogás_armaz}{timestep} + Tx_Prod_Bg - Tx_Bg_cons \right) - Vol_Máx_Biod \quad (3.11)$$

Para este caso em específico não há ação tomada de acordo com a restrição negativa imposta pela situação mostrada na lógica do sistema, pois não há uma situação contrária a afirmação, portanto o resultado para uma situação contrária é “0” (zero).

Tabela 3.2: Variáveis do DEF da produção do biogás na ETE

Variável	Unidade	Descrição
DQO_afluente DQO_efluente	mg/l	Demanda Química de Oxigênio do afluente e efluente
Q_Esgoto	m^3/dia	Vazão total de entrada de esgoto na Estação de Tratamento
Corr_TR	kg_{DQO}/m^3	Correção da temperatura operacional do reator
Y_obs	$kg_{DQO\ todo} / Kg_{DQO\ aplicada}$	Coefficiente de produção de sólidos, em termos de DQO
DQO_CH4	Kg_{DQOCH_4}/dia	Parcela de DQO convertida em gás metano
Q_CH4	m^3/dia	Produção volumétrica de metano
Tx_Prod_Bg	m^3/mes	Biogás gerado por mês na Estação de Tratamento de Esgoto
Q_biogás	l/dia	Produção volumétrica de biogás
Biogás_armaz	m^3	Biogás armazenado no biodigestor
%_metano_Bg	%	Porcentagem do metano em relação ao biogás produzido
%_real_Bg	%	Porcentagem da produção real de biogás em relação a teórica
Tx_Bg_Flare	m^3/mes	Parcela de biogás queimado em <i>flare</i>

Vol_Máx_Biod	m^3/mes	Volume máximo do biodigestor
Tx_Bg_cons	m^3/mes	Taxa de biogás exigida pela tecnologia para a geração de EE
Vol_Des_Tec	m^3/h	Volume desejado da tecnologia selecionada à potência nominal
Tec_Conversão	Adimensional	Esta variável representa os tipos de tecnologia que podem ser selecionadas pelo usuário
FC_	%	Gráfico dos fatores de carga das tecnologias
Geração_EE	$kWh/mês$	Geração de EE dado ao biogás gerado na estação
Pot_tecnologias	kW	Potência da tecnologia selecionada pelo usuário

A relação entre a potência ativa do gerador e o consumo de biogás necessário para a geração de energia elétrica pode ser observado na Figura 3.15.

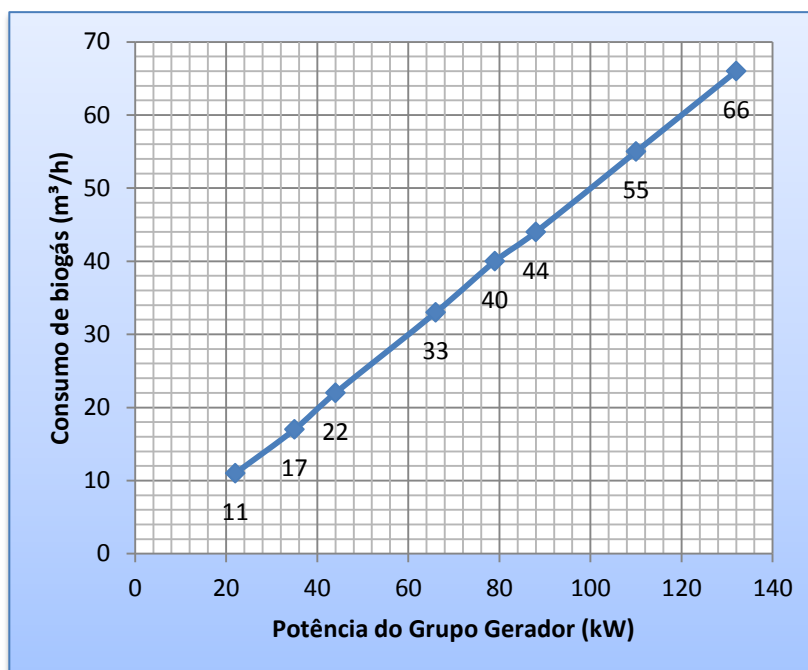


Figura 3.15: Relação entre a Potência do Grupo Gerador e seu consumo de biogás.
Fonte: PRÓPRIA.

Se por acaso for observado que não há biogás suficiente para a operação do Grupo Gerador a plena carga, o fator de carga da tecnologia selecionada é alterado, portanto a geração de EE nesta condição é reduzida consideravelmente, isso pode ser comprovado pela Figura 3.16, tomando como base um Grupo Gerador de 32 kW.

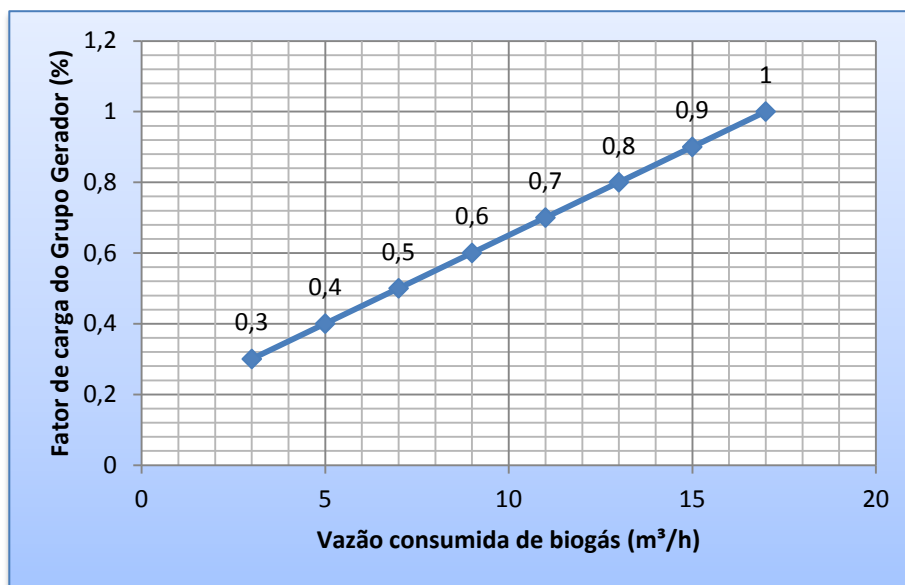


Figura 3.16: Relação entre vazão consumida e Fator de Carga do Grupo Gerador de 32 kW.
Fonte: PRÓPRIA.

A relação entre a potência ativa da Microturbina e o consumo de biogás necessário para a geração de energia elétrica também pode ser observado na Figura 3.17 abaixo.

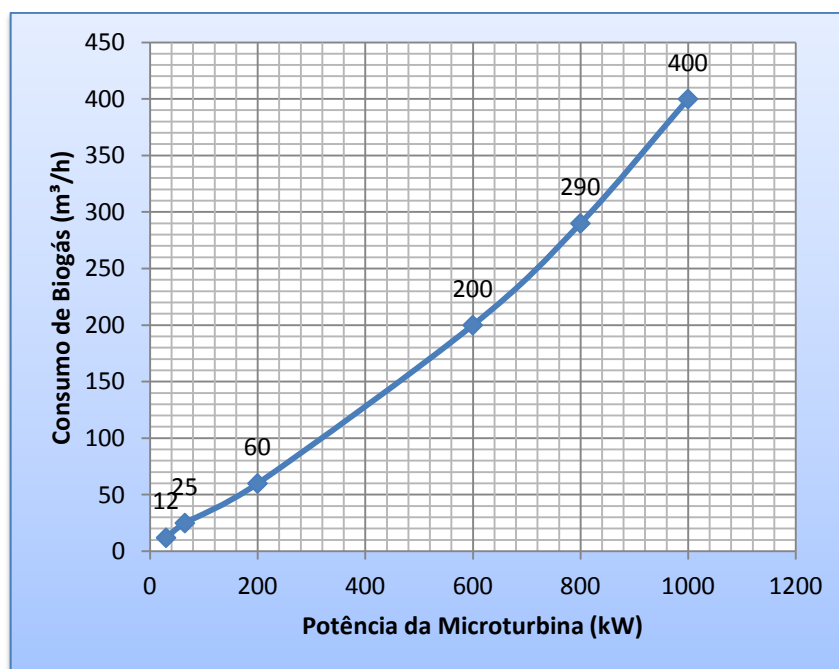


Figura 3.17: Relação entre a Potência da Microturbina e seu consumo de biogás.
Fonte: PRÓPRIA.

Se por acaso for observado que não há biogás suficiente para a operação Microturbina à plena carga, o fator de carga da tecnologia selecionada é alterado, portanto a geração de EE nesta condição é reduzida consideravelmente, isso pode ser comprovado pela Figura 3.18, tomando como base uma Microturbina de 30 kW.

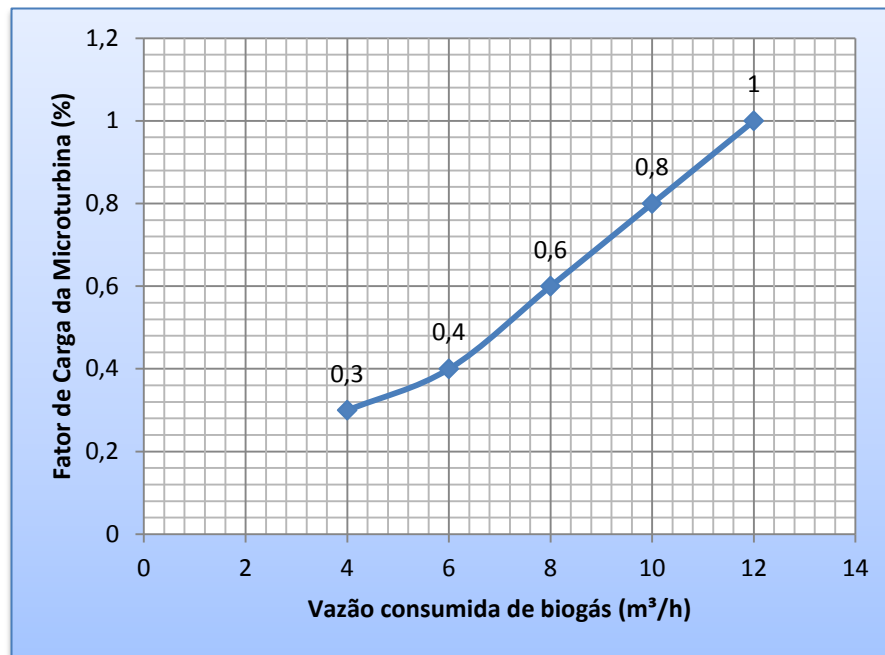


Figura 3.18: Relação entre vazão consumida e Fator de Carga da Microturbina de 30 kW.
Fonte: PRÓPRIA.

O cálculo da produção efetiva de EE nas estações de esgoto, dado o biogás gerado, pode ser assim expresso (COSTA, 2006; SANTOS, 2009):

$$GEf_{EE} = Q_{Bg} \times PCI_{Bg} \times \eta_{gerador} \times \frac{4,2868}{86400} \times 720 \text{ horas} \quad (3.12)$$

Onde,

GEf_{EE} : Geração efetiva de EE na Estação de Tratamento de Esgoto ($kWh/mês$);

Q_{Bg} : Vazão de biogás gerado pela Estação de Tratamento de Esgoto (m^3/dia);

PCI_{Bg} : Poder calorífico inferior do biogás gerado ($kcal/m^3$);

$\eta_{gerador}$: Eficiência elétrica da tecnologia de conversão (%);

4,2868: Fator de conversão de “kcal” para “kJ”;

86400: Fator de conversão de dia para segundos;

Na Figura 3.19 apresenta-se a modelagem de geração efetiva de energia a partir do biogás gerado na estação de tratamento de esgoto, já que a geração de EE não depende só de fatores como a demanda bioquímica de oxigênio, nem da vazão de entrada de esgoto na estação, mas depende também do PCI do biogás gerado e do rendimento da tecnologia de conversão.

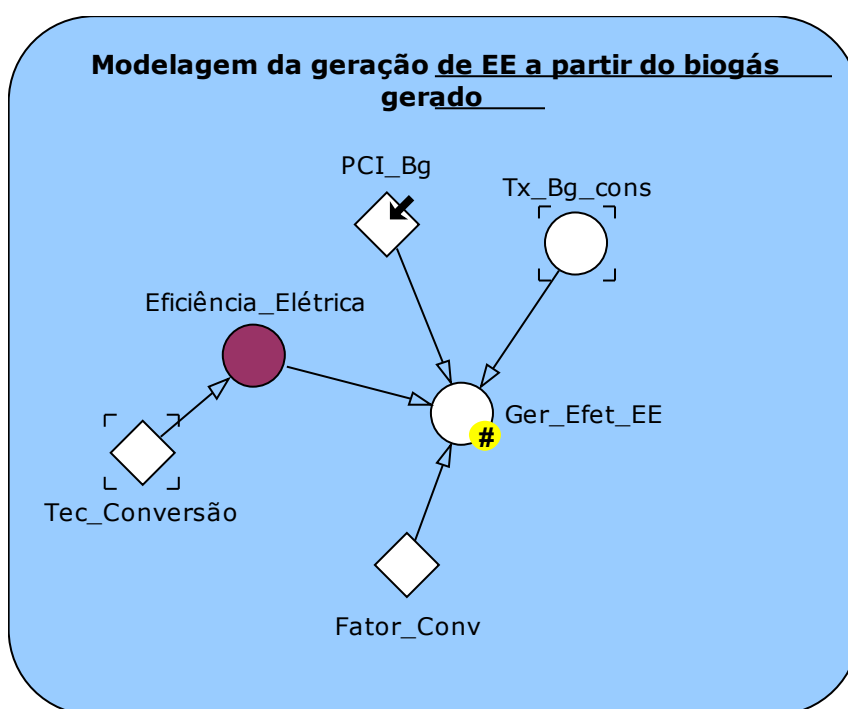


Figura 3.19: Diagrama de estoque e fluxo da geração efetiva de EE na ETE.

Tabela 3.3: Variáveis do DEF da geração efetiva de EE na ETE

Variável	Unidade	Descrição
PCI_Bg	<i>kcal/m³</i>	Poder calorífico inferior do biogás gerado
Tx_Bg_cons	<i>m³/mes</i>	Biogás gerado por mês na Estação de Tratamento de Esgoto
Eficiência_Elétrica	%	Eficiência Elétrica da tecnologia de conversão

Ger_Efet_EE	<i>kWh/mês</i>	Produção de EE efetiva, dado a tecnologia selecionada
Fator_Conv	Adimensional	4,1868=Fator de conversão de Kcal para KJ 86400=Fator de conversão de dia para segundos
Tec_Conversão	Adimensional	Esta variável representa os tipos de tecnologia que podem ser selecionadas pelo usuário

3.6.4 Módulo Ambiental

O módulo ambiental tem por objetivo a conversão da energia elétrica gerada através do biogás produzido na ETE em toneladas de dióxido de carbono equivalente, e conseqüentemente no ganho mensal com a possível comercialização no mercado de crédito carbono. Para tanto foi utilizada a seguinte expressão (PÉCORA, 2006):

$$RM_{cc} = GEf_{EE} \times FIC \times VCEE \quad (3.13)$$

Sendo que,

RM_{cc} : Receita mensal obtida com a comercialização dos créditos de carbono ($R\$/mês$);

GEf_{EE} : Geração efetiva de EE na Estação de Tratamento de Esgoto ($kWh/mês$);

FIC : Fator de intensidade de carbono ($0,5 tCO_2 eq/MWh$);

$VCEE$: Valor de Certificado de Emissões Evitadas (CEE) ($US\$ 10,00/tCO_2 eq.$);

O fator de intensidade de carbono utilizado neste trabalho (FIC de $0,5 tCO_2 eq/MWh$) e o valor de certificado de emissões evitadas ($VCEE$ de $US\$ 10,00/tCO_2 eq.$) foram os mesmos valores adotados por Pécora, 2006. Também é possível estimar a receita total obtida com a comercialização dos créditos de carbono, conforme observado na expressão abaixo (PÉCORA, 2006):

$$RTM_{cc} = VUP \times RM_{cc} \quad (3.14)$$

Onde,

RTM_{cc} : Receita total obtida com a comercialização dos créditos de carbono (R\$);

VUP : Vida útil da planta de geração de EE na ETE (mês);

RM_{cc} : Receita mensal obtida com a comercialização dos créditos de carbono (R\$/mês).

A Figura 3.20 apresenta a modelagem dos créditos de carbono para as estações de tratamento de esgoto.

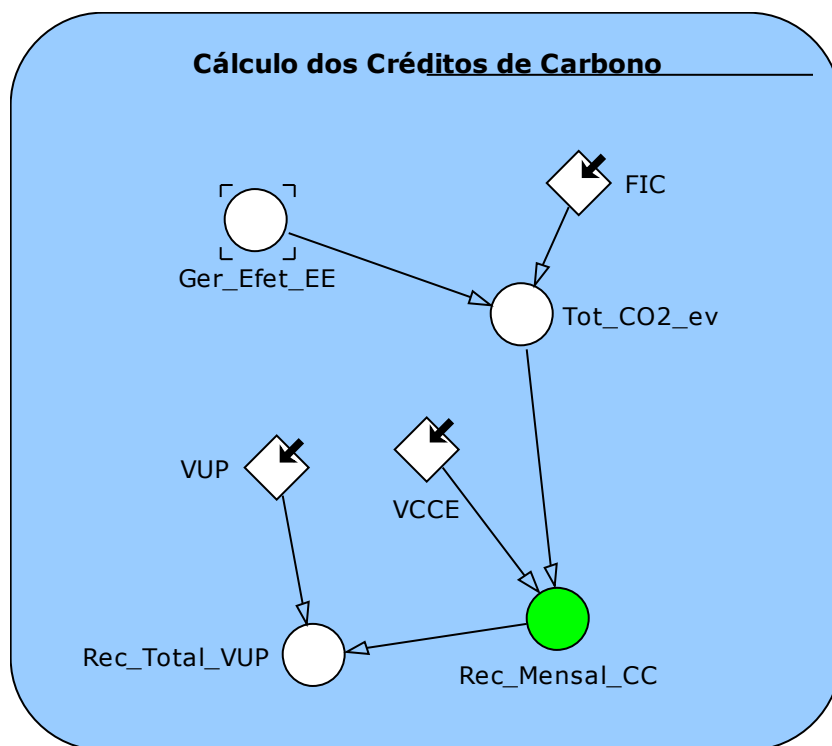


Figura 3.20: Diagrama de estoque e fluxo da receita obtida com a comercialização dos créditos de carbono em ETE.

Tabela 3.4: Variáveis do DEF da receita obtida com a comercialização dos créditos de carbono nas ETE's.

Variável	Unidade	Descrição
Ger_Efet_EE	$kWh/mês$	Produção de EE efetiva, dado a tecnologia selecionada
FIC	$tCO2_{eq}/MWh$	Fator de intensidade de carbono
Tot_CO2_ev	$tCO2_{eq}/ano$	Total de CO_2 evitado por ano
VCCE	$'US\$/tCO2_{eq}$	Valor de Certificado de Emissões Evitadas

Rec_Mensal_CC	'R\$'/mes	Total em R\$ obtidos mensalmente pela quantidade evitada de CO ₂ lançados na atmosfera
VUP	ano	Vida útil da planta de geração de EE na ETE
Rec_Total_VUP	'R\$'	Receita total obtida em R\$ de acordo com o tempo de vida útil da planta de geração de EE

3.6.5 Módulo Normativo

A criação da Resolução Normativa 482/12 (ANEEL, 2012) alterou de forma significativa o ambiente de geração de energia elétrica (EE) para os novos investidores das empresas de saneamento básico, denominados pela Aneel de microgeradores ou minigeradores de energia elétrica.

Embora não se possa comercializar esta energia elétrica, a criação dessa resolução foi um importante passo ao crescimento da GD no Brasil. A proposta da criação de um módulo normativo foi justamente modelar um novo ambiente de negócio, onde as despesas se tornam em receitas do empreendimento.

De acordo com o Art. 7º inciso II da REN 482, o consumo a ser faturado, referente à energia elétrica ativa, é a diferença entre a energia consumida e a injetada. Portanto os créditos gerados podem ser assim equacionados:

$$CEAF = EC - GEf_{EE} \quad (3.15)$$

Sendo que,

CEAF : Consumo de energia elétrica ativa a ser faturada (créditos gerados em *kWh/mês*);

EC: Energia elétrica consumida pelo microgerador ou minigerador (*kWh/mês*);

GEf_{EE}: Geração efetiva de EE na Estação de Tratamento de Esgoto (*kWh/mês*).

Se a energia injetada na rede for maior do que a energia consumida pela unidade consumidora, têm-se créditos gerados, ou seja:

$$GEf_{EE} > EC \quad (3.16)$$

Estes créditos, por sua vez, devem ser utilizados nos meses subsequentes, preferencialmente para o abatimento no próprio local de geração de EE.

Os montantes de energia ativa injetada que não tenham sido compensados na própria unidade consumidora poderão ser utilizados para compensar o consumo de outras unidades previamente cadastradas para esse fim e atendidas pela mesma distribuidora desde que tenha o mesmo CNPJ ou CPF (Art. 7º inciso IV).

Se existir mais de uma unidade consumidora participante do sistema de compensação de EE, o consumidor deverá definir a ordem de prioridade das unidades consumidoras, devendo a unidade consumidora onde se encontra instalada à geração ser a primeira a ter seu consumo compensado (Art. 7º inciso V).

Os créditos, após a compensação tanto da unidade geradora quanto das unidades participantes do sistema de compensação, devem ser utilizados dentro de um prazo máximo de 36 meses, após este período os créditos expiram e são revertidos em modicidade tarifária (Art. 7º inciso VII).

Na Figura 3.21 apresenta-se o DEF de Consumo em kWh/mês de dez estações de tratamento de esgoto, portanto, o usuário insere os dados de consumo de até dez ETE's, a linguagem de programação feita no Powersim é capaz de colocá-las automaticamente em ordem de prioridade, ou seja, a ETE que mais consome EE é a ETE que deve receber a instalação da uma unidade de geração de EE, os créditos que sobram da ETE geradora é utilizado para abater a segunda ETE que mais consome EE e assim por diante.

Para um melhor entendimento do processo será analisado a Figura 3.22. Observe que os créditos gerados em Janeiro do primeiro ano de implantação do projeto são utilizados para abater o consumo referente ao mês de fevereiro da segunda ETE, denominada como 1º prioridade, já que a ETE geradora de EE é considerada como prioridade "0". Os créditos que sobrarem da 1º prioridade são utilizados para abater o consumo do mês de fevereiro da 2º prioridade. Semelhantemente, os créditos que restarem da 2º prioridade são utilizados para abater o consumo da 3º prioridade. Conforme pode ser observado na figura, há um momento em que não existem mais créditos a serem abatidos, isso é demonstrado por um sinal negativo

proveniente da diferença entre a energia injetada e a energia consumida. A todo este processo dá-se o nome de Cascadeamento de Créditos. Também é possível notar que o crédito gerado em dezembro na ETE geradora é utilizado para abater o consumo referente ao mês de janeiro da 1º prioridade, este comportamento se dá somente no primeiro ano, sendo assim, nos anos subsequentes o processo de Cascadeamento se dá por completo.

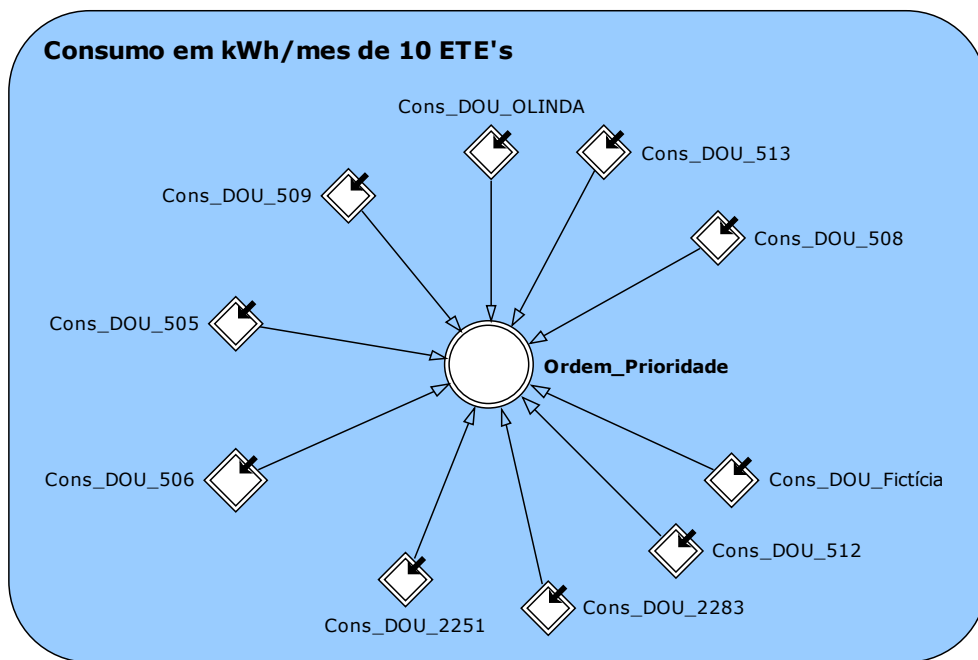


Figura 3.21: Diagrama de estoque e fluxo do consumo em kWh/mês das dez ETE's que podem ser inseridas no modelo.

Tabela 3.5: Variáveis do DEF que recebem os consumos das dez ETE's inseridas no modelo.

Variável	Unidade	Descrição
Cons_DOU_506	<i>kWh/mês</i>	Consumo em kWh/mês dos 12 meses do ano para cada ETE inserida no modelo.
Cons_DOU_505		
Cons_DOU_509		
Cons_DOU_OLINDA		
Cons_DOU_513		
Cons_DOU_508		
Cons_DOU_Fictícia		
Cons_DOU_512		
Cons_DOU_2283		
Cons_DOU_2251		

Ordem_Prioridade	<i>kWh/mês</i>	Ordena cada ETE em ordem de prioridade para o abatimento dos créditos
------------------	----------------	---

Assim que a diferença entre a energia injetada e a consumida passar a ser negativa, significa que a receita, que era a própria energia consumida passa agora a ser os próprios créditos que restaram do Cascadeamento, isso é mostrado na figura pelo destaque azul nos resultados. Este comportamento se deve ao fato de as despesas do processo passarem a ser receitas, ou seja, o destaque em azul é utilizado para o cálculo da fatura de EE que iria ser contabilizada pela concessionária, mas passou a ser ganho financeiro dado ao investimento do projeto.

A partir dos destaques em azul é possível realizar o cálculo da fatura de energia elétrica para os consumidores do Grupo B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico, definida pela Cartilha da Aneel como (ANEEL, 2013):

$$VCC = \left[\left(\frac{VTPA}{1 - (PIS + COFINS + ICMS)} \right) \times EE_{cons} \right] + CIP \quad (3.17)$$

Sendo que,

VCC: Valor a ser cobrado do consumidor (*R\$*);

VTPA: Valor da tarifa publicada pela Aneel (*R\$/kWh*);

PIS: Programa de Integração Social (**%**);

COFINS: Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (**%**);

ICMS: Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços (**%**);

EE_{cons}: Energia Elétrica Consumida na ETE (*kWh*);

CIP: Contribuição para o Custeio do Serviço de Iluminação Pública (*R\$*).

Figura 3.22: Cascateamento de créditos em ETE Urbanas.

ETE Geradora												
	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
EI	21600	21600	21600	21600	21600	21600	21600	21600	21600	21600	21600	21600
EC	10840	11240	11760	10880	10440	10720	12000	10840	11920	12760	10880	11400
Créditos	10760	10360	9840	10720	11160	10880	9600	10760	9680	8840	10720	10200
1° Prioridade												
		10760	10360	9840	10720	11160	10880	9600	10760	9680	8840	10720
EC	6514	7094	8365	6165	6235	7363	7935	7049	6581	6761	8283	7473
Créditos		3666	1995	3675	4485	3797	2945	2551	4179	2919	557	3247
2° Prioridade												
		3666	1995	3675	4485	3797	2945	2551	4179	2919	557	3247
EC	4010	4720	4980	4160	4600	4580	5280	3360	3720	4030	4050	3420
Créditos		-1054	-2985	-485	-115	-783	-2335	-809	459	-1111	-3493	-173
3° Prioridade												
	#	#	#	#	#	#	#	#	459	#	#	#
EC	#	#	#	#	#	#	#	#	3069	#	#	#
Créditos	#	#	#	#	#	#	#	#	-2610	#	#	#

Fonte: PRÓPRIA

A Figura 3.23 apresenta a DEF que executa o Cascadeamento mostrado na Figura 3.12. A Figura 3.23 é apresentada de forma reduzida, devido ao tamanho da modelagem. Sendo assim, a mesma, possui ainda mais 5 blocos iguais a este, compreendendo até a 9ª prioridade, já que o referido trabalho limitou a quantidade de ETE's inseridas no sistema para até 10 Estações.

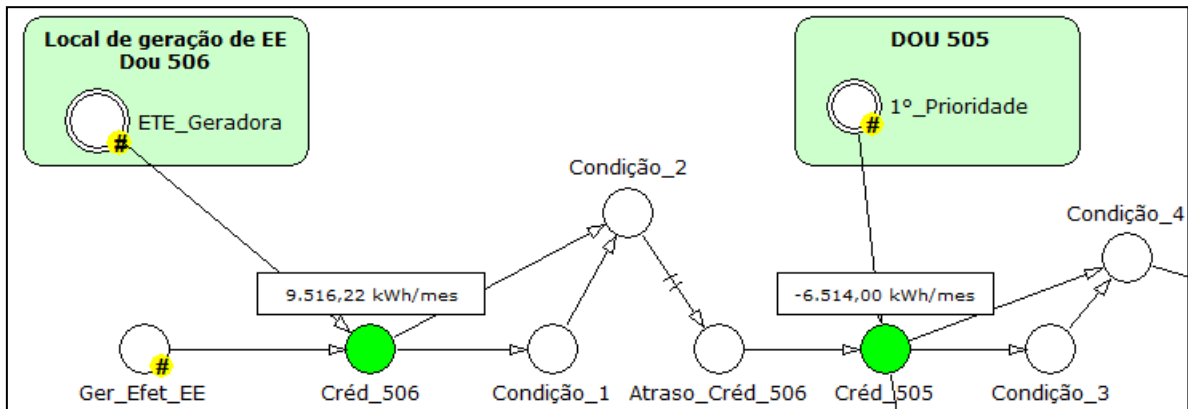


Figura 3.23: Diagrama de estoque e fluxo que executa o Cascadeamento de créditos nas dez ETE's que podem ser inseridas no modelo.

Tabela 3.6: Variáveis do DEF que executam o cascadeamento de créditos nas dez ETE's que podem ser inseridas no modelo

Variável	Unidade	Descrição
ETE_Geradora 1º_Prioridade ...	<i>kWh/mês</i>	Consumo em kWh/mês dos 12 meses do ano para cada ETE inserida no modelo. Essas variáveis ordenam automaticamente a estações desde a ETE que mais consome EE até a que menos consome
Ger_Efet_EE	<i>kWh/mês</i>	Produção de EE efetiva, dado a tecnologia selecionada
Créd_506 Créd_505 ...	<i>kWh/mês</i>	Representam aos créditos gerados
Condição_1 Condição_2 Condição_3 Condição_4...	<i>True ou False</i>	Artifício que executa o disposto na Figura 3.12

Atraso_Créd_506	kWh/mês	Atraso de 30 dias aplicado apenas ao primeiro ano do Cascateamento
-----------------	---------	--

A Figura 3.24 apresenta a DEF que realiza o cálculo para os consumidores do Grupo B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico.

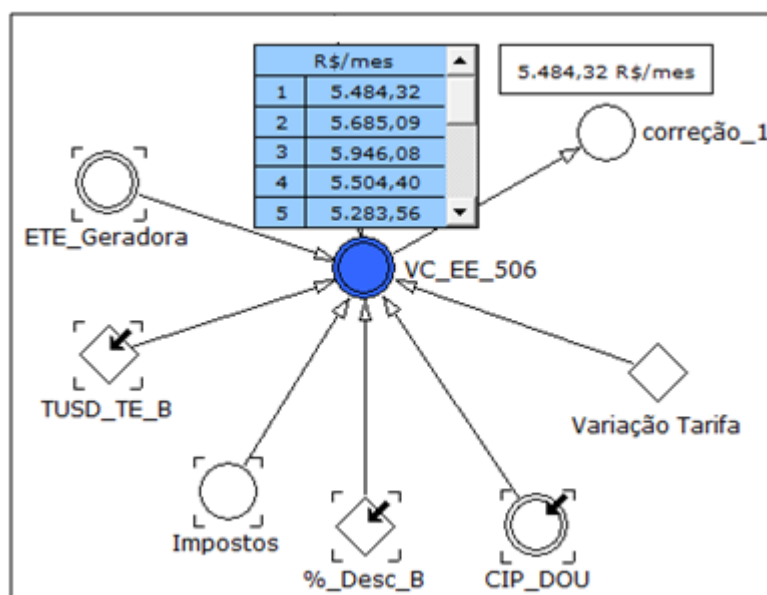


Figura 3.24: Diagrama de estoque e fluxo que realiza o cálculo para os consumidores do Grupo B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico

Tabela 3.7: Variáveis do DEF que realiza o cálculo para os consumidores do Grupo B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico

Variável	Unidade	Descrição
ETE_Geradora	kWh/mês	Consumo em kWh/mês da ETE que mais consome EE
TUSD_TE_B	kWh/mês	TUSD+Tarifa de energia (classe "B")
Impostos	%	Soma do PIS+COFINS+ICMS
%_Desc_B	%	Porcentagem de desconto para os consumidores especiais do grupo "B"

CIP_DOU	'R\$'	Contribuição para o Custeio do Serviço de Iluminação Pública
Variação Tarifa	%	Variável que permite variar a tarifa de EE anualmente até o fim da simulação
VC_EE_506	'R\$'/mês	Valor da conta de EE de acordo com a equação (7)
correção_1	'R\$'/mês	Como o valor da conta de EE é calculado sob a forma de vetor, esta variável mostra o valor da conta de EE a cada <i>timestep</i> definido no software

A tarifa para os consumidores do Grupo A4/Serviço Público/Convencional/Trifásico deve ser binômia, ou seja, é obrigatória a contratação de potência e energia (demanda e consumo), porém como a demanda é uma contratação que não é abatida sob a forma de créditos, é utilizado no software somente a parcela de consumo, para tanto é utilizada a mesma expressão definida para o Grupo/ B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico, o que é alterado nesta fórmula é a tarifa de EE que possui um valor diferenciado e também a porcentagem de desconto para os consumidores do grupo A (ANEEL, 2013):

$$VCC = \left[\left(\frac{VTPA}{1 - (PIS + COFINS + ICMS)} \right) \times EE_{cons} \right] + CIP \quad (3.18)$$

Sendo que,

VCC: Valor a ser cobrado do consumidor (R\$);

VTPA: Valor da tarifa publicada pela Aneel (R\$/kWh);

PIS: Programa de Integração Social (%);

COFINS: Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (%);

ICMS: Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços (%);

EE_{cons}: Energia Elétrica Consumida na ETE (kWh);

CIP: Contribuição para o Custeio do Serviço de Iluminação Pública (R\$).

Vale ressaltar que o que é calculado como valor a ser cobrado do consumidor (VCC), na verdade é o valor de despesa que se tornou em receita.

A Figura 3.25 apresenta o DEF que realiza o cálculo para os consumidores do Grupo A4/Serviço Público/Convencional/Trifásico

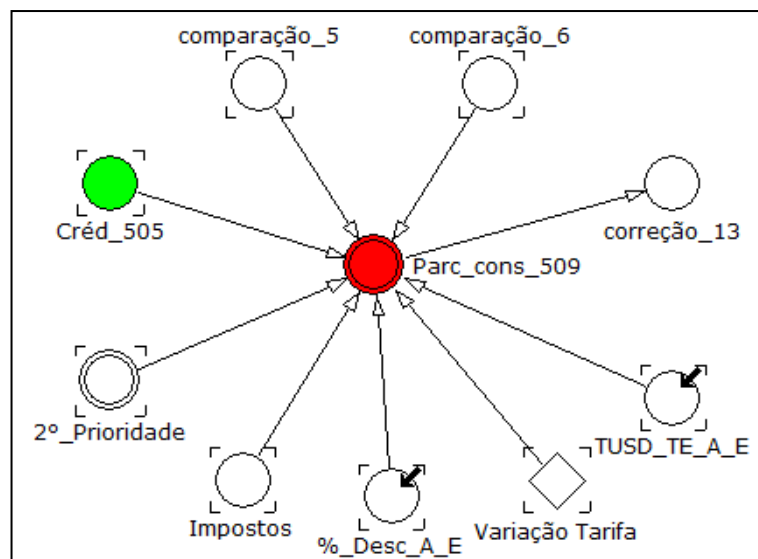


Figura 3.25: Diagrama de estoque e fluxo que realiza o cálculo para os consumidores do Grupo A4/Serviço Público/Convencional/Trifásico

Tabela 3.8: Variáveis do DEF que realiza o cálculo para os consumidores do Grupo A4/Serviço Público/Convencional/Trifásico

Variável	Unidade	Descrição
comparação_5 comparação_6	<i>True</i> ou <i>False</i>	Artifício que compara o disposto na Figura 3.12
Créd_505	<i>kWh/mês</i>	Créditos de uma determinada ETE
2º_Prioridade	<i>kWh/mês</i>	Consumo de uma determinada ETE
%_Desc_A_E	%	Porcentagem de desconto para os consumidores especiais do grupo “A”
TUSD_TE_A_E	'R\$'	TUSD+Tarifa de energia (classe "A")
Variação Tarifa	%	Variável que permite variar a tarifa de EE anualmente até o fim da simulação

Parc_cons_509	'R\$'/mês	Valor da conta de EE de acordo com a equação (8)
correção_13	'R\$'/mês	Como o valor da conta de EE é calculado sob a forma de vetor, esta variável mostra o valor da conta de EE a cada <i>timestep</i> definido no software

3.6.6 Módulo Econômico

A análise econômica deste trabalho está intimamente associada ao módulo normativo, pois através dele é que são calculadas as despesas que se tornam em receitas do empreendimento, portanto depois de uma análise minuciosa da disponibilidade de biogás, há um investimento inicial na tecnologia de geração, seja ela, Grupo Gerador ou Microturbina. Devem ser também contabilizadas as despesas com operação e manutenção da tecnologia escolhida para a geração de EE. A Figura 3.26 exemplifica este processo, pois no mês “0” há um investimento na tecnologia de conversão, após três meses haverá o *start-up* da tecnologia. Este período pode ser entendido como adequações ou adaptações para o correto funcionamento do equipamento ou até mesmo como um atraso para o início do projeto. A partir do terceiro mês a ETE já tem condições de gerar EE e de injetá-la na rede de distribuição, sendo assim, as receitas são resultantes da diferença entre o montante gerado de energia e o consumo de cada ETE.

Na análise econômica o foco principal é a avaliação do fluxo de caixa, uma vez que o empreendimento necessita de investimento inicial com a implantação de um sistema de geração de EE, além de gasto com operação e manutenção periódicas. Poderia ser incluída na simulação a receita com os créditos de carbono, porém o alto investimento para a implantação deste sistema inviabiliza o processo de retorno sobre o investimento, portanto, embora haja um módulo específico denominado “ambiental”, ele não será computado sob a forma de resultados na análise econômica.

A Figura 3.27 apresenta a DEF que realiza a análise econômica de todo o processo.

Despesa Evitada
=
Receita

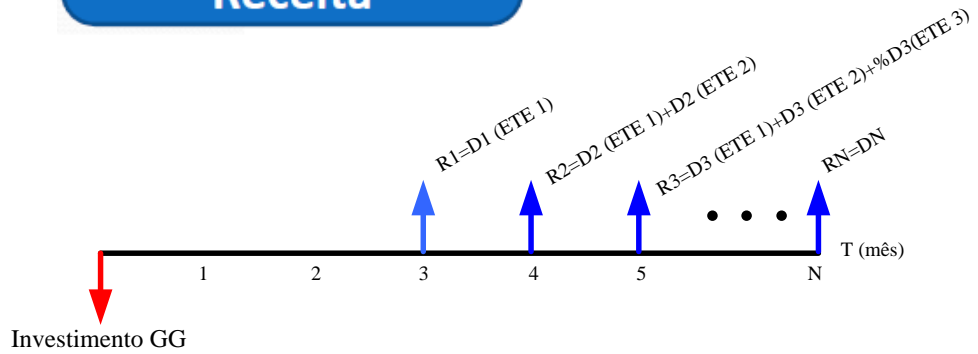


Figura 3.26: Fluxo de caixa típico para ETE's que geram EE, baseado na REN 482/12.
Fonte: PRÓPRIA.

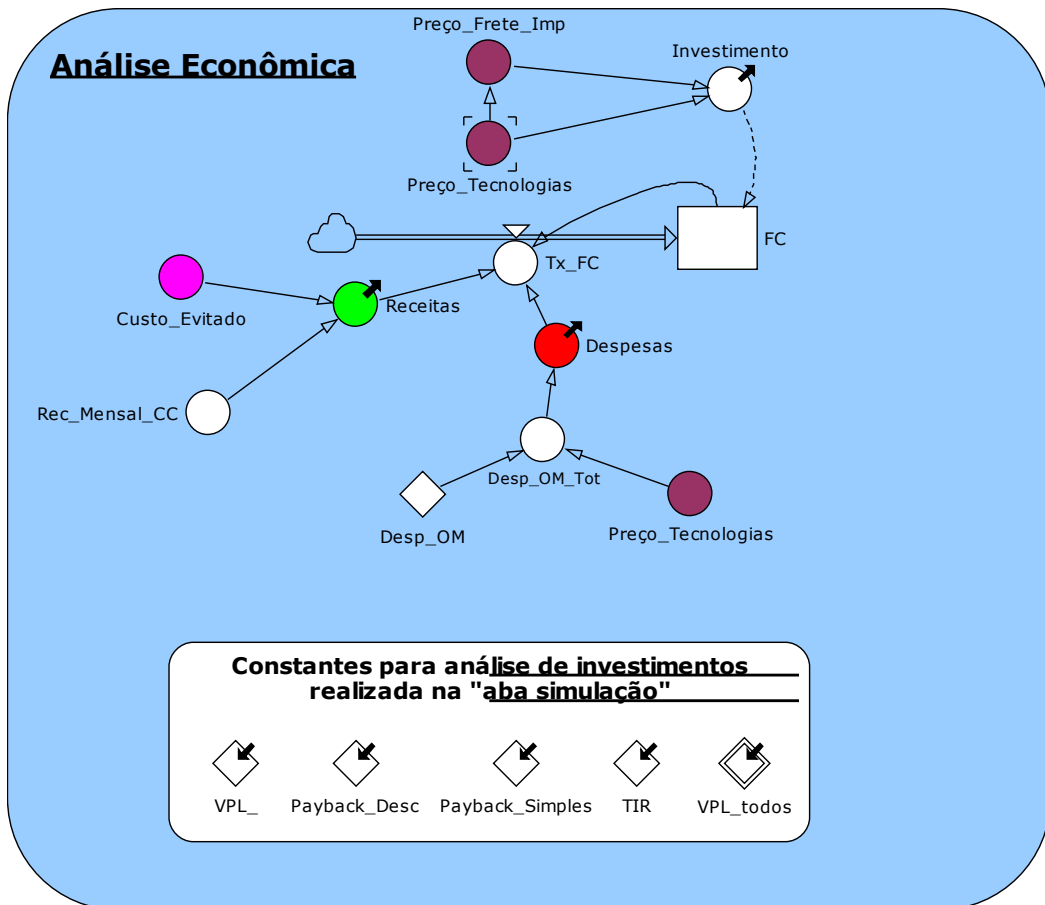


Figura 3.27: Modelagem do fluxo de caixa de uma ETE

Tabela 3.9: Variáveis do DEF do fluxo de caixa de uma ETE

Variável	Unidade	Descrição
Custo_Evitado	'R\$'/mês	Somatória de todas as despesas que se tornaram em receitas
Rec_Mensal_CC	'R\$'/mês	Receita mensal com a possível comercialização dos créditos de carbono
Receitas	'R\$'/mês	Somatório de todas as receitas do empreendimento
Desp_OM	%/mês	Parcela da despesa mensal com operação e manutenção da tecnologia de geração baseado no valor total do investimento
Preço_Tecnologias	'R\$'	Preço das tecnologias de conversão
Desp_OM_Tot	'R\$'/mês	Despesa total com operação e manutenção da tecnologia de conversão
Despesas	'R\$'/mês	Somatório de todas as despesas do empreendimento
Preço_Frete_Imp	'R\$'	Preço da unidade geradora + Frete + Impostos
Investimento	'R\$'	Investimento total da tecnologia de conversão
FC	'R\$'	Fluxo de caixa do empreendimento
Tx_FC	'R\$'/mês	Taxa do fluxo de caixa
VPL_ Payback_Desc Payback_Simples TIR VPL_todos	'R\$' Meses Meses '%' 'R\$'	Valor Presente Líquido, <i>Payback</i> Descontado, <i>Payback</i> Simples, Taxa Interna de Retorno. Todas essas variáveis são importadas do Excel

No processo de tomada de decisão, através do uso dos cenários associados à análise de sensibilidade, busca-se examinar o impacto que variações nos *input's*, como investimento na tecnologia de geração, análise DQO, vazão de entrada da ETE, PCI do biogás gerado, eficiência elétrica da tecnologia selecionada, receita com créditos de carbono, despesas operacionais do sistema, impostos como PIS, COFINS, ICMS e CIP podem ocasionar no valor presente líquido ou em qualquer outro elemento de decisão. A geração do Fluxo de Caixa a partir das entradas de receitas e despesas é a parte predominante e necessária para inferir se o projeto é capaz de remunerar adequadamente o capital investido. Neste módulo são apresentados quatro métodos de avaliação: o método do Valor Presente Líquido, o método da Taxa Interna de Retorno, o método do *Payback* Simples e o método do *Payback* Descontado.

Método do Valor Presente Líquido (VPL)

A medida do valor presente líquido é obtida pela diferença entre o valor presente dos benefícios líquidos de caixa, previstos para cada período do horizonte de duração do projeto, e o valor presente do investimento (desembolso de caixa). Formalmente, costuma-se adotar a seguinte expressão de cálculo do VPL (NETO, 2010):

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t} - \left[I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+K)^t} \right] \quad (3.19)$$

Onde,

FC_t : fluxo (benefício) de caixa de cada período;

K : taxa de desconto do projeto, representada pela rentabilidade mínima requerida;

I_0 : investimento processado no momento zero (inicial);

I_t : valor do investimento previsto em cada período subsequente.

De acordo com Neto (2010), os critérios de decisão para o VPL são:

- $VPL > \$ 0 \rightarrow$ Projeto cria valor econômico. Aumenta a riqueza dos acionistas.
- $VPL = \$ 0 \rightarrow$ Projeto não cria valor econômico. Remunera somente o custo de oportunidade. Não altera a riqueza dos acionistas.
- $VPL < \$ 0 \rightarrow$ Projeto destrói valor econômico. Reduz a riqueza dos acionistas.

Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

A taxa mínima de atratividade é utilizada como parâmetro de retorno exigido do investimento, sinalizando ao investidor optar ou não pelo mesmo. Sendo assim, a TMA deve ser no mínimo a taxa de juros equivalente à rentabilidade das aplicações correntes de menor risco do investimento.

Método da Taxa Interna de Retorno (TIR)

O método da taxa interna de retorno representa a taxa de desconto que iguala, em determinado momento (geralmente usa-se a data de início do investimento – momento zero), as entradas com as saídas previstas do caixa. Para avaliação de propostas de investimento, o cálculo da TIR requer, basicamente, o conhecimento dos montantes de dispêndio de capital e dos fluxos de caixa líquidos incrementais gerados pela decisão.

Pelo método da TIR, um projeto de investimento é recomendado se a taxa interna de retorno calculada for maior do que o retorno exigido (TMA). Nesse caso o projeto cria valor econômico. Caso o investimento apresente uma taxa de retorno menor que o retorno exigido, o projeto deve ser rejeitado (NETO, 2010).

A formulação da taxa interna de retorno pode ser representada, supondo-se a atualização de todos os movimentos de caixa para o momento zero, da seguinte forma (NETO, 2010):

$$I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{I_t}{(1+K)^t} = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+K)^t} \quad (3.20)$$

Onde,

I_0 : montante do investimento no momento zero (início do projeto);

I_t : montantes previstos de investimento em cada momento subsequente;

FC_t : fluxos previstos de entradas de caixa em cada período de vida do projeto (benefícios de caixa);

K : taxa de rentabilidade equivalente periódica (TIR);

Método de *Payback*

O *Payback* nada mais é do que o número de períodos necessários para que o fluxo de benefícios supere o capital investido.

O período de *Payback* de descontado traz todos os fluxos de caixa ao mesmo momento de tempo (a valor presente), incorporando o conceito do valor do dinheiro no tempo. Para seu cálculo, deve-se primeiro trazer cada uma das entradas de caixa a valor presente, descontando esses fluxos a uma taxa de juros que represente a rentabilidade mínima (custo de oportunidade) exigida pela empresa na aceitação do projeto.

Para aplicar o método PBD (*Payback* Descontado), é necessário definir o tempo máximo (TM), no caso do modelo proposto adotou-se um horizonte de 10 anos, para recuperar o capital investido e remunerado e também que haja apenas uma mudança no sinal dos fluxos de caixa. Se forem aplicados os procedimentos de cálculo do PBD com taxa requerida igual a zero, têm-se tempo necessário para recuperar apenas o capital investido, ou seja, o *Payback* Simples.

Para decidir se o investimento deve ser aceito o PBD calculado com a taxa requerida “*i*” deve ser comparado com o TM, valor de referência, de forma que (NETO, 2010):

- Se $PBD < TM \rightarrow$ o projeto deve ser aceito.
- Se $PBD > TM \rightarrow$ o projeto não deve ser aceito.

3.7 Considerações Finais

Neste capítulo foram apresentados os diagramas de laço causal e os diagramas de estoque e fluxo, que permite a estruturação da modelagem do problema de decisão proposta via Técnica de Dinâmica de Sistemas.

O modelo proposto foi estruturado em cinco módulos principais: Módulo técnico, Módulo ambiental, Módulo normativo, Módulo econômico e Módulo de controle/interface gráfica, dando origem a uma ferramenta de apoio aos gestores das empresas de saneamento que desejam implementar a geração de energia elétrica a partir do biogás gerado nas Estações de Tratamento de Esgotos.

CAPÍTULO 4 – AVALIAÇÃO ECONÔMICA

4.1 Introdução

Neste capítulo é feita a caracterização das ETE's de Dourados - MS e são apresentados os resultados de avaliação econômica, tomando por base a metodologia de modelagem proposta no capítulo anterior. A análise dos indicadores financeiros permitem avaliar a robustez das estratégias adotadas para a tomada de decisão na geração de energia elétrica a partir do biogás.

4.2 Caracterização das ETE's de Dourados – MS

Para avaliar o desempenho do modelo desenvolvido neste trabalho, adotou-se como estudo de caso as Estações de Tratamento de Esgotos localizadas no município de Dourados, MS. O estudo visa demonstrar que, dependendo do tamanho das ETE's, há potencialidades para a geração de energia elétrica, ainda mais sob a legislação vigente, a REN 482/12, que dá a possibilidade de se realizar a compensação de EE.

De acordo com a Sanesul (SANESUL, 2013) a cidade de Dourados possui hoje nove Estações de Tratamento de Esgotos, sendo que as três principais são: a ETE Guaxinin, a ETE Água Boa e a ETE Laranja Doce. A estação denominada Guaxinin é dotada de três reatores UASB, e tanto a estação Água Boa quanto a estação Laranja Doce, são dotadas de dois reatores UASB.

Atualmente a estação Guaxinin é a maior ETE no município de Dourados, sendo responsável por cerca de 45% de toda a coleta de esgoto da cidade. O interesse neste trabalho é avaliar a implantação de um Grupo Gerador ou de uma Microturbina na estação que mais consome EE. Já que o SGEETE, (Simulador de Geração de EE em ETE Urbanas) desenvolvido neste trabalho, assume que a estação que mais consome EE é a ETE que deve receber o sistema de geração de EE. A Tabela 4.1 mostra a média de consumo em kWh/mês de todas as estações relativas ao município de Dourados, elencadas com o código técnico adotado pela Sanesul. Baseado nesta tabela, a ETE que deve receber o sistema de geração de EE é a ETE denominada de “DOU RALF ETE 506”, representando a estação Guaxinin, mas que será tratada como linguagem técnica.

A vazão de entrada de esgoto da ETE 506, ou seja, a ETE que mais consome EE é de 5.951,23 m³/dia. O DQO do afluente é igual a 421,14 mg/l e o DQO do efluente é igual a 80,25 mg/l. O suficiente para se gerar cerca de 14.853,53 m³/mês de biogás. Através deste volume de biogás tem-se um potencial de geração de EE de cerca de 36 kW. Para a análise deste trabalho será adotado uma geração padrão de 32 kW para o Grupo Gerador e 30 kW para a Microturbina.

Tabela 4.1: Média de consumo das ETE's de Dourados - MS.

Local	Média de Consumo (kWh/mês)	Classificação da ETE
DOU RALF ETE 506	11307	B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico
DOU RALF ETE 505	7152	B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico
DOU EEECH 509	4243	B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico
DOU EEE OLINDA 2308	2854	A4/Serviço Público/Convencional/Trifásico
DOU ETE EE 513	1927	B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico
DOU EEECD 508	1766	B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico
DOU ETE 512	1564	B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico
DOU EEE 011 2283	996	A4/Serviço Público/Convencional/Trifásico
DOU EEE 010 2251	136	B3/Serviço Público/Convencional/Trifásico

Fonte: SANESUL, 2013.

4.3 Construção dos Cenários

Frente a um processo de tomada de decisão por parte dos investidores em saneamento básico, torna-se necessário a elaboração de cenários representativos de diferentes estratégias, tais como: dado um volume de biogás produzido na estação geradora, decidir por escolher qual tecnologia de geração adotar, isso depende também do que a empresa está disposta a esperar pelo retorno do investimento. Comercializar ou não os créditos de carbono dado a um investimento no Grupo Gerador e no projeto de legalização para a comercialização dos créditos de carbono. Também será realizada uma análise de sensibilidade variando-se os impostos vigentes em Mato Grosso do Sul, como PIS, COFINS, ICMS e CIP.

4.3.1 Geração de 30 kW com um Grupo Gerador e Microturbina

No estudo realizado nas ETE's em Dourados – MS verificou-se que a geração de 30 kW na ETE 506 gera créditos o suficiente para abater o consumo da ETE 505, além de reduzir em aproximadamente 73% o consumo em kWh/mês da ETE 509, a partir desta ETE não há mais reduções nos consumos, ou seja, nada muda na ETE Olinda 2308 (Figura 4.1). Para um maior entendimento do real valor que é economizado por deixar de gastar EE nas ETE's, a Figura 4.1 é refeita com os valores em reais anuais (Figura 4.2). Portanto o que se deixou de gastar em R\$ na ETE 506, 505 e parte da 509 se torna em receita, ou seja, a despesa evitada é igual a receita, conforme explicado na Figura 3.15 (já vista).

Assumindo um investimento inicial de R\$ 118.000,00 no Grupo Gerador modelo SG40B da Fockink de 32 kW (FOCKINK, 2012), e já considerando o custo com operação e manutenção do equipamento em 0,33%/mês (sugerido por SOUZA, 2010), a tarifa de EE inicial de 435,98 R\$/MWh com um incremento de 5% ano a ano em um horizonte de 10 anos, valores dos impostos praticados no estado de Mato Grosso do Sul (ICMS=17%; PIS=0,974%; COFINS=4,5% e CIP fixa no valor de 43,6 R\$/mês) e um custo capital anual de 20%/ano, foi obtido no Painel 2 do SGEETE o comportamento do VPL em função da Taxa de Descapitalização (TMA, Taxa Mínima de Atratividade), conforme observado na Figura 4.3. Já a Figura 4.4 mostra o resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.3.

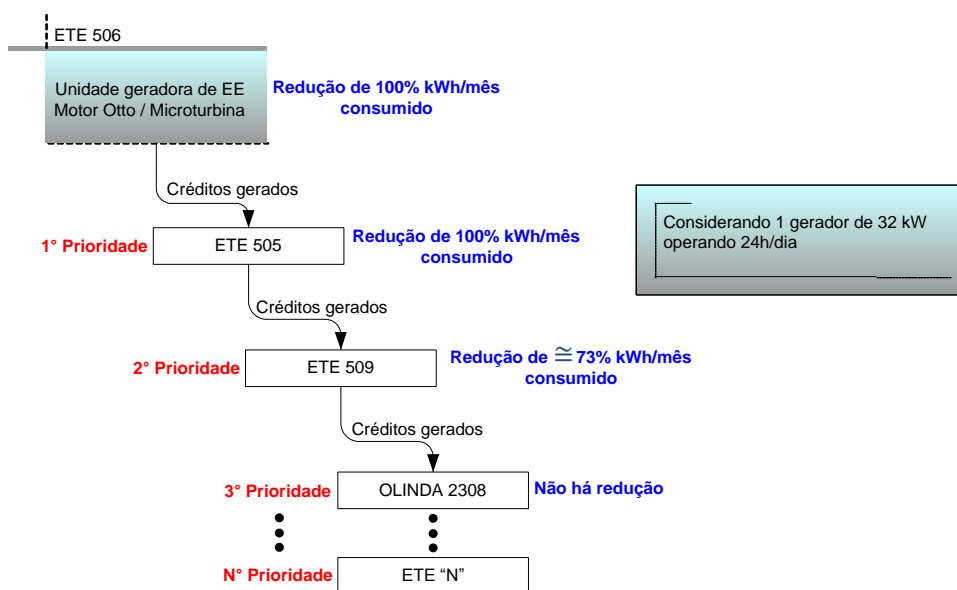


Figura 4.1: Cascateamento de créditos nas ETE's de Dourados – MS utilizando um Grupo Gerador de 32 kW.

Fonte: PRÓPRIA.

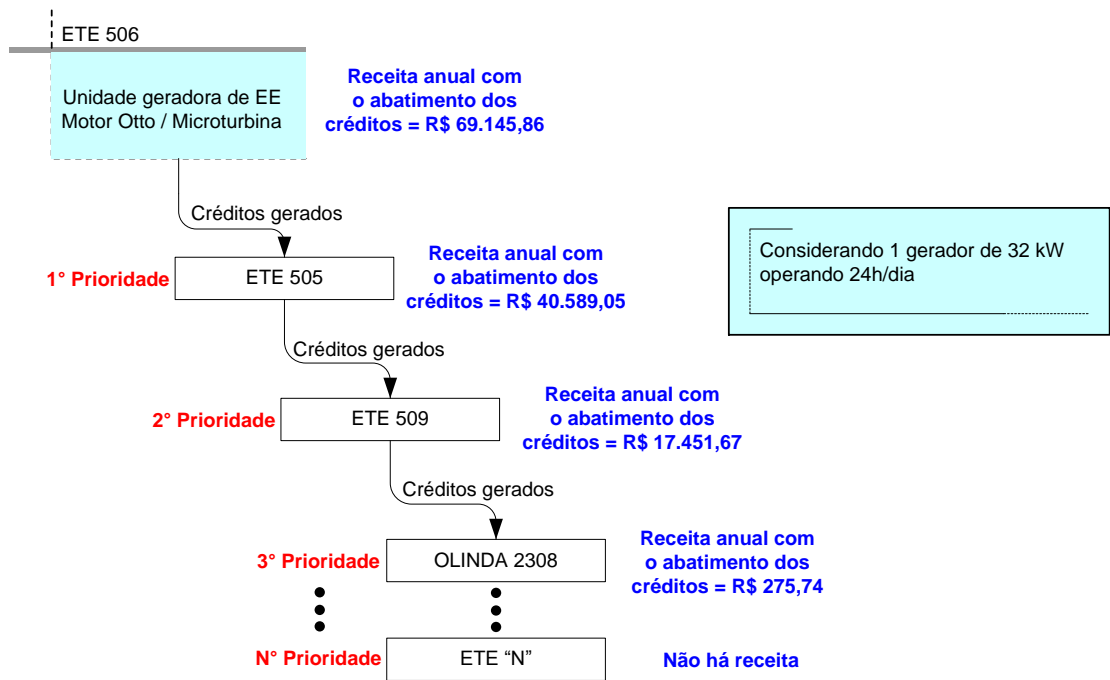


Figura 4.2: Cascateamento de créditos nas ETE's de Dourados – MS utilizando um Grupo Gerador de 32 kW com as receitas anuais de cada estação.
Fonte: PRÓPRIA.

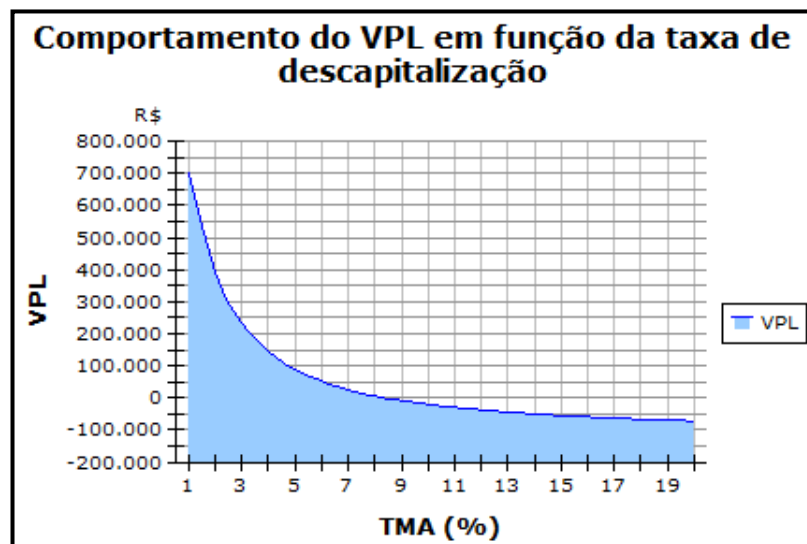


Figura 4.3: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização utilizando um Grupo Gerador de 32 kW.

Método Taxa Interna de Retorno (TIR)	8,47 %
Método Valor Presente Líquido (VPL)	7.450,83 R\$
Método Payback Simples(PBS)	14,00 meses
Método Payback Descontado (PBD)	15,00 meses

Figura 4.4: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.3.

Por definição a Taxa Interna de Retorno (TIR) é a taxa que torna o Valor Presente Líquido (VPL) de um fluxo de caixa igual a zero, portanto a TIR para este projeto, conforme as Figuras 4.3 e 4.4 é de 8,47% e o VPL é de R\$ 7.450,83. O VPL encontrado significa que o projeto consegue recuperar o investimento inicial (Grupo Gerador no valor de R\$ 118.000,00) e ainda sobram, em valores monetários de hoje R\$ 7.450,83. Em princípio, um VPL maior do que zero indica que o projeto merece continuar sendo analisado.

O *Payback* nada mais é do que o número de períodos necessários para que o fluxo de benefícios supere o capital investido (SOUZA, 2008). Portanto para este caso analisado verificou-se que o investimento inicial seria recuperado em 14 meses. Já para o *Payback* descontado que traz todos os fluxos de caixa ao mesmo momento de tempo (a valor presente) e considerando um custo capital de 20%/ano temos o investimento inicial recuperado em 15 meses. Nota-se que o *Payback* é atrativo para ambos os casos, ainda mais considerando que a Sanesul pondera que um retorno em qualquer projeto dentro de 24 meses é extremamente viável e o projeto se torna então aprovado, já que a empresa está habituada a trabalhar com um retorno de investimento em torno de 5 a 6 anos (SANESUL, 2013).

Substituindo a tecnologia de geração para uma Microturbina de 30 kW modelo C30 HP da Capstone (CAPSTONE, 2012), com um novo investimento inicial de R\$ 200.000,00 e com os mesmos valores de impostos, tarifa de EE, custos com O&M, e o mesmo custo capital anual realizados na simulação do Grupo Gerador Fockink de 32 kW, além de um reajuste anual na tarifa de energia de 5% ao ano em um horizonte de dez anos, obtém-se na Figura 4.5 o comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização e

na Figura 4.6 o resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.5. Nesta segunda simulação, o impacto na redução dos kWh/mês consumidos pelas estações continua sendo o observado nas Figura 4.1 e 4.2, pois a capacidade de geração é para uma mesma faixa de geração (30-32 kW).

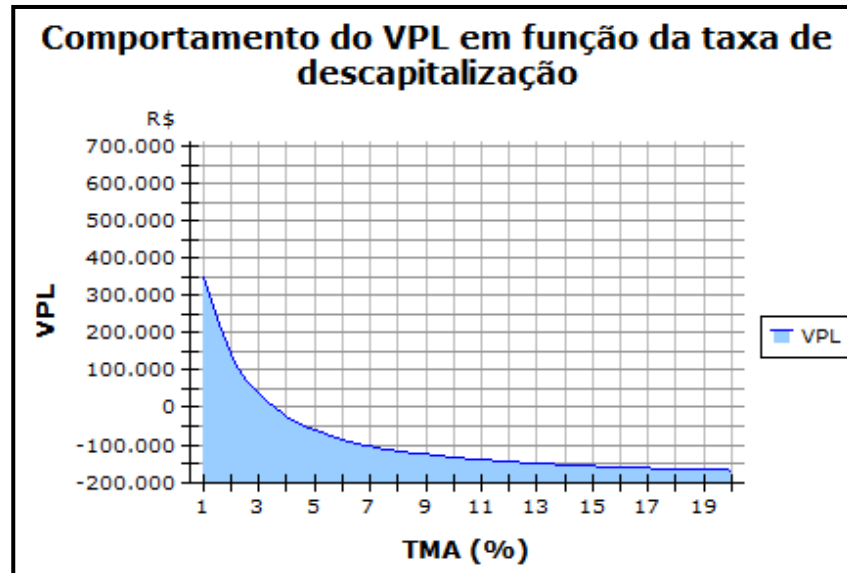


Figura 4.5: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização utilizando uma Microturbina de 30 kW.

Método Taxa Interna de Retorno (TIR)	3,55 %
Método Valor Presente Líquido (VPL)	37.147,41 R\$
Método Payback Simples(PBS)	31,00 meses
Método Payback Descontado (PBD)	41,00 meses

Figura 4.6: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.4.

Para o caso da Microturbina, a TIR, conforme as Figuras 4.5 e 4.6, é de 3,55% e o VPL é de R\$ 37.147,41. Neste caso analisado verificou-se que o investimento inicial seria recuperado em 31 meses para o *Payback* Simples. Já para o *Payback* descontado que traz todos os fluxos de caixa ao mesmo momento de tempo (a valor presente), o investimento inicial seria recuperado em 41 meses. Nota-se que o *Payback* continua sendo atrativo, pois o maior *Payback* provê um retorno sobre o investimento em torno de 3,5 anos.

4.3.2 Geração de 30 kW com um Grupo Gerador e Microturbina variando-se os impostos praticados em MS

Assumindo agora um investimento inicial de R\$ 118.000,00 no Grupo Gerador modelo SG40B da Fockink de 32 kW, a tarifa de EE inicial de 435,98 R\$/MWh com um incremento de 5% ano a ano em um horizonte de 10 anos, e reajustes de 10% nos impostos praticados em MS (ICMS=18,70%; PIS=1,07%; COFINS=4,95% e CIP fixa no valor de 43,6 R\$/mês) e um custo capital anual de 20%/ano, foi obtido no Pannel 2 do SGEETE o comportamento do VPL em função da Taxa de Descapitalização (TMA, Taxa Mínima de Atratividade), conforme observado na Figura 4.7. Já a Figura 4.8 mostra o resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.7.

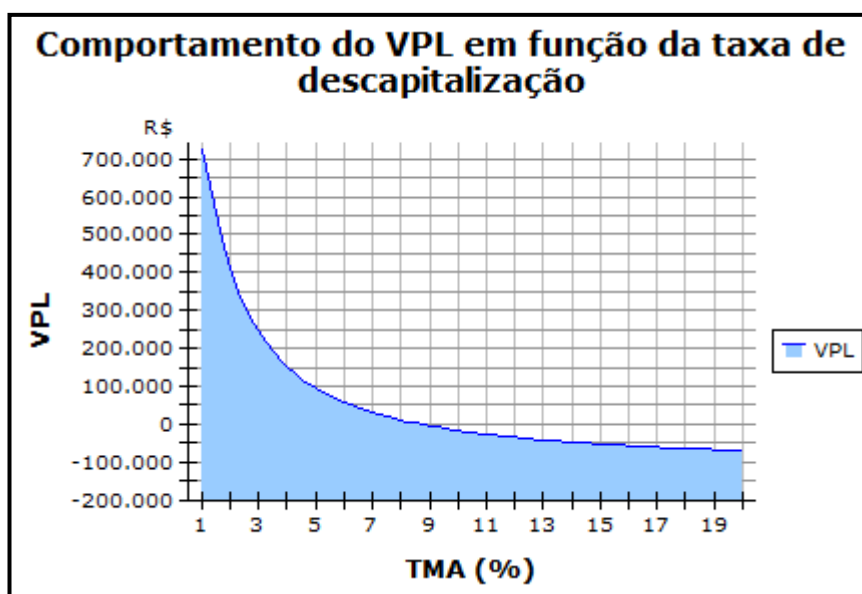


Figura 4.7: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização utilizando um Grupo Gerador de 32 kW, assumindo um reajuste de 10% nos impostos praticados em MS.

Se compararmos os resultados obtidos pelos indicadores financeiros na Figura 4.8 com os obtidos na Figura 4.4, é possível notar que a TIR aumentou de 8,47% para 8,71%, da mesma forma o VPL aumentou de R\$ 7.450,83 para R\$ 11.274,48. De acordo com as fórmulas 3.17 e 3.18 do capítulo 3, quanto maior forem os reajustes nos impostos praticados em MS, maior será também será a conta de energia a ser paga pela empresa de saneamento. Pode-se afirmar então que, quanto maior for a conta de EE a ser paga, maior será o retorno sobre o investimento, pois na condição analisada neste trabalho, gera-se energia, portanto,

se esta passar a valer mais, mais vantagem se tem em compensar energia, prova-se com isso a imensa vantagem que se tem em gerar EE de acordo com a REN 482/12.

Método Taxa Interna de Retorno (TIR)	8,71 %
Método Valor Presente Líquido (VPL)	11.274,48 R\$
Método Payback Simples(PBS)	13,00 meses
Método Payback Descontado (PBD)	15,00 meses

Figura 4.8: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.7.

Substituindo a tecnologia de geração para uma Microturbina de 30 kW modelo C30 HP da Capstone, com um investimento inicial de R\$ 200.000,00 e com os mesmos valores de impostos, tarifa de EE e de custo capital anual realizados na simulação do Grupo Gerador Fockink de 32 kW, além de um reajuste anual de 5% ao ano em um horizonte de dez anos, obtém-se na Figura 4.9 o comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização e na Figura 4.10 o resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.9.

Novamente, se compararmos os resultados obtidos pelos indicadores financeiros na Figura 4.10 com os obtidos na Figura 4.6, é possível notar que a TIR aumentou de 3,55% para 3,67%. Semelhantemente, o VPL aumentou de R\$ 37.147,41 para R\$ 44.742,58. Além de reduzir o *Payback* simples e descontado, de 31 e 41 para 30 e 39, respectivamente.

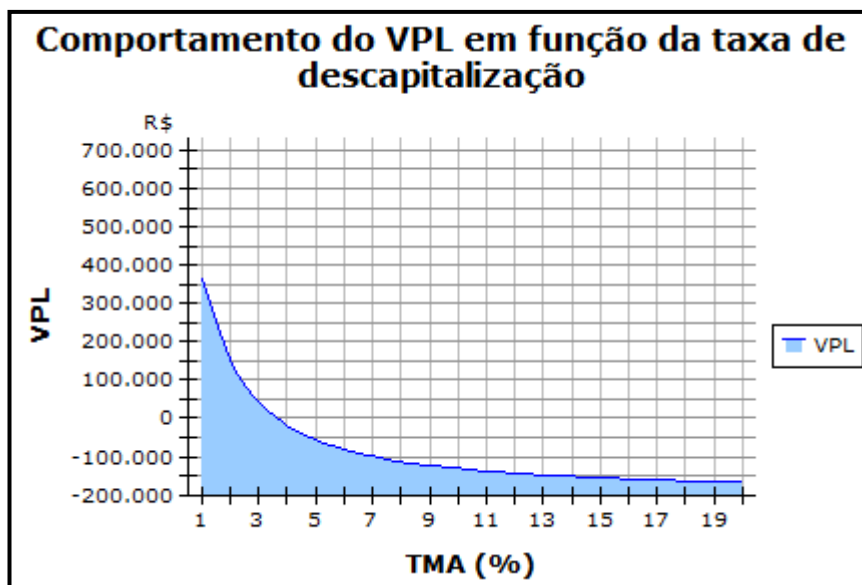


Figura 4.9: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização utilizando uma Microturbina de 30 kW, assumindo um reajuste de 10% nos impostos praticados em MS.

Método Taxa Interna de Retorno (TIR)	3,67 %
Método Valor Presente Líquido (VPL)	44.742,58 R\$
Método Payback Simples(PBS)	30,00 meses
Método Payback Descontado (PBD)	39,00 meses

Figura 4.10: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.9.

4.3.3 Geração de 30 kW com um Grupo Gerador e Microturbina considerando o registro do projeto para créditos de carbono

De acordo com Macedo (2010), o custo para o registro do projeto para a possível comercialização dos créditos de carbono fica em torno de R\$ 200.000,00. Para este cenário, foi adicionado este valor ao investimento inicial do sistema de geração de EE. Assumindo um investimento inicial total de R\$ 318.000,00 (custo do Grupo Gerador mais o registro do projeto), a tarifa de EE inicial de 435,98 R\$/MWh com um incremento de 5% ano a ano em um horizonte de 10 anos, valores dos impostos praticados no estado de Mato Grosso do Sul (ICMS=17%; PIS=0,974%; COFINS=4,5% e CIP fixa no valor de 43,6 R\$/mês) e um custo

capital anual de 20%/ano, temos como seguinte resultado as Figuras 4.11 e 4.12 respectivamente.

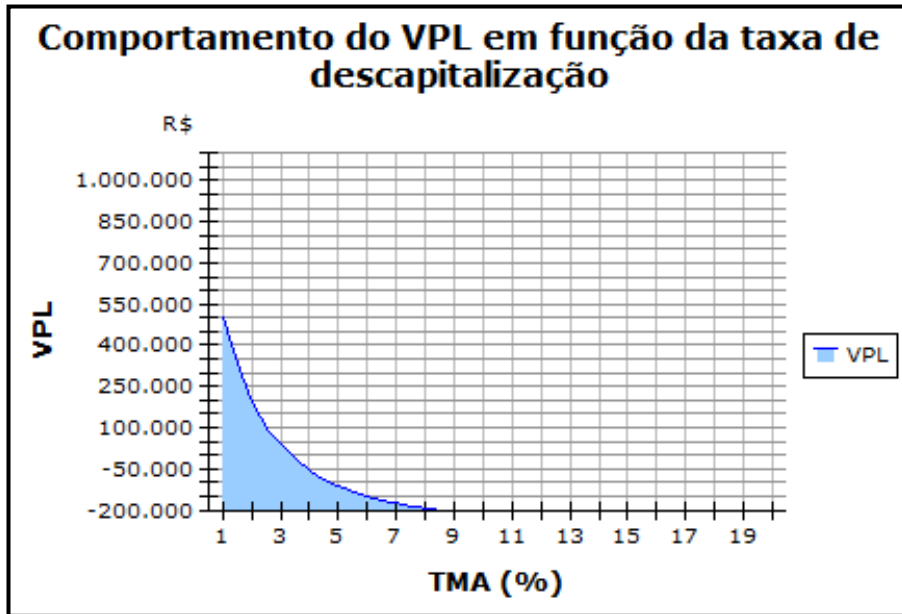


Figura 4.11: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização considerando o registro do projeto para créditos de carbono

Método Taxa Interna de Retorno (TIR)	3,34 %
Método Valor Presente Líquido (VPL)	36.174,97 R\$
Método Payback Simples(PBS)	32,00 meses
Método Payback Descontado (PBD)	44,00 meses

Figura 4.12: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.11.

Assumindo agora um investimento inicial total de R\$ 400.000,00 (custo da Microturbina mais o registro do projeto), a tarifa de EE inicial de 435,98 R\$/MWh com um incremento de 5% ano a ano em um horizonte de 10 anos, valores dos impostos praticados no estado de Mato Grosso do Sul (ICMS=17%; PIS=0,974%; COFINS=4,5% e CIP fixa no valor de 43,6 R\$/mês) e um custo capital anual de 20%/ano, temos como seguinte resultado as Figuras 4.13 e 4.14 respectivamente.

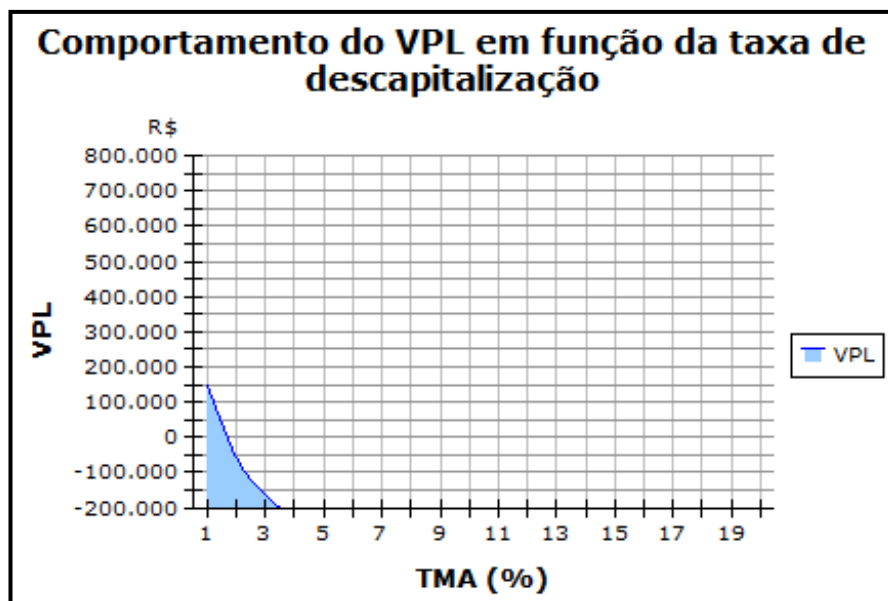


Figura 4.13: Comportamento do VPL em função da taxa de descapitalização considerando o registro do projeto para créditos de carbono

Método Taxa Interna de Retorno (TIR)	1,65 %
Método Valor Presente Líquido (VPL)	148.148,69 R\$
Método Payback Simples(PBS)	57,00 meses
Método Payback Descontado (PBD)	122,00 meses

Figura 4.14: Resultado dos indicadores financeiros obtidos na Figura 4.12.

É possível perceber que, de acordo com os resultados obtidos nas Figuras 4.11 a 4.14, o método do PBD aponta para um longo período de retorno do investimento. Na Figura 4.11 e 4.12 temos um retorno para um PBD em torno de 44 meses, ou seja, quase quatro anos, isso se o investimento inicial for o de um Grupo Gerador somado ao custo para o registro de projeto para os créditos de carbono. Analisando as Figuras 4.13 e 4.14, o caso do preço de uma Microturbina somado ao custo para o registro do projeto para os créditos de carbono, temos um PBD em torno de 122 meses, ou seja, mais de dez anos para se ter o retorno do investimento. Sob o ponto de vista econômico não compensa investir em projeto de crédito de carbono, embora os ganhos ambientais com tal implantação sejam imensuráveis. Fato é que a nova legislação elaborada pela Aneel tornou o negócio viável

sob o ponto de vista econômico para os pequenos produtores de EE, e conforme Figura 1.4, já vista, os benefícios que a geração de EE em ETE urbanas traz, são grandes e podem ser distribuídos em pelo menos quatro blocos centrais: benefícios ambientais, sociais, econômicos e outros benefícios. Ou seja, gerar energia, ainda que seja para garantir maior lucro para a empresa, garante uma série de benefícios a todos. Um exemplo disso, por exemplo, seria que, quanto maior lucro a empresa obter, mais investimento em saneamento básico ela buscará, isso afeta o modo de como a empresa investirá em bem estar para população, como a inserção de novos biodigestores, isso implica em uma melhora de qualidade de vida como um todo, pois é como se fosse uma cadeia. Esse encadeamento empírico foi explicado no DLC apresentado no capítulo 3 (Figura 3.2).

Note que o ganho que se tem com a implantação de um projeto para os créditos de carbono, se analisarmos somente o *Payback* descontado e se apenas avaliarmos o custo de um Grupo Gerador ao invés da microturbina somado ao custo para o registro do projeto visando a comercialização dos créditos de carbono por meio das figuras 4.11 e 4.12 é até atrativo, pois demonstra um retorno financeiro em aproximadamente 44 meses, mas o que é importante enfatizar aqui é que o lucro que se obtém mensalmente com a comercialização dos créditos de carbono, baseados nas equações 3.13 e 3.14 é praticamente zero, o retorno efetivo que se tem é com a compensação dos créditos e não com a comercialização dos créditos de carbono. O SGEETE mostra como resultado, se toda a energia produzida fosse utilizada para a comercialização dos créditos de carbono, daria uma renda mensal de R\$ 50,89, ou seja, esta renda mensal para um investimento de R\$ 118.000,00 em um Grupo Gerador.

CAPÍTULO 5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a realização deste trabalho, além de sugerir algumas recomendações para os trabalhos futuros.

5.2 Conclusões

A criação da Resolução Normativa 482/12 por parte da Aneel alterou de forma significativa o ambiente de geração de EE para os pequenos produtores de energia, e um importante local a ser beneficiado com esta resolução, para a geração de biogás, é em Estações de Tratamento de Esgotos (ETE's), pois dependendo da vazão de esgoto de entrada da ETE e da análise DQO (Demanda Química de Oxigênio), é possível verificar que a ETE possui um considerável potencial de geração de biogás e conseqüentemente de EE, não tanto quanto a geração estimada de biogás em Aterros Sanitários (AS's), mas o suficiente para gerar créditos que podem ser compensados. E o melhor, a conexão com a rede de distribuição se dá em baixa tensão, ou seja, os custos envolvidos para a injeção de EE caem consideravelmente.

O Estado de Mato Grosso do Sul tem se desenvolvido bastante na questão do aumento da rede coletora de esgoto. Investir em geração de energia elétrica em ETE's trará inúmeros benefícios a todos, e poderá, com a redução de custos em EE nas estações haver um novo investimento em tratamento de esgotos com a compra de novos biodigestores, melhorando assim a qualidade de vida da população.

No estudo realizado nas ETE's em Dourados – MS verificou-se que a geração de 32 kW na ETE 506 gera créditos o suficiente para abater o consumo da ETE 505, além de reduzir em aproximadamente 73% o consumo em kWh/mês da ETE 509, a partir desta ETE não há mais reduções nos consumos, ou seja, nada muda na ETE Olinda 2308 (Figura 4.1). No trabalho realizado, verificou-se que, sob a ótica da REN 482/12, o que se deixou de gastar em R\$ em uma determinada ETE se torna em receita, ou seja, a despesa evitada é igual a receita, conforme explicado na Figura 3.15 (já vista). Há de se frisar que quanto

mais geração de EE puder ser realizada em um determinado local, mais créditos poderão ser compensados em outras unidades previamente cadastradas.

Para o cenário de geração de 32 kW com Grupo Gerador a TIR encontrada foi de 8,47% e o VPL de R\$ 7.450,83. O VPL encontrado significa que o projeto consegue recuperar o investimento inicial (Grupo Gerador no valor de R\$ 118.000,00) e ainda sobram, em valores monetários de hoje R\$ 7.450,83. O *Payback* descontado para este caso foi de apenas 15 meses, extremamente atrativo, ainda mais considerando que a Sanesul pondera que um retorno em qualquer projeto dentro de 24 meses é extremamente viável e o projeto se torna então aprovado, já que a empresa está habituada a trabalhar com um retorno de investimento em torno de 5 a 6 anos. Para o caso da Microturbina, devido ao seu alto investimento na fase inicial com a compra desta tecnologia, a TIR encontrada foi de 3,55% e o VPL de R\$ 37.147,41. O *Payback* descontado para este caso foi de 41 meses, ainda dentro dos parâmetros de investimentos estabelecidos pela Sanesul.

Se compararmos o caso anterior de geração de 32 kW de um Grupo Gerador sem variação de impostos com o cenário de geração de 30 kW com um Grupo Gerador variando-se os impostos praticados em MS (em 10%), é possível notar que a TIR aumenta de 8,47% para 8,71%, da mesma forma o VPL aumenta de R\$ 7.450,83 para R\$ 11.274,48. De acordo com as fórmulas 3.17 e 3.18 do capítulo 3, quanto maior forem os reajustes nos impostos praticados em MS, maior será também será a conta de energia a ser paga pela empresa de saneamento. Pode-se afirmar então que, quanto maior for a conta de EE a ser paga, maior será o retorno sobre o investimento, pois na condição analisada neste trabalho, gera-se energia, portanto, se esta passar a valer mais, mais vantagem se tem em compensar energia, prova-se com isso a imensa vantagem que se tem em gerar EE de acordo com a REN 482/12.

Já para o cenário de geração de 30 kW com uma Microturbina, variando-se os impostos praticados em MS (em 10%), e se compararmos esses resultados com os resultados obtidos do cenário de geração de 30 kW com Microturbina, é possível notar que a TIR aumentou de 3,55% para 3,67%. Semelhantemente, o VPL aumentou de R\$ 37.147,41 para R\$ 44.742,58. Além de reduzir o *Payback* simples e descontado, de 31 e 41 para 30 e 39, respectivamente.

Para o caso de geração de 30 kW com um Grupo Gerador e Microturbina, considerando o registro do projeto para créditos de carbono, é possível perceber que, de

acordo com os resultados obtidos nas Figuras 4.11 a 4.14, o método do PBD aponta para um longo período de retorno do investimento. Na Figura 4.11 e 4.12 temos um retorno para um PBD em torno de 44 meses, ou seja, quase quatro anos, isso se o investimento inicial for o de um Grupo Gerador somado ao custo para o registro de projeto para os créditos de carbono. Analisando as Figuras 4.13 e 4.14, o caso do preço de uma Microturbina somado ao custo para o registro do projeto para os créditos de carbono, temos um PBD em torno de 122 meses, ou seja, mais de dez anos para se ter o retorno do investimento.

O interessante é que a modelagem de todo o sistema mostrou que o ganho que se tem com a implantação de um projeto para os créditos de carbono, se analisarmos somente o *Payback* descontado e se apenas avaliarmos o custo de um Grupo Gerador ao invés da Microturbina somado ao custo para o registro do projeto visando a comercialização dos créditos de carbono por meio das figuras 4.11 e 4.12 é até atrativo, pois demonstra um retorno financeiro em aproximadamente 44 meses, mas o que é importante enfatizar aqui é que o lucro que se obtém mensalmente com a comercialização dos créditos de carbono, baseados nas equações 3.13 e 3.14 é praticamente zero, o retorno efetivo que se tem é com a compensação dos créditos e não com a comercialização dos créditos de carbono. O SGEETE mostra como resultado, se toda a energia produzida fosse utilizada para a comercialização dos créditos de carbono, daria uma renda mensal de R\$ 50,89, ou seja, esta renda mensal para um investimento de R\$ 118.000,00 em um Grupo Gerador. Há necessidade de se rever os incentivos para a comercialização dos créditos de carbono, para que este empreendimento tão importante possa ser de fato viável.

Os benefícios da geração de EE em ETE urbanas podem ser distribuídos em pelo menos quatro blocos centrais: Benefícios ambientais, Benefícios sociais, Benefícios econômicos, e Outros benefícios. No bloco ambiental promove-se a utilização de fontes renováveis de energia, no bloco social, tratar o esgoto coletado melhora a saúde pública e qualidade de vida de todos, no bloco econômico temos um retorno financeiro atrativo para os investidores em saneamento, e no bloco benefícios tem-se um estímulo a um constante aprimoramento da REN 482/12, além de promover é claro a diversificação da matriz energética brasileira.

Neste contexto, ressalta-se que este trabalho avaliou a viabilidade econômica da inserção de uma microgeração em uma ETE conectada na BT do sistema de distribuição. Neste sentido, não foram considerados os resultados indiretos associados a *Crítérios*

Imponderáveis (fatores não conversíveis em R\$), os quais podem ter um peso primordial na tomada de decisão dos gestores.

5.3 Recomendações para trabalhos futuros

Este trabalho se propôs a criar um modelo de simulação para analisar a viabilidade econômica da geração de energia elétrica a partir do biogás gerado em ETE urbanas. Em complementação ao trabalho exposto, sugere-se aqui acrescentar a este modelo a simulação para os consumidores considerados horo-sazonais, pois para o ano de 2014 será adotado um novo modelo de tarifa, denominado de Tarifa Branca (para os consumidores de baixa tensão). Outra mudança válida, a partir do ano que vem, é a criação das Bandeiras Tarifárias Verde, Amarela e Vermelha, que funcionarão como um semáforo de trânsito e se refletirão em diferença de tarifa para o consumidor. Isso alterará consideravelmente os indicadores financeiros analisados neste trabalho.

Há também necessidade de rever o conceito de créditos de carbono sobre ótica da REN 482/12 e propor formas de se viabilizar a implantação desse sistema em ETE's, pois como citado neste trabalho, os altos custos para a implantação deste empreendimento inviabilizam o processo sob o ponto de vista de retorno sobre o investimento. Por fim, recomenda-se a implementação de aplicativos utilizando a técnica de dinâmica de sistemas, porém considerando a geração de biogás a partir de Aterros Sanitários.

REFERÊNCIAS

ALVES, J. W. S. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo. 142 p. São Paulo, 2000.

AMARAL, F. L. M. do. **Biodigestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos: um panorama tecnológico atual**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2004.

ANDRADE, A. L. **Pensamento Sistêmico: Um roteiro básico para perceber as estruturas da realidade organizacional**. PPGEP/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. READ - Revista Eletrônica de Administração. Edição 5, v.3, nº 1, Junho de 1997, ISSN1413-2311. Disponível em: <<http://read.adm.ufrgs.br/read05/artigo/andrade.htm>>. Acessado em: 21/06/2012.

ANDRADE, Aurélio L. **Pensamento sistêmico: um roteiro básico para perceber as estruturas da realidade organizacional**. PPGEP/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. READ – Revista Eletrônica de Administração. Edição 5, v.3, no 1, Junho de 1997.

ANEEL. **Por dentro da conta de luz: concessionária Enersul**. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Cartilha_tarifas_Enersul.pdf. Acesso em 09/08/2013.

ANEEL, **Resoluções Normativas**, referências disponíveis na internet, biblioteca virtual, item pesquisa resoluções normativas, <http://www.aneel.gov.br>, 2012.

BEN - Balanço Energético Nacional. 2012. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2012.aspx>. Acesso em 15/07/2013.

BENINCASA, M.; ORTOLANI, A.; LUCAS JR., J. **Biodigestores convencionais**. Faculdade de Ciências Agrárias e veterinárias – UNESP, Jaboticabal, 1990.

BRANCO, F. P. **Análise termoeconômica de uma usina termelétrica a gás natural operando em ciclo aberto e em ciclo combinado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005.

CAPSTONE. **Modelos, preços e características técnicas das Microturbinas**. 2012

CARDOZO, C. M. F. **Operação de sistemas hidroelétricos em ambiente competitivo: uma abordagem da gestão empresarial via simulação estocástica e dinâmica de sistemas**. (Tese de Doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

CASSINI, S. T. **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003.

CECCHINI, R.; PELOSI, G. **Alessandro Volta and his battery**. IEEE Antennas and Propagation Magazine, v. 34, n. 2, abr. 1992.

CENBIO: Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Biogás e o mercado de crédito de carbono**. Nota Técnica VIII. Fevereiro de 2008. Disponível em: http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/notatecnica_viii.pdf. Acesso em 1 de outubro de 2012.

CHERNICHARO, C. A. de L. **Reatores anaeróbios**. Belo Horizonte: UFMG, 1997.

CLASSEN, P. A. M.; LIER, J. B.; STAMRS, A. J. M. **Utilization of biomass for supply of energy carrier**. Applied Microbiology and Biotechnology, v. 52, p. 741-755, 1999.

COELHO, S. T. **Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando um Grupo Gerador de 18 kW**. Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Brasília, 31 de maio a 02 de junho de 2006. Disponível em: http://cenbio.iee.usp.br/download/projetos/10_purefa.pdf. Acesso em 1 de outubro de 2012.

COELHO, S.T. et all. **Biodigestor Modelo UASB**. V. Relatório de Acompanhamento. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. São Paulo, 2003.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. Dissertação de Mestrado. Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) da Universidade de São Paulo. 194 p. São Paulo, 2006.

CRAVEIRO, A. M. **Desempenho e estudos cinéticos de biodigestores híbridos com diferentes porcentagens de enchimento**. Tese (Doutorado em Engenharia). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

DANTE, G. **Introdução ao estudo dos motores alternativos**, 2003. Motores Endotérmicos. 3ª Edición. Barcelona. Hoepli - Ed. Científico Médica, 1982. Disponível em: <http://www.utad.pt/~fsantos/pub-pdf/motalt.pdf>. Acesso em: 08/10/2012.

DYKES, K. L. **Modeling Wind Energy Development in the Electricity Sector Using a System Dynamics Framework**. Modern Energy Review. 3 (1), 2011. <http://modernenergyreview.com>. Acessado em: 01/09/2012.

EC (The European Commission), 2007, Renewable Energy Road Map - **Renewable energies in the 21st century**: building a more sustainable future, COM (2006) 848.

FERNANDES, A da C. **Scorecard dinâmico** – em direção à integração da dinâmica de sistemas com o balanced scorecard. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, 2003.

FIGUEIREDO, N. J. V. de. **“Utilização do biogás de aterro sanitário para Geração de energia elétrica e iluminação a gás – Estudo de caso”**. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia, Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo, 2007.

FLOOD, R., & JACKSON, M. **Creative Problem Solving: Total Systems Intervention**. In: John Wiley & Sons. 1997.

FOCKINK. **Modelos, preços e características técnicas dos grupos geradores**. Rio Grande do Sul. Panambi, 2012.

FORRESTER, J. W. **Industrial Dynamics**. The MIT Press. Cambridge, Massachusetts, 1961.

HUMES, L. L. **Pensamento Sistêmico Aplicado a Sistemas de Informação** - Um Estudo de Caso. In: VII SemeAD - Seminários em Administração, 2004, São Paulo. Anais VII Semead, 2004. Disponível em: http://www.ead.fea.usp.br/semead/7semead/paginas/artigos%20recebidos/mqi/MQI12_-_Pensamento_Sistêmico_aplicados_Sist_In.PDF. Acessado em: 10/05/2012.

KUNZ, A., PERDOMO, C., & OLIVEIRA, P. **Biodigestores: Avanços e Retrocessos**. In: Suinocultura Industrial. pp. 14-16. Porto Feliz. 2004.

LOURENZANI, W.L.; SILVA, C. A. B. **Sustentabilidade de Empreendimentos Agroindustriais de Pequeno Porte: uma Aplicação de Sistemas Dinâmicos**. In: Congresso e Mostra de Agroinformática. P. 9.. 1999.

MACEDO, L. V. de (Coord.). **Manual para aproveitamento do biogás: volume dois, efluentes urbanos**. ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2010.

MONTEIRO, C. **Microturbinas, 2004**. Produção e Transporte de Energia II. LEEC – Faculdade de Engenharia da FEUP. Disponível em: http://paginas.fe.up.pt/~cdm/PTE2/PTE2_Microturbinas.pdf. Acesso em 08/10/2012. Acesso em: 09 de outubro de 2012.

NETO, A. A; LIMA, F. G. **Fundamentos de administração financeira**. São Paulo: Atlas, 2010.

NISHIMURA, R. **Análise De Balanço Energético De Sistema De Produção De Biogás Em Granja De Suínos: Implementação de Aplicativo Computacional**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2009.

NOGUEIRA, L. A. H. **Biodigestão, a alternativa energética**. São Paulo: Ed. Nobel, 1986.

ORTEGA, J. M. **Gestão de Centrais Termelétricas a GN em Ambiente Competitivo: Uma Abordagem via Dinâmica de Sistemas**. Universidade Federal de Santa Catarina de Santa Catarina. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Elétrica). Florianópolis, 2001.

ORTEGOSA, C. Z. **Metodologia para estudos da viabilidade econômico financeira**

no uso do gás natural em instalações prediais residenciais: uma abordagem via dinâmica de sistemas. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Elétrica. Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande - MS. 2006

OLIVEIRA, J. A. A de. **Sistemas de suporte à decisão em cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro de Mato Grosso do Sul.** Dissertação de mestrado. UFMS. Campo Grande - MS, 2011.

OLIVEIRA, P. A. V. *et al.* **Uso dos resíduos de sistema de crescimento e terminação de suínos para a produção de biogás.** In: Congresso Brasileiro de Veterinários Especialistas em Suínos, Fortaleza, 2005. Anais. Fortaleza: Associação Brasileira dos Veterinários Especialistas em Suínos, 2005.

PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso** (Dissertação de Mestrado). Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PÉCORA, V. *et al.* **Potencial de geração de energia elétrica e Iluminação a gás por meio do aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário.** 7º Congresso Internacional sobre Geração Distribuída e Energia no Meio Rural - AGRENER GD 2008, 23 a 26 de setembro de 2008, Fortaleza, CE, Brasil. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/publicacoes/aterroagrener06jun2008.pdf>. Acesso em 9 de outubro de 2012.

PIDD, M. **Modelagem empresarial:** ferramentas para tomada de decisão. Porto Alegre: Artes Médicas, 1998.

PNSB. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008.** Disponível em: http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf. Acesso em: 04/03/2012.

PNUD. **Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento.** Disponível em: <http://www.pnud.org.br/SobrePNUD.aspx>. Acesso em: 13/07/2013.

POWERSIM STUDIO ENTERPRISE 2003. **Software Powersim Studio Enterprise.** Versão 2003.

SAITO, J. R. **Análise de cadeias agroindustriais utilizando simulação computacional baseada na tecnologia System Dynamics:** Um estudo de caso. Congresso e Mostra de Agroinformática. P. 9. 2000.

SANESUL. Empresa de Saneamento de Mato Grosso do Sul. **Estudo de Biogás/Fatura de energia das ETE's/Análises do efluente e afluente.** Dourados, 2013.

SANTOS, N. S. dos. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de tratamento de esgotos de Madre de Deus – Bahia**. Dissertação de mestrado (Mestrado em Tecnologias Aplicáveis em Bioenergia). Faculdade de Tecnologias e Ciências de Salvador. Salvador, 2009.

SENGE, Peter M. **A Quinta Disciplina - Arte, Teoria e Prática da Organização de Aprendizagem**. São Paulo, Best Seller, 1990. 352 p.

SILVA, N. A. **Manual técnico, construção e operação de biodigestor modelo chinês**. 2.ed. Editora EMATER, 90 p . Brasília, 1983.

SILVA, P. P. **Influência dos Aspectos Regulatórios no Processo de Tomada de Decisão em Sistemas de Cogeração de Energia Elétrica: Um Estudo de Caso do Setor Sucroalcooleiro de Mato Grosso do Sul**. (Dissertação de Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Campo Grande – MS, 2009.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações**. 6ª edição. São Paulo: Atlas, 2008. 186 p.

SOUZA, K. C. G. de. **Modelo de simulação para análise da viabilidade de geração de energia a partir da utilização de biodigestores**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2010.

STADLER, I.; BHANDARI, R.; MADEIRO, D. **Implementation of small grid connected decentralized power generators using renewable energies**. Cologne University of applied Sciences, Germany, 2010.

STERMAN, J. **Business dynamics: systems thinking and modelling for a complex world**. Boston, MA: Irwin McGraw-Hill, 2000.

TECPAR (Instituto de Tecnologia do Paraná). **Biodigestor**, Curitiba. Disponível em: <http://www.tecpar.br/telus/Projetos/04%20BSI%20-%20biodigestor.htm>. Acesso em: 09 de outubro de 2012.

UNESCO. **Análisis tecnológico de la generación de biogás**. Montevideo, 1984.

VAN WYLEN, G.; SONNTAG, R.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução da 6ª edição americana, 2003. 589 p.

WEREKO-BROBBY, C. Y., HAGEN, E.B. **Biomass conversion and technology**. Editora John Wiley & Sons. p. 2-224. New York, 2000.

ZAMBO, A. C. **Análise de Fundo de Pensão: Uma Abordagem de System Dynamics**. Rio de Janeiro: Funenseg, 2000a. 128 p. (Cadernos de seguro: teses, v. 5, n.13).