

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**PRODUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E POTENCIAL DE
GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO EM PROCESSOS DE
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

ALINE PEREIRA LIMA

São Carlos - SP
2012

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

**PRODUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA E POTENCIAL DE
GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO EM PROCESSOS DE
TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO**

ALINE PEREIRA LIMA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Nemésio N. B. Salvador

São Carlos - SP
2012

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

L732pg

Lima, Aline Pereira.

Produção de gases de efeito estufa e potencial de geração de créditos de carbono em processos de tratamento de esgoto sanitário / Aline Pereira Lima. -- São Carlos : UFSCar, 2012.
124 f.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2012.

1. Engenharia urbana. 2. Efeito estufa. 3. Créditos de carbono. 4. Tratamento de esgoto. I. Título.

CDD: 711 (20^a)

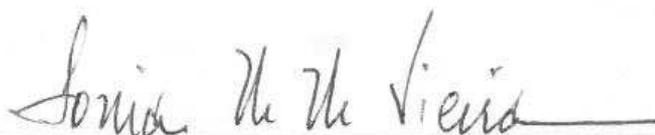
FOLHA DE APROVAÇÃO

ALINE PEREIRA LIMA

Dissertação defendida e aprovada em 30/05/2012
pela Comissão Julgadora



Prof. Dr. Nemésio Neves Batista Salvador - Presidente
Orientador (DECiv/UFSCar)



Profª Drª Sonia Maria Manso Vieira
(Divisão de Questões Globais/CETESB)



Prof. Dr. Erich Kellner
(DECiv/UFSCar)



Prof. Dr. Ricardo Siloto da Silva
Presidente da CPGEU

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me fornecer força e sabedoria suficientes para alcançar mais esta conquista nesta etapa da vida.

Agradeço à minha família, minha base, meus princípios, minha vida. Ao meu pai Hélio, à minha mãe Vera, aos meus irmãos Andréia e Renan e à minha sobrinha Ayane.

Agradeço aos meus amigos, sempre parceiros, nos quais encontrei paciência, alegria e confiança, que tanto precisei para finalizar esse trabalho.

Agradeço ao meu orientador Professor Doutor Nemésio Neves Batista Salvador, pela ajuda, compreensão, apoio e imensa sabedoria demonstrada.

Agradeço à professora Dr. Sonia Maria Manso Vieira, que por tantas vezes prestou esclarecimentos sobre os temas desta pesquisa.

Agradeço aos professores e funcionários do PPGEU, que passaram suas experiências e ampliaram meu conhecimento.

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho.

“Falhei mais de 9000 lançamentos na minha carreira. Perdi quase 300 jogos. Vinte e seis vezes fui escolhido para fazer o lançamento decisivo e falhei. Falhei vezes atrás de vezes durante a minha vida. E foi por causa disso que eu tive sucesso.”

Michael Jordan

RESUMO

O conceito dos créditos de carbono surgiu a partir da sensibilização para a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa (GEE) a fim de combater o agravamento do aquecimento global, discutido e formalizado no Protocolo de Quioto. A emissão de GEE na forma de metano, óxido nitroso e dióxido de carbono acontece devido a diversas atividades, dentre elas o tratamento de águas residuárias, tanto domésticas quanto industriais. Este trabalho apresenta uma estimativa da produção de CH₄ e N₂O e do consumo de energia dos sistemas de tratamento de esgoto mais utilizados no Brasil, sobre a qual foram aplicados cenários de mitigação para verificar sua representatividade em termos de créditos de carbono. Isto foi feito a partir de metodologias e procedimentos do *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC. Os resultados revelam que os maiores volumes de GEE estão associados à tratamentos anaeróbios, cujas emissões podem ser superiores a 200 tCO₂e/ano. Ambas as propostas de mitigação sugeridas (substituição de sistemas anaeróbios abertos por processos aeróbios ou introdução de mecanismos de captura e combustão de metano em reatores anaeróbios) mostram redução de emissões semelhante, a maioria entre 100 e 150 tCO₂e/ano para população de 1000 habitantes atendida. Entretanto, constatou-se que o potencial de obtenção de créditos está na queima do biogás pois a aeração exige alto consumo de energia. Essa possibilidade de gerar créditos de carbono, provenientes do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), pode contribuir para amenizar parte dos custos de implementação das estações de tratamento de esgotos, bem como estimular a sua modernização.

Palavras-chave: Gases de efeito estufa. Créditos de Carbono. Tratamento de esgoto.

ABSTRACT

The concept of carbon credits came from the awareness of need to reduce greenhouse gas (GHG) emissions in order to combat the worsening of global warming, discussed and formalized in the Kyoto Protocol. Emission of greenhouse gases as methane, nitrous oxide and carbon dioxide is due to several activities, among them the wastewater treatment, both domestic and industrial. This paper presents an estimation of CH₄ and N₂O production and energy consumption in wastewater treatment systems most used in Brazil, on which mitigation scenarios were applied to show its representation in terms of carbon credits and monetary value. This work was based on the methodologies and procedures of the Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. The results show that the largest volumes of GHGs are associated with anaerobic treatments, whose emissions may exceed 200 tCO₂e/year. Both suggested mitigation proposals (replacement of anaerobic systems by open aerobic processes or introduction of mechanisms for capturing and burning methane in closed reactors) show a similar emission reduction, mostly between 100 and 150 tCO₂e/year for attended population of 1000 persons. However, it was found that the credit potential is in the biogas combustion because aeration demands high energy consumption. This ability to generate carbon credits, from Clean Development Mechanism (CDM), can help soften some of the implementation costs of wastewater treatment plants, as well as stimulate its modernization.

Keywords: Greenhouse gases. Carbon Credits. Wastewater treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classes de gases estufa.	18
Figura 2 - Principais acordos reguladores de GEE.....	19
Figura 3 - Contribuição de diferentes setores econômicos no total de emissões antrópicas mundiais de GEE em 2004 em termos de CO ₂ e.....	23
Figura 4 - Participação dos diferentes GEE nas emissões totais antrópicas em 2004 (CO ₂ e). ..	23
Figura 5 - Digestão anaeróbia em países desenvolvidos versus em desenvolvimento.....	27
Figura 6 - Linha de base e cenário de projeto.....	33
Figura 7 - Critério de redução de emissões para projetos do Tipo 3.....	34
Figura 8 - Princípios do MDL para obtenção de RCEs.....	36
Figura 9 - Estrutura Institucional de projetos de MDL.	37
Figura 10 - Ciclo de Projeto de MDL.....	39
Figura 11 - Opções de períodos de obtenção de créditos de carbono.....	41
Figura 12 - Principais países ofertantes de RCEs no mercado de carbono até 2010.....	42
Figura 13 - Principais rotas de decomposição da matéria orgânica na presença de diferentes aceptores de elétron.	50
Figura 14 - Conversões biológicas do nitrogênio.....	52
Figura 15 - Mecanismo da digestão anaeróbia.	55
Figura 16 - Quantidade de processos por efluente tratado no Brasil.....	65
Figura 17 - Distribuições percentuais das emissões de GEE do Estado de São Paulo e do Brasil em 2005.....	66
Figura 18 - Fases dos Procedimentos Metodológicos.....	76
Figura 19 - Sistemas de tratamento de esgoto e vias de disposição.....	77
Figura 20 - Árvore de decisão para estimativa das emissões de GEE pelo tratamento de efluente doméstico.....	80
Figura 21 - Emissões de LB e do CP dos processos (pop=1000 hab).....	98
Figura 22 - Emissões de LB para associações e seus CPs (pop=1000 hab).....	101

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Lista de Categorias de Fontes/Sumidouros de emissões.....	21
Quadro 2 - Metodologias de linha de base e monitoramento para projetos do setor de tratamento de esgoto.....	34
Quadro 3 - Seleção de políticas, medidas e instrumentos aplicadas ao setor de Manejo de Esgotos que se mostraram ambientalmente eficazes.....	62
Quadro 4 - Regulamentações em âmbito nacional sobre mitigação de GEE.....	71
Quadro 5 - Potenciais de emissões de CH ₄ e N ₂ O para os processos de tratamento e disposição de esgoto e lodo.....	78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Gases de efeito estufa e potenciais de aquecimento.....	30
Tabela 2 - GTP E GWP.....	31
Tabela 3 - Quantidade de reatores por tipo utilizado no Brasil.....	65
Tabela 4 - Emissões de CH ₄ no Brasil no ano de 2005 por setores em giga gramas.	68
Tabela 5 - Atividades de projeto no Brasil por escopo setorial.....	74
Tabela 6 - Fatores de conversão de metano - MCF (valores <i>default</i>) adotados.	85
Tabela 7 - Emissões de linha de base e cenários de mitigação adotados (pop=1000 hab).....	91
Tabela 8 - Emissões dos cenários de projeto para os processos (pop 1000 hab).	93
Tabela 9 - Emissões de LB e mitigação adotada para associações (pop=1000 hab).....	94
Tabela 10 - Emissões dos cenários de projeto para associações (pop=1000 hab).....	96
Tabela 11 - Reduções de emissão de GEE, valores monetários e consumo de energia dos processos (1000 hab).	100
Tabela 12 - Reduções de emissão de GEE, valores monetários e consumo de energia das associações (1000 hab).	102

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- AM** - Approved Methodology
AMS - Approved Methodology Small Scale
AND - Autoridade Nacional Designada
B_o - Capacidade de produção de metano das águas residuárias
BAS - Biofiltro Aerado Submerso
CDM - *Clean Development Mechanism*
CE - Comércio de Emissões
CEBDS - Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CER - *Certified Emission Reductions*
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CFC - Clorofluorcarbonos
CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CIDES - Comissão Interministerial para o Desenvolvimento Sustentável
CIM - Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima
CLRTAP - *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution*
CIMGC - Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima
COP - Conferência das Partes
COP/MOP - Conferência das Partes na qualidade de reunião das Partes do Protocolo de Quioto
CP - Cenário de Projeto
CQNUMC - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCP - Documento de Concepção de Projeto
D_{dom,y} - Carga orgânica anual presente no esgoto doméstico pré-tratamento
D_{dom,discharge,y} - Carga orgânica anual presente no esgoto após tratamento, a ser lançado em rios
DigAn - Digestor Anaeróbio de lodo
Dis - Disposição em mares, rios e lagos
DQO - Demanda Química de Oxigênio
E_{CH₄,y} - Emissões de CH₄ por processo de tratamento por ano
ECX - *European Climate Exchange*
E_{discharge,y} - Emissões provenientes do lançamento em corpos d'água por ano
EEA - *European Environment Agency*
EF_{EFFLUENT} - Fator de emissão das emissões de N₂O lançados no esgoto
EF_{PLANT} - Fator de emissão da estação de tratamento
E_{N₂O,y} - Emissões de N₂O por processo de tratamento por ano
EOD - Entidades Operacionais Designadas
E_{plants,y} - Emissões totais de N₂O oriundas de ETEs por ano
ET - *Emissions Trading*
ETE - Estação de Tratamento de Esgoto
EU ETS - *European Union Emissions Trading Scheme*
E_{ww,discharge,y} - Emissões de metano decorrentes do lançamento do esgoto em rio/lago/mar
E_{ww,treatment,y} - Emissões de metano do sistema de tratamento anaeróbio/aeróbio de águas residuárias por ano
E_y - Emissões de CO₂e por processo de tratamento por ano
FB - Filtro Biológico
FBA_n - Filtro Biológico Anaeróbio
FGV - FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS

$F_{IND-COM}$ - Fator para a proteína de origem industrial e comercial lançada no esgoto
FINEP - Financiadora de Estudos e Pesquisas do Governo Federal
FNMC - Fundo Nacional sobre Mudança do Clima
 $F_{NON-CON}$ - Fator para a proteína não-consumida lançada no esgoto
 F_{NPR} - Fração de nitrogênio na proteína
GEE - Gases de Efeito Estufa
Gg - Giga gramas (10^9 g)
GTP - Potencial de Temperatura Global
GWh - Gigawatt-hora
GWP - *Global Warming Potencial*
 GWP_{CH_4} - Potencial de Aquecimento Global do metano
 GWP_{N_2O} - Potencial de aquecimento global do óxido nitroso
HCFC - Hidroclorofluorcarbonos
HFC - Hidrofluorcarbono
IC - Implementação Conjunta
IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change
JI - *Joint Implementation*
Kt - Quilotoneladas
LAAP - Lodos Ativados Aeração Prolongada
LAB - Lodos Ativados por Batelada
LAC - Lodos Ativados Convencional
Laer - Lagoa Aerada
LaerF - Lagoa Aerada Facultativa
LAn - Lagoa Anaeróbia
LB - Linha de Base
LFac - Lagoa Facultativa
LoA - *Letter of approval* ou Carta de Aprovação
 $MCF_{ww,treatment,i}$ - Fator de correção de metano para os sistemas de tratamento de águas residuárias
MCT - Ministério de Ciência e Planejamento
MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MW - Megawatt
 $N_{EFFLUENT}$ - Total anual de nitrogênio no esgoto
NMVOC - Compostos orgânicos voláteis não-metano
 N_{SLUDGE} - Nitrogênio removido com o lodo
NSW GGA S - *New South Wales Greenhouse Gas Abatement Scheme*
OD - Oxigênio Dissolvido
ONU - Organização das Nações Unidas
PAG - Potencial de Aquecimento Global
PD&D - Pesquisa, Desenvolvimento e Demonstração
PFC - Perfluorcarbonos
PNMC - Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNUMA - PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE
Pop - População atendida por ano
Ppbv - Parte por bilhão em volume
Ppmv - Parte por milhão em volume
Protein - Consumo anual de proteína por pessoa
R - Metano recuperado e queimado medido em tCO₂e
RAC - Reator Anaeróbio Compartimentado
RAFA - Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente

RCE - Redução Certificada de Emissão

RGGI - *Regional Greenhouse Gas Initiative*

SSC - Atividades de Projeto de Pequena Escala

Tg - Tera grammas (10^{12} g)

TS - Tanque Séptico

UF - Fator de correção para contabilizar as incertezas do modelo

UNECE - *United Nations Economic Commission for Europe*

UNFCCC - *United Nations Framework Conference on Climate Change*

URE - Unidade de Redução de Emissão

USEPA - *United States Environmental Protection Agency*

WCI - *Western Climate Initiative*

WL - Wetlands

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	2
RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE QUADROS	8
LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	10
1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 GASES DE EFEITO ESTUFA	18
3.1.1 Fontes e sumidouros de GEE	20
3.1.2 Dióxido de Carbono (CO ₂).....	25
3.1.3 Metano (CH ₄)	26
3.1.4 Óxido Nitroso (N ₂ O)	28
3.1.5 Potencial de Aquecimento Global e Potencial de Temperatura Global	29
3.2 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO	31
3.2.1 Escalas e Metodologias de Projeto de MDL	33
3.3 CRÉDITOS DE CARBONO	35
3.3.1 Estrutura institucional do MDL.....	36
3.3.2 Obtenção de Créditos de Carbono	39
3.3.3 Mercado de Carbono	41
3.4 TRATAMENTO DE ESGOTO	44
3.4.1 Fases do tratamento de esgoto	45
3.4.1.1 Tratamento preliminar	45
3.4.1.2 Tratamento primário	45
3.4.1.3 Tratamento secundário	46
3.4.1.4 Tratamento terciário	46
3.4.2 Processos biológicos de tratamento	47
3.4.3 Tratamento do lodo.....	48
3.5 ROTAS DE DECOMPOSIÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA	48
3.5.1 Condição aeróbia	50
3.5.2 Condição anóxica	51
3.5.3 Condição anaeróbia	54
3.5.3.1 Hidrólise	55
3.5.3.2 Acidogênese	56
3.5.3.3 Acetogênese.....	57
3.5.3.4 Metanogênese	57
3.6 MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE	58
3.6.1 Abordagem Tecnológica	59
3.6.2 Abordagem Política	61
3.6.3 Abordagem Educacional e Cultural.....	63
3.7 O TRATAMENTO DE ESGOTO E A EMISSÃO DE GEE NO BRASIL	64
3.8 CENÁRIO ATUAL DO MDL NO BRASIL	69
3.8.2 Projetos	73
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	76

4.1 DEFINIÇÃO DAS FORMAS DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO DE ESGOTO E ESCOLHA DOS CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO	76
4.2 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GEE E CONSUMO DE ENERGIA DA LINHA DE BASE E DO CENÁRIO DE PROJETO	80
4.2.1 Estimativa das emissões de metano ($E_{CH_4,y}$)	81
4.2.2 Estimativa das emissões de óxido nitroso ($E_{N_2O,y}$)	86
4.2.3 Estimativa do consumo energético	89
4.3 GERAÇÃO DE RCES E SEU RESPECTIVO VALOR MONETÁRIO	89
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	90
5.1 ESTIMATIVA DE EMISSÕES DOS PROCESSOS DE TRATAMENTO.....	90
5.1.1 Linha de Base	90
5.1.2 Cenário de Projeto	92
5.2 ESTIMATIVA DE EMISSÕES DAS ASSOCIAÇÕES.....	94
5.2.1 Linha de Base	94
5.2.2 Cenário de Projeto	96
5.3 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO.....	98
5.3.1 Processos	98
5.3.2 Associações	101
5.4 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES	104
6 CONCLUSÃO.....	107
REFERÊNCIAS	108
APÊNDICES	112

1 INTRODUÇÃO

Diante dos efeitos das mudanças climáticas, discussões vêm ocorrendo em âmbito científico e político, culminando em uma série de programas e conferências. Dentre elas a 3ª Conferência das Partes (COP 3) na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima - CQNUMC (ou *United Nations Framework Conference on Climate Change - UNFCCC*), ocorrida no ano de 1997 no Japão, tem destaque, pois com a adesão de 185 países, foi estabelecido o Protocolo de Quioto (FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS - FGV, 2002). O acordo dividiu os países em dois grupos: Anexo B (países mais industrializados, grandes emissores de CO₂) e, não-Anexo B (países que para atender às necessidades básicas de desenvolvimento precisam aumentar a sua oferta energética e, potencialmente, suas emissões). O Protocolo definiu ainda que os membros do Anexo B ficavam obrigados a reduzir suas emissões de gases estufa entre 2008 e 2012 para que elas se tornem 5,2% (na média) inferiores aos níveis registrados no ano de 1990 (BRASIL, 1997).

De acordo com o Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável - CEBDS (2004), para possibilitar a implementação dos seus propósitos de redução de emissões e ao mesmo tempo assegurar uma transição economicamente viável para a adoção desse novo padrão, o Protocolo criou mecanismos comerciais (ou de Flexibilização) em complementação às medidas domésticas dos países Anexo B, para facilitar o cumprimento das metas de cortes nas emissões. São eles:

i) o Comércio de Emissões - CE (ou *Emissions Trading - ET*) e a Implementação Conjunta - IC (ou *Joint Implementation - JI*): instrumentos pelos quais um país industrializado pode, inclusive através de operações de compra e venda, contabilizar reduções realizadas em outro país do Anexo B; e

ii) o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL ou *Clean Development Mechanism - CDM*): que permite aos países do Anexo B o financiamento de projetos de redução ou compra de volumes de redução de emissões resultantes de iniciativas desenvolvidas nos países não industrializados (do não-Anexo B, que nesse primeiro período de cumprimento do Protocolo, não têm metas definidas de redução). Assim, para efeitos globais, não é importante onde a redução ocorre, mas que ela ocorra de fato (BRASIL, 1997).

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo traz diversos benefícios para seus atores: o cumprimento das metas de redução de GEE pelas Partes Anexo B; a viabilização do

desenvolvimento sustentável no mundo todo; a transferência de recursos financeiros, de ciência e tecnologia, principalmente para os países em desenvolvimento, entre outros (FGV, 2002). Nessa perspectiva, seu princípio básico envolve a minimização/mitigação de impactos ambientais, nesse caso, a intensificação do efeito estufa. Estes fatores geram grandes oportunidades para diversas áreas, dentre elas o tratamento de esgoto sanitário e industrial, emissor de CH₄ e N₂O.

A deficiência no tratamento de esgoto sanitário¹ é um problema que atinge diversas áreas no país, onde apenas 34,6% do total de esgoto gerado são tratados (BRASIL, 2010a). Algumas das vantagens da implantação de novas tecnologias em ETEs são: a melhoria da capacidade de monitoramento da produção e do tratamento de esgoto; a geração de água de reúso (esgoto pós-tratamento); a utilização de lodo residual (alternativa de adubo orgânico) e a geração de energia através da queima do biogás; a redução de microrganismos patogênicos associados ao esgoto doméstico e a redução de odores produzidos pela decomposição da matéria orgânica.

Este setor constitui-se em um instrumento fundamental de promoção do desenvolvimento sustentável nacional e local com ganhos significativos à qualidade de vida da população, bem como à diminuição de despesas e aplicação de recursos financeiros nos sistemas de saúde. Os créditos resultantes de projetos de MDL podem gerar maiores investimentos buscando-se a universalização do saneamento básico brasileiro.

Segundo Rosso e Stenstrom (2008), o tratamento adequado do esgoto municipal sanitário pode ser considerado um fator de mitigação do aquecimento global. Eles apontam que sem a expansão do tratamento de águas residuárias para todas as áreas urbanas do mundo, as emissões de dióxido de carbono e de metano associadas com o despejo do esgoto pode atingir o equivalente a $1,91 \times 10^5$ tCO₂/dia no ano de 2025. E que desse total, $1,21 \times 10^4$ tCO₂/dia podem ser convertidos para créditos, principalmente através do sequestro de biomassa e da recuperação do biogás convertido em energia. Desta maneira, os autores confirmam que existe um potencial enorme de desenvolvimento do serviço de tratamento bem como de obtenção de créditos de carbono. Mas, apesar de verificado teoricamente que o tratamento de esgoto pode gerar projetos de MDL, poucas têm sido as iniciativas nesse sentido.

¹ Neste trabalho esgoto sanitário e esgoto doméstico são tratados como sinônimos. A metodologia está em uma base por pessoa, por isso, as emissões de águas residuárias comerciais são estimadas como parte de águas residuais domésticas (IPCC, 2006a).

A partir dessa constatação, a questão chave desta pesquisa foi estudar de que maneira os processos de tratamento de esgoto sanitário podem ser contabilizados como créditos de carbono no caso brasileiro. Isto foi feito por meio da estimativa da produção de metano e óxido nitroso, da proposição de alternativas de mitigação dessas emissões e da análise do consumo de energia para os tipos de tratamento de esgoto sanitário mais usuais no Brasil.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

- Estudar os processos de tratamento de esgoto sanitário mais empregados no Brasil em termos de emissão de GEE e aplicar cenários de mitigação a fim de verificar seu potencial de geração de créditos de carbono.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar e sistematizar os principais tipos de tratamento de esgoto sanitário utilizados no Brasil e as formas de reduzir as emissões do setor;
- Elaborar a estimativa das emissões de GEE do cenário de referência (Linha de Base) e do Cenário de Projeto de MDL para os processos de tratamento de esgoto sanitário, bem como calcular suas respectivas demandas energéticas;
- Analisar o potencial de geração de créditos de carbono e seu valor monetário para as reduções de emissões criadas pelos cenários anteriores.

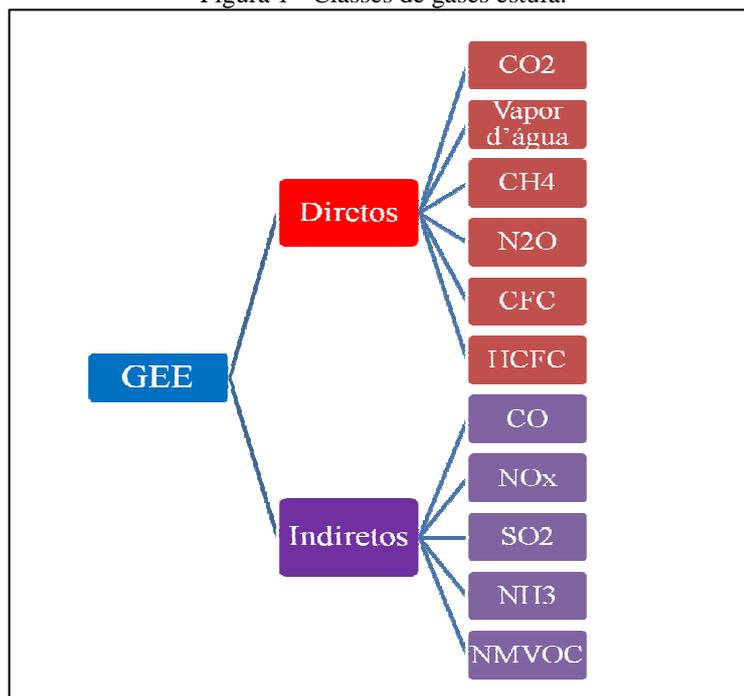
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GASES DE EFEITO ESTUFA

Ao longo dos últimos anos tornou-se freqüente o acontecimento de discussões a respeito do Aquecimento Global e do Efeito Estufa. Estes são fenômenos naturais causados por determinados gases (GEE - Gases de Efeito Estufa), que mantêm as condições climáticas de sobrevivência humana na Terra. Entretanto, a intensificação das mudanças climáticas traz impactos adversos e então se criou um debate sobre a contribuição antrópica para esta situação. Este cenário é causado pela elevação na concentração de GEE da atmosfera da Terra. Os GEE são gases com capacidade de reter calor e/ou alterar tanto o equilíbrio térmico quanto o equilíbrio climático do nosso planeta. É importante destacar que muitos deles são emitidos naturalmente como nas erupções vulcânicas. Acredita-se que o incremento das emissões de GEE de origem humana perturba o balanço natural atmosférico e climático. Segundo *IPCC Guidelines* (IPCC, 2006a), a remoção ou emissão de GEE considerada antrópica é aquela que é resultado de atividades humanas, principalmente pela queima de combustíveis fósseis em usinas termoeletricas, indústrias, veículos em circulação, atividades agro-pastoris, tratamento e disposição de resíduos.

Existem 2 classes de GEE, os Diretos e os Indiretos (Figura 1).

Figura 1 - Classes de gases estufa.



Fonte - Elaborado pelo autor, baseado em IPCC, 2006a.

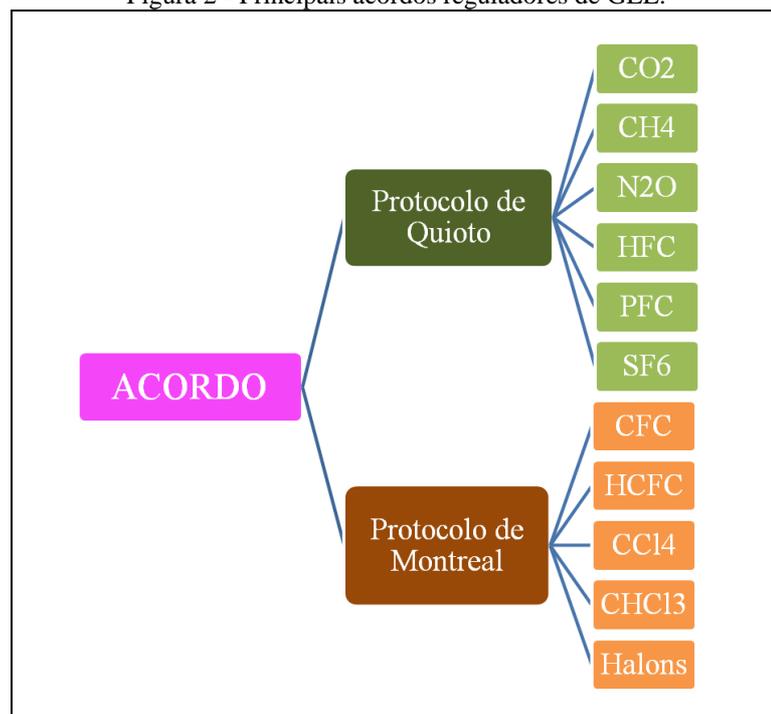
Os GEE Indiretos ou precursores de GEE são, em sua maior parte, consequência de atividades humanas e geram influência nas reações químicas que ocorrem na troposfera, exercendo papel indireto no aumento do efeito radiativo. Estes são: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de enxofre (SO₂), amônia (NH₃) e compostos orgânicos voláteis não-metano (NMVOC). As emissões desses GEE indiretos também podem resultar da queima incompleta de combustíveis, bem como de Processos Industriais, no Subsetor de Alimentos e Bebidas, Vidro e Papel e Celulose (IPCC, 2006a).

O CO, os NO_x e os NMVOC na presença de luz solar contribuem para a formação do GEE ozônio (O₃) na troposfera e são por isso, denominados precursores do ozônio. A emissão de SO₂ conduz a formação de partículas de sulfato que também desempenham papel relevante nas mudanças climáticas. Por fim, a amônia (precursora do aerosol) e os óxidos de nitrogênio têm influência sobre o balanço do ciclo do nitrogênio (IPCC, 2006a).

Já os gases estufa diretos são constituintes gasosos da atmosfera, naturais ou antrópicos, que absorvem e reemitem radiação infravermelha, como por exemplo, vapor d'água, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, CFC (clorofluorcarbonos) e HCFC (hidroclorofluorcarbonos). Os gases estufa considerados atualmente como mais relevantes (CO₂, CH₄ e N₂O) serão descritos nas próximas seções.

Os GEE são controlados principalmente por dois acordos internacionais (Figura 2).

Figura 2 - Principais acordos reguladores de GEE.



Fonte - Elaborado pelo autor, baseado em IPCC, 2006a.

No intuito de regular a emissão de GEE, foi estabelecido em 1997 o Protocolo de Quioto. Este criou diretrizes de redução de emissões para um grupo de gases com capacidade de absorver parte da radiação infravermelha, emitida principalmente pela superfície terrestre, e dificultar seu escape para o espaço. Estes estão listados em seu Anexo A e são: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorcarbono (HFC), perfluorcarbonos (PFC) e hexafluoreto de enxofre (SF_6) (BRASIL, 1997).

Dentre os gases da Figura 2, há um grupo que afeta a Camada de Ozônio. Nesse sentido, no ano de 1987 várias nações se mobilizaram e estabeleceram o Protocolo de Montreal (PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE - PNUMA, 2000), sobre as Substâncias que Destroem a Camada de Ozônio, ligado à Organização das Nações Unidas (ONU). Os signatários (atualmente 193 países) concordaram em trabalhar para eliminar a produção e o consumo de Substâncias Destruidoras da Camada de Ozônio. Assim, as substâncias controladas por este acordo são: clorofluorcarbonos (CFCs), hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), tetracloreto de carbono (CCl_4), 1,1,1-triclorometano (metilclorofórmio) e halons. É importante destacar que a preocupação com o efeito estufa se iniciou somente em Quioto, mas hoje sabe-se que os gases regulados pelo Protocolo de Montreal também têm influência sobre o aquecimento global.

Este trabalho contempla em seu escopo o estudo dos gases regulados por Quioto. As próximas seções trazem informações e dados relativos ao CO_2 , CH_4 , N_2O , PFC, HFC e SF_6 ; principalmente os três primeiros, pois estes são contemplados por projetos de MDL do setor de Manejo de Resíduos.

3.1.1 Fontes e sumidouros de GEE

As fontes de emissão de GEE, conforme Tonello (2007), são ditas como um processo ou atividade, natural ou de origem humana, que libere um gás de efeito estufa direto ou um precursor de GEE na atmosfera. Mecanismos naturais ou antrópicos classificados como sumidouro ou reservatório de carbono são aqueles que têm capacidade de absorver ou sequestrar e estocar mais carbono do que liberam para a atmosfera, tais como as florestas e os oceanos. Eles servem para compensar, em parte, as emissões de gases do efeito estufa.

As fontes ou sumidouros de origem humana de emissões GEE são categorizadas segundo sua atividade econômica geradora. Sobre os gases regulados por Quioto, o HFC, o PFC e o SF_6 são produzidos exclusivamente por atividades do ser humano, não tendo

procedência na natureza. Em território brasileiro não existe produção de HFC. Os dados sobre as emissões de HFC-134a consideram, assim, as vendas do gás e seu uso em diversos produtos identificados como sendo fabricados no Brasil: refrigeração doméstica, bebedouros, refrigeração comercial, transporte refrigerado feito por caminhões frigoríficos, ar-condicionado e refrigeração industrial, ar-condicionado veicular e no setor de Espumas. O PFC é produzido principalmente no segmento de manufatura de semicondutores e como substituinte de gases destruidores de ozônio. Já o SF₆ é utilizado como isolante em equipamentos elétricos de grande porte. As emissões ocorrem devido a perdas nos equipamentos (SÃO PAULO, 2011). O Quadro 1 identifica os principais GEE e os setores da economia responsáveis por sua produção atualmente.

Quadro 1 - Lista de Categorias de Fontes/Sumidouros de emissões.

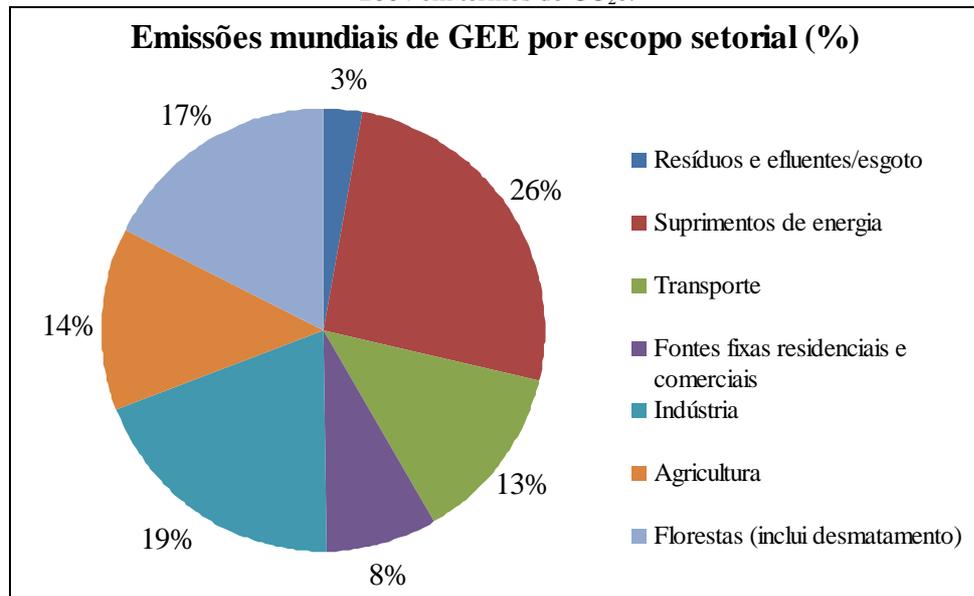
Categoria	GEE
Energia (fonte)	
Queima de combustíveis fósseis	CO ₂
Uso Não-Energético de Combustíveis Fósseis	CO ₂
Combustão Estacionária (excluído o CO ₂)	CH ₄ , N ₂ O
Combustão Móvel (excluído o CO ₂)	CH ₄ , N ₂ O
Mineração de Carvão	CH ₄
Minas Subterrâneas Abandonadas de Carvão	CH ₄
Sistemas de Gás Natural	CH ₄
Sistemas Petroleiros	CH ₄
Incineração de Resíduos	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O
Processos Industriais (fonte)	
Produção de dióxido de Titânio	CO ₂
Produção de Alumínio	CO ₂
Produção de Ferro e Aço	CO ₂ , CH ₄
Produção de Ligas de Ferro	CO ₂ , CH ₄
Produção de Amônia e Consumo de Uréia	CO ₂
Produção de Cimento	CO ₂
Produção de Cal	CO ₂
Uso de Dolomita e Calcário	CO ₂
Produção e Consumo de Carbonato de Cálcio	CO ₂
Consumo de Dióxido de Carbono	CO ₂
Produção de Ácido Fosfórico	CO ₂
Produção de Petroquímicos	CH ₄ , CO ₂
Produção e Consumo de Carboneto de Silício	CH ₄ , CO ₂
Produção de Chumbo	CO ₂
Produção de Zinco	CO ₂

Produção de Ácido Adípico	N ₂ O
Produção de Ácido Nítrico	N ₂ O
Substituição de substâncias destruidoras de Ozônio	HFCs, PFCs
Produção de HCFC-22	HFC-23
Manufatura de Semicondutores	HFCs, PFCs, SF ₆
Distribuição e Transmissão Elétrica	SF ₆
Produção e Processamento de Magnésio	SF ₆
Uso de Solventes e outros Produtos (fonte)	
Uso de Produtos com N ₂ O	N ₂ O
Agricultura (fonte)	
Fermentação Entérica	CH ₄
Manejo de Estrume	CH ₄ , N ₂ O
Cultivo de Arroz	CH ₄
Queima no campo de Resíduos da Agricultura	CH ₄ , N ₂ O _x
Manejo de Solos Agrícolas	N ₂ O
Uso da Terra, Mudanças no Uso da Terra e Florestas (sumidouro)	
Fluxo de CO ₂	CO ₂ (sumidouro)
Culturas	CO ₂
Assentamentos	N ₂ O
Florestas	CH ₄ , N ₂ O
Wetlands	CO ₂ , N ₂ O
Resíduos (fonte)	
Aterro Sanitário	CH ₄
Tratamento de Esgoto	CH ₄ , N ₂ O
Compostagem	CH ₄ , N ₂ O

Fonte - Adaptado de *United States Environmental Protection Agency - USEPA, 2010.*

Nesse sentido, a Figura 3 mostra a contribuição por escopo setorial correspondente aos gases CO₂, CH₄, N₂O, PFC, HFC e SF₆.

Figura 3 - Contribuição de diferentes setores econômicos no total de emissões antrópicas mundiais de GEE em 2004 em termos de CO₂e.

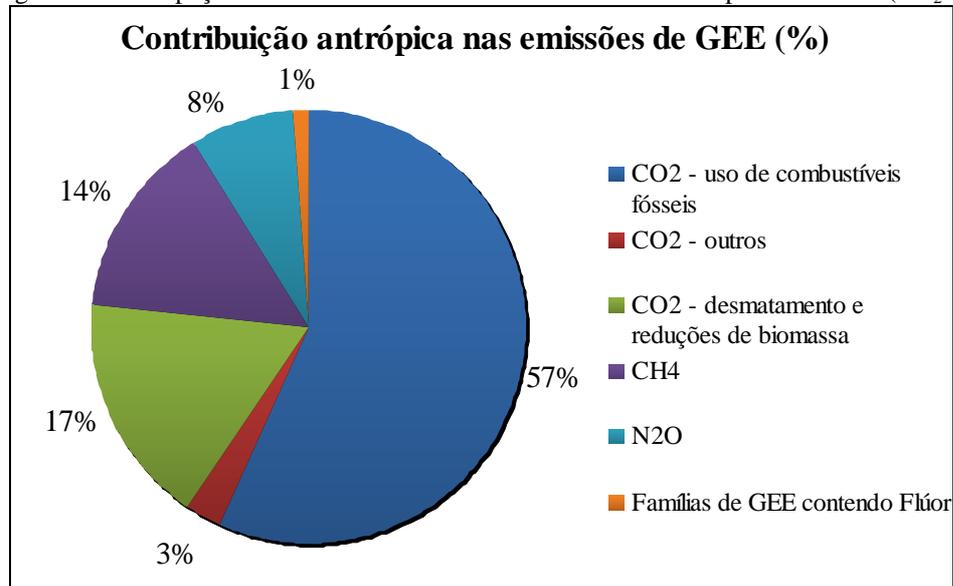


Fonte - IPCC, 2007.

A Figura 3 mostra que os campeões mundiais de emissões são as atividades relacionadas à geração de energia e à indústria (26% e 19% do total de emissões respectivamente). No que se refere ao escopo desta pesquisa, a contribuição do setor de resíduos/esgoto é de 3%.

Dentre os vários gases que podem causar o efeito estufa, os mais relevantes na atualidade são o gás carbônico (CO₂), o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O), pois são os mais emitidos atualmente em termos de volume. O gráfico da Figura 4 evidencia esta situação.

Figura 4 - Participação dos diferentes GEE nas emissões totais antrópicas em 2004 (CO₂e).



Fonte - IPCC, 2007.

Pode-se notar pela Figura 4 que o dióxido de carbono (proveniente do uso de combustíveis fósseis, do desmatamento e redução de biomassa e outras) é o GEE mais significativo em termos de volume, totalizando 77% das emissões antrópicas, seguido do metano com 14% e do óxido nitroso com 8%. Portanto, somente esses três gases representaram 99% das emissões de GEE no ano de 2004. Aspectos importantes sobre esses principais GEE são abordados nas próximas seções. Não obstante, o óxido nitroso e o metano são os mais relevantes produzidos pelo tratamento de esgoto e, portanto, o manejo adequado de águas residuárias reduz as emissões desses gases estufa e pode ser considerado um fator de mitigação do agravamento do aquecimento global.

Embora seja menos comentado nas estimativas totais de emissões de GEE, o setor de resíduos (tratamento de efluentes e resíduos sólidos) também produz emissões de monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, compostos orgânicos voláteis não-metano, amônia e dióxido de enxofre. CO, NO_x e SO₂ são emitidos devido a incineração de resíduos sólidos e no caso do tratamento de efluentes, pela incineração do lodo. Por fim, a emissão de NMVOC pode se originar das ETEs e da disposição de lixo no solo (IPCC, 2006a). Nesse sentido, metodologias detalhadas para estimar esses gases existem e são elaboradas e divulgadas pela EEA - *European Environment Agency* (EMEP/CORINAIR Guidebook, EEA, 2005, <http://reports.eea.eu.int/EMEP/CORINAIR4/en>). Trata-se de um guia de elaboração de inventários de substâncias reguladas pela *Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution* (CLRTAP) da UNECE (*United Nations Economic Commission for Europe*) que contempla todas as categorias fonte e deve ser utilizado nas situações em que estes gases estejam envolvidos de forma relevante (IPCC, 2006a).

No que diz respeito aos gases regulados por Montreal, as emissões de CFC e HCFC são ocasionadas, principalmente, pelo segmento Uso de Solventes e Outros Produtos, entre eles, os Solventes (CFC-113), Aerossóis (CFC-11 e CFC-12), Espumas (CFC-11 e HCFC-141b), Refrigeradores e Ar-Condicionado (CFC-12 e HCFC-22). As emissões de substâncias que destroem a camada de ozônio, as quais, como visto na seção anterior, também são gases de efeito estufa, diminuíram de forma significativa desde a década de 90. Até 2004, as emissões desses gases representavam cerca de 20% do seu nível em 1990 (IPCC, 2007), devido às diretrizes adotadas no Protocolo de Montreal. Até o ano 2001, a maior emissão correspondeu ao CFC-11, quando então este foi proibido na fabricação de novos produtos. A partir daquele ano, o maior volume de emissões passou a ser de HCFC-141b, cujo aumento foi de 94% entre os anos de 2002 e 2008 (SÃO PAULO, 2011).

É importante destacar que, segundo *United States Environmental Protection Agency* (USEPA, 2010), alguns processos ou atividades que não são de origem antrópica ou não resultam em uma fonte ou sumidouro líquido de emissões de GEE são, intencionalmente, retirados de uma estimativa. Em geral, essas fontes não-antrópicas são consideradas naturais (ou não diretamente influenciadas por atividades humanas) em sua origem, como por exemplo: erupções vulcânicas; o dióxido de carbono absorvido ou liberado pelos oceanos; incêndios florestais naturais e o metano emitido em terras úmidas (wetlands) não afetadas por mudanças provocadas pelo homem no uso da terra.

Outras atividades/processos podem ser de origem humana, mas não provocar emissões de GEE, pois não mudam o balanço da concentração atmosférica. Este é o caso do CO₂ na respiração de pessoas ou animais domesticados. A respiração de CO₂ por organismos biológicos é simplesmente parte do ciclo de carbono global mais amplo que inclui também a absorção de gás carbônico por organismos fotossintéticos.

Com relação às fontes que são antrópicas e resultam em emissões líquidas de gases estufa, as razões para sua possível exclusão podem ser:

- Não há conhecimento científico suficiente para desenvolver um método confiável para estimar as emissões (em nível nacional);
- Embora um método de estimativa tenha sido desenvolvido, os dados não estão devidamente disponíveis para calcular as emissões;
- As emissões foram implicitamente contabilizadas em outra categoria de fontes (USEPA, 2010).

3.1.2 Dióxido de Carbono (CO₂)

O dióxido de carbono é hoje o gás que mais contribui para a intensificação do efeito estufa. Isto porque, apesar de ser um gás de ocorrência natural, dados do IPCC (2007) revelam que as emissões anuais mundiais de CO₂ cresceram cerca de 80% entre o ano de 1970 e 2004, atingindo uma concentração atmosférica de 379 ppmv em 2005. Este aumento deve-se principalmente às atividades humanas, cuja maior contribuição provém da queima dos combustíveis fósseis seguida de mudanças no uso do solo.

Dentre os vários processos de seqüestro ou captura do dióxido de carbono, o mais rápido é a absorção pela vegetação e pela camada superficial dos oceanos, que ocorre continuamente. Outros sumidouros, a exemplo da transferência para os solos e camadas

profundas dos oceanos, acontecem na escala de tempo de séculos, tendo um efeito menos imediato na concentração atmosférica. Assim, a incerteza associada ao futuro papel da biosfera no balanço global do carbono é bastante alta, visto a dificuldade de se prever o desflorestamento e a rebrota nos trópicos e nas latitudes médias, bem como os mecanismos de absorção que continuam insuficientemente quantificados no ecossistema (TONELLO, 2007).

Em ETEs, conforme IPCC (2001), o CO₂ é produzido diretamente pela conversão da matéria orgânica feita por bactérias (respiração aeróbia), ou seja, faz parte da demanda de energia desses microrganismos. Deste modo, esta parcela de CO₂ possui um ciclo biogeoquímico curto/fechado e é novamente seqüestrada pelos organismos, não caracterizando emissões líquidas. Este gás carbônico é definido como biogênico, e não é contabilizado no âmbito do MDL, pois trata-se de um elemento natural do ciclo do carbono. Isto porque, os ciclos biogênicos são conjuntos de transformações sofridas por um sistema que o remetem ao seu estado inicial; assim, este CO₂ não aumentará o total de dióxido de carbono atmosférico.

Portanto, apesar de o CO₂ ser um gás estufa, o IPCC não considera que o gás carbônico produzido nos processos de tratamento de esgoto contribui para o agravamento do aquecimento global devido a sua característica biogênica (IPCC, 2001). Por isso, este gás não será contemplado nas estimativas de emissão de GEE deste trabalho.

3.1.3 Metano (CH₄)

O metano é um gás de efeito estufa também presente naturalmente na atmosfera terrestre. Estudos científicos (IPCC, 2007) revelam um aumento significativo e crescente de sua concentração na atmosfera, que atingiu 1774 ppbv no ano de 2005, cujas causas mais prováveis são de origem humana: as atividades de agricultura e uso de combustíveis fósseis.

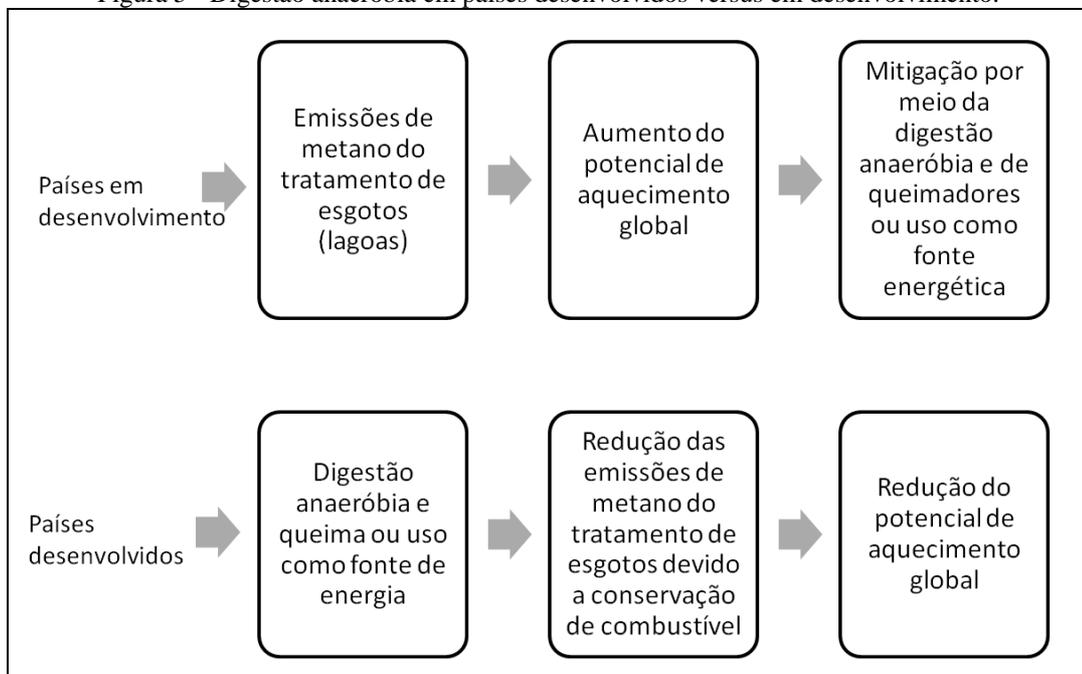
Com relação à formação do CH₄ nos processos de tratamento de resíduos, trata-se de uma transformação por via anaeróbia. A separação da fração orgânica do esgoto (sob condições anaeróbias) acontece seqüencialmente de um composto complexo para um simples, começando com a hidrólise de materiais particulados complexos para polímeros simples como proteínas, carboidratos e lipídeos, que são ainda mais hidrolisados para produzir aminoácidos, açúcares, e ácidos graxos de alto peso molecular. Aminoácidos e açúcares são convertidos também para um subproduto intermediário (por exemplo, ácido propiônico, butírico e outros ácidos voláteis) ou diretamente fermentados para ácido acético. A produção de metano e

dióxido de carbono ocorre por meio da clivagem do acetato (CHERNICHARO, 1997). Este processo é descrito com detalhes na seção 3.5.3 deste trabalho.

O principal fator que influencia (diretamente) na produção de CH_4 de acordo com Metcalf e Eddy (2003) é a quantidade da fração orgânica degradável no esgoto que é comumente expressa em termos de demanda bioquímica ou química de oxigênio (DBO ou DQO). Sob as mesmas condições ambientais, a produção de CH_4 aumenta com a elevação do valor da DBO ou da DQO. Chernicharo (1997) aponta ainda outros fatores ambientais que determinam a produção de CH_4 como, por exemplo: temperatura, pH, tempo de retenção, grau de tratamento do esgoto, competição entre bactérias metanogênicas e redutoras de sulfato, e agentes tóxicos. Finalmente, os processos anaeróbios são muito sensíveis a presença de oxigênio, que inibe completamente a produção de CH_4 devido a sua toxicidade para com os microrganismos envolvidos.

A seguir apresenta-se um esquema (Figura 5) elaborado por El-Fadel e Massoud (2001) que ilustra a prática dos países desenvolvidos e em desenvolvimento com relação aos processos que utilizam a digestão anaeróbia.

Figura 5 - Digestão anaeróbia em países desenvolvidos versus em desenvolvimento.



Fonte - El-Fadel e Massoud, 2001.

A partir da Figura 5 percebe-se que os países já desenvolvidos apresentam uma postura pró-ativa com relação ao impacto ambiental (no caso a intensificação do efeito estufa pela emissão de GEE). Isto porque, adotam geralmente a digestão anaeróbia e planejam a

mitigação do dano de maneira a minimizar o potencial de aquecimento global, fazendo uso da energia gerada no tratamento anaeróbio (proveniente do biogás) como forma de conservar a energia. Enquanto que, nos países em desenvolvimento, há comumente uso de lagoas abertas e então, é recomendada utilização de digestores anaeróbios com recuperação e queima do CH₄ para reduzir o impacto sobre o clima.

3.1.4 Óxido Nitroso (N₂O)

A origem das emissões desse gás pode ser natural ou antrópica. As principais fontes de origem humana são a agricultura e diversos processos industriais, tais como a produção de ácido adípico e ácido nítrico. Entretanto, as fontes de óxido nitroso não foram, ainda, suficientemente quantificadas (TONELLO, 2007).

Ainda segundo o mesmo autor, o N₂O é um importante GEE pois seu efeito é cerca de 300 vezes mais forte que o dióxido de carbono. Além disso, o óxido nitroso é removido da atmosfera por fotólise, que é a decomposição pela luz do Sol, tendo um tempo de vida muito longo, cerca de 120 anos.

Dados do IPCC (IPCC, 2007) demonstram que a quantidade de N₂O na atmosfera aumentou desde a época pré-industrial em torno de 70%, isto provavelmente por causa do aumento da interferência humana.

No contexto do setor de tratamento de efluentes, o nitrogênio, que geralmente se apresenta no esgoto na sua forma reduzida como amônia, é removido durante o tratamento convencional por dois processos biológicos sequenciais: nitrificação e desnitrificação. As transformações deste processo são detalhadas na seção 3.5.2. Durante a nitrificação a amônia é convertida a nitrito e em seguida a nitrato, que é sequencialmente reduzido para o gás nitrogênio durante a desnitrificação. Ambos os processos podem conduzir a emissão de óxidos de nitrogênio (METCALF; EDDY, 2003).

Sob essa perspectiva, as emissões de óxido nitroso podem ocorrer na forma de emissões diretas de estações de tratamento ou emissões indiretas de águas residuárias após seu lançamento em cursos d'água, lagos ou no mar. Emissões diretas da nitrificação e desnitrificação em ETEs podem ser consideradas como uma fonte minoritária. Essas emissões são muito menores que aquelas vindas dos efluentes lançados em corpos d'água e podem ser apenas do interesse de países que tem predominantemente avançadas estações de tratamento de esgoto centrado em etapas de nitrificação e desnitrificação (IPCC, 2006b). Compostos que

contêm nitrogênio são encontrados em resíduos e esgoto devido à presença de excrementos humanos e outros constituintes que possuem nitrogênio (ex., efluentes da disposição de lixo, banheiros, e resíduos industriais). A porção de N_2O emitida que se origina dessas fontes é geralmente pequena na categoria fonte de Tratamento de Esgoto e é baseada na ingestão média de proteínas e suposições sobre a co-disposição de N que não foi consumido (USEPA, 2010).

Nesse sentido, o IPCC (em IPCC, 2006b) assume que a maior emissão do nitrogênio no setor de esgoto ocorre pela nitrificação e desnitrificação em estuários e rios, ou seja, considera que em geral não há remoção de nitrogênio durante o tratamento em si. Todavia, para países com ETEs centralizadas e avançadas, há métodos definidos para estimativa das emissões diretas. Essas emissões de N_2O estão associadas a vários processos nas plantas de tratamento e os fluxos de emissão são extremamente variáveis e dependem de muitos parâmetros operacionais e condições ambientais (IPCC, 2001). O Brasil possui o foco do tratamento em processos secundários, tendo poucos casos nos quais se alcança o nível terciário (remoção de nutrientes). Além disso, trata-se de um país que ainda tem baixa cobertura de tratamento de esgotos e no qual grande parte dos efluentes é lançada em corpos d'água.

Kampschreur et al. (2009) mostra em seu estudo que várias experiências em escala de laboratório e em larga escala têm indicado que o N_2O pode ser produzido em quantidades substanciais durante a remoção de nitrogênio em ETEs. Entretanto, trata-se de uma área que ainda necessita de mais pesquisas.

3.1.5 Potencial de Aquecimento Global e Potencial de Temperatura Global

De acordo com Moraes (2008), o conceito de Potencial de Aquecimento Global - PAG (ou *Global Warming Potencial* – GWP) foi desenvolvido para comparar a capacidade de cada gás enquanto GEE, ou seja, trata-se de uma medida de como determinada quantidade de GEE contribui para o aquecimento global. Para tanto, o dióxido de carbono foi escolhido como o gás de referência. Assim, as estimativas de GEE podem, com base no PAG, ser apresentadas em termos de CO_2 equivalente (CO_2e).

Deste modo, conforme Paiva (2008), a escala de GWP é relativa e compara o gás em questão com a quantidade equivalente de dióxido de carbono (cujo potencial é definido como unitário – 1 CO_2e). Nessa escala, o metano possui um potencial de aquecimento 21 vezes

maior do que o dióxido de carbono e, o óxido nitroso, um PAG 310 vezes superior ao CO₂. A Tabela 1 exibe esses valores e o GWP de outros GEE.

Tabela 1 - Gases de efeito estufa e potenciais de aquecimento.

GEE	Fórmula química	Vida na atmosfera (anos)	Potencial de Aquecimento Global – (para 100 anos)
Dióxido de carbono	CO ₂	50 a 200	1
Metano	CH ₄	12	21
Óxido Nitroso	N ₂ O	114	310
Clorofluorcarbonos	CFCs	45 a 1700	3800 a 8100
Hidrofluorcarbonos	HFCs	1,4 a 270	140 a 11700
PFCs	PFCs	1000 a 50000	6500 a 9200
Hexafluoreto de Enxofre	SF ₆	3200	23900

Fonte - IPCC, 2007.

É importante destacar que o PAG é calculado sobre um intervalo de tempo específico: o tempo de vida médio de permanência do gás na atmosfera. O PAG compara a força radioativa de uma tonelada de um determinado GEE sobre um período de tempo adotado (por exemplo 100 anos) para uma tonelada de CO₂. Para a construção da escala padrão foi, então, fixado o tempo em 100 anos, mas na realidade ele é variável como visto na Tabela 1 (IPCC, 2007).

Existe uma alternativa a aplicação do GWP: o Potencial de Temperatura Global – GTP. Este mede a variação da temperatura média da superfície global em um determinado horizonte de tempo, provocada pela emissão de uma massa de GEE em relação à emissão de uma massa equivalente de CO₂ (IPCC, 2007). Por se relacionar diretamente às temperaturas na superfície, a métrica GTP tem vantagem sobre o GWP. Os valores de GTP são apresentados na Tabela 2 comparados aos valores geralmente adotados em GWP.

Tabela 2 - GTP E GWP.

Gás	GTP-100anos	GWP-100anos
CO₂	1	1
CH₄	5	21
N₂O	270	310
CF₄	10052	6500
C₂F₆	22468	9200
SF₆	40935	23900
HFC-125	1113	2800
HFC-134a	55	1300
HFC-143a	4288	3800
CFC-11	-	4750
CFC-113	-	6130
CFC-12	-	10900
HCFC-22	-	1810
HCFC-141b	-	725

Fonte - IPCC, 2007.

Apesar da diferença entre o GTP e o GWP, o IPCC não invalida o conceito de GWP ou sugere a troca de um parâmetro pelo outro. Nesse sentido, esse estudo adota a medida GWP por ser condizente com a referência do IPCC e com a maioria dos trabalhos encontrados.

3.2 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO

O Protocolo de Quioto criou três mecanismos para reduzir as emissões de GEE. Um deles se refere diretamente aos países em desenvolvimento: o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Por meio dele, cada tonelada de carbono que deixe de ser emitida em um país em desenvolvimento (Parte não listada no Anexo B) pela adoção de novas tecnologias, poderá ser negociada com os países industrializados (integrantes do Anexo B) e usada como forma de cumprirem suas metas de redução de emissões, determinadas em Quioto (BRASIL, 1997). O MDL foi criado com o objetivo de fomentar o desenvolvimento sustentável mediante transferência de tecnologia e incentivo a um novo padrão de desenvolvimento com base na conciliação entre crescimento econômico, inclusão social e respeito ao meio ambiente.

O objetivo do MDL, como definido no Artigo 12 do Protocolo de Quioto (BRASIL, 1997), é assistir: (i) às Partes não-Anexo B para que contribuam com o objetivo final da Convenção – ou seja, alcançar a estabilização das concentrações de GEE na atmosfera num

nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático – e para que atinjam o desenvolvimento sustentável por meio da implementação de atividades de projeto; e (ii) às Partes Anexo B para que cumpram suas obrigações quantificadas de limitação e reduções de emissões.

Sob essa perspectiva, as atividades de projeto do MDL oferecem muitas oportunidades para vários agentes, especialmente por envolver países em desenvolvimento como o Brasil. Podem participar de uma atividade de projeto de MDL entidades públicas, privadas e parcerias público-privadas das Partes Anexo B e das Partes não-Anexo B, desde que devidamente autorizadas pelos respectivos países (FGV, 2002).

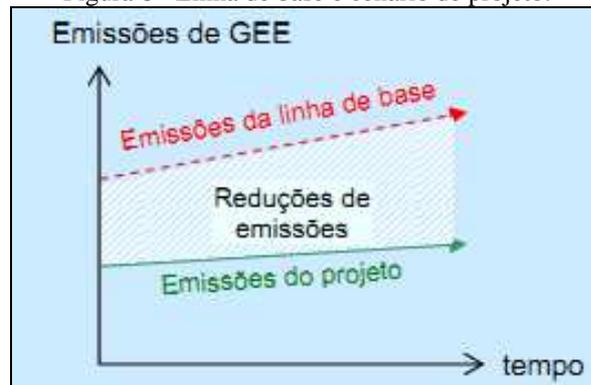
Nesse sentido, para ser elegível como projeto de MDL, conforme o protocolo, uma atividade tem que cumprir alguns critérios:

- (a) Participação voluntária aprovada por cada parte envolvida;
- (b) Benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo relacionados com a mitigação da mudança do clima, e
- (c) Reduções de emissões que sejam adicionais as que ocorreriam na ausência da atividade certificada de projeto.

Para entendimento desta última condição, dois conceitos são fundamentais: Linha de base e Adicionalidade. A linha de base (LB ou *Baseline*) de uma atividade de projeto é o cenário que representa, de forma razoável, as emissões antrópicas de GEE por fontes que ocorreriam na ausência da atividade de projeto proposta. A linha de base é qualificada e quantificada com base em um Cenário de Referência. Este cenário hipotético é comparado com o cenário do projeto (ou CP) de MDL para avaliação da redução de emissões ou remoções de GEE (BRASIL, 2009a).

Portanto, com relação à adicionalidade, considera-se que uma atividade de projeto MDL é adicional se as emissões antrópicas de GEE por fontes são reduzidas a níveis inferiores aos que teriam ocorrido na ausência da atividade de projeto de MDL registrada (REIS, 2009) como pode ser visto na Figura 6. De acordo com o MCT (BRASIL, 2009a), isso significa que um projeto proposto só é adicional se sua implantação estiver vinculada necessariamente ao registro como uma atividade de MDL, ou seja, ao fato de que a atividade de projeto não seria executada sem a expectativa dos seus créditos de carbono (recursos financeiros extras).

Figura 6 - Linha de base e cenário de projeto.



Fonte - BRASIL, 2009b.

Pela Figura 6 é possível compreender que a implantação do projeto diminui o volume de emissões ao longo do tempo em relação ao cenário das emissões da linha de base. É esta diferença ou redução das emissões que pode gerar créditos de carbono segundo procedimentos definidos que serão descritos na próxima seção.

Para efeitos do MDL, basicamente duas grandes categorias de projetos podem ser desenvolvidas como projeto: a) projetos que reduzem as emissões; e b) projetos que resgatam emissões na forma de sumidouros e de estocagem dos GEE retirados da atmosfera. Além disso, as atividades de projeto devem estar relacionadas a determinados tipos de GEE e às fontes responsáveis pela maior parte das emissões, conforme previsto no Anexo A do Protocolo de Quioto. Dentro do escopo desta pesquisa, o setor de Tratamento de Esgoto (doméstico e industrial) enquadra-se nos projetos de redução de emissões, dentro do segmento dos Resíduos, cujos gases mais relevantes são CH_4 e N_2O . Apesar de tipicamente as emissões de metano relativas ao manejo de resíduos sólidos serem as campeãs do setor de Resíduos, a contribuição do tratamento e disposição de esgoto pode ser importante (IPCC, 2006b).

3.2.1 Escalas e Metodologias de Projeto de MDL

Os projetos podem ser de Larga ou de Pequena Escala. Larga ou grande escala (*Large Scale*) é a modalidade convencional de atividade de projeto no âmbito do MDL. Para ser classificado como atividade de pequena escala (*Small Scale*), estes projetos devem se enquadrar segundo Brasil (2009a) em três tipos (1, 2 e 3). As atividades que não contemplam um dos três critérios a seguir pertencem à categoria de larga escala.

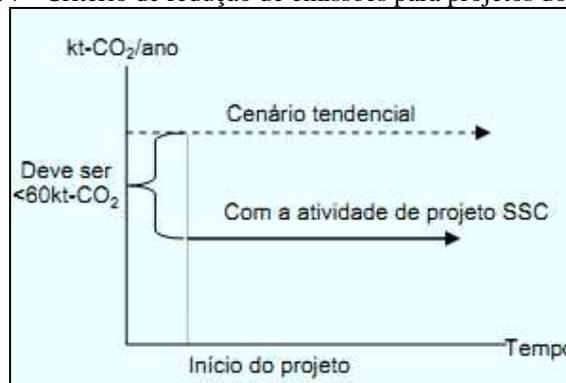
1. Atividades de projeto de energia renovável que tenham uma capacidade máxima de geração equivalente de 15 MW (megawatt ou equivalente apropriado).

2. Atividades de projetos de melhoria da eficiência energética que reduzam o consumo de energia, no lado da oferta e/ou da demanda, em um valor igual ou inferior a 60 GWh (gigawatt-hora) por ano (ou equivalente apropriado).

3. Outras atividades de projetos limitadas àquelas que resultem em reduções de emissões iguais ou inferiores a 60 kt (quilotoneladas) de CO₂ equivalente por ano.

Os projetos relacionados ao tratamento de esgoto geralmente encontram-se no Tipo 3, cujos limites estão ilustrados na Figura 7.

Figura 7 - Critério de redução de emissões para projetos do Tipo 3.



Fonte - BRASIL, 2009b.

Os procedimentos para elaboração de projetos de tratamento de esgoto se encontram no escopo setorial 13 - Tratamento e disposição de resíduos (da CQNUMC). As metodologias de linha de base e monitoramento aprovadas e disponíveis para projetos de disposição e tratamento de efluentes estão no Quadro 2.

Quadro 2 - Metodologias de linha de base e monitoramento para projetos do setor de tratamento de esgoto.

Escala	Metodologia	Título/Descrição
Grande	AM 0013	Emissões evitadas de metano no tratamento de águas residuárias orgânicas
	AM 0014	Mitigação da emissão de Gases estufa pelo tratamento de efluentes industriais
	AM 0039	Redução de emissões de metano provenientes de águas residuárias orgânicas e resíduos sólidos bioorgânicos com uso de compostagem
Pequena	AMS III.H	Recuperação de Metano no Tratamento de águas residuárias
	AMS III.I	Produção de metano, no tratamento de águas residuárias, evitada por meio da substituição de sistemas anaeróbios por sistemas aeróbios

Fonte - BRASIL, 2006a.

*AM=Approved Methodology (para Larga escala - Large Scale)

** AMS=Approved Methodology Small Scale

Apesar de existirem metodologias do IPCC destinadas a projetos de larga escala para o tratamento de efluentes líquidos, este grupo, no setor de tratamento de esgoto, têm tido menor aplicação, pois exigem grandes quantias de redução de emissões. Isto porque, as ETEs (Estações de Tratamento de Esgoto), são em sua maioria de tamanhos reduzidos (plantas municipais) e não produzem o suficiente para atender a quota de redução demandada por essa metodologia (condições anteriores).

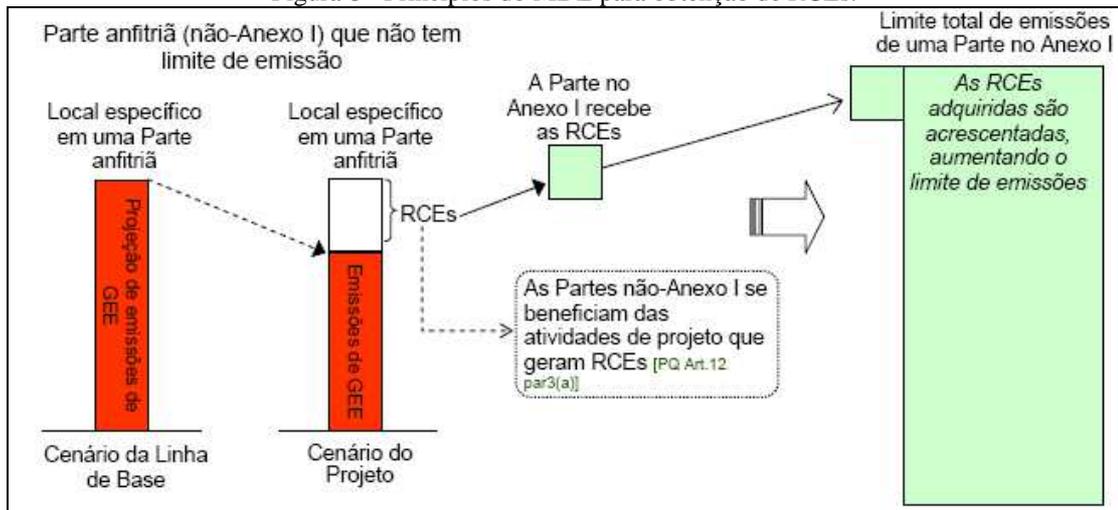
É importante destacar que essas são metodologias já aprovadas pela CQNUMC, mas existe a possibilidade de um proponente do projeto criar outros procedimentos e submeter à análise e aprovação diante de algumas etapas de avaliação (descritas na seção 3.3.2).

O primeiro período de compromisso do Protocolo é vigente de 2008 a 2012, todavia, nas negociações em curso, as Partes do Protocolo têm demonstrado interesse na sua continuidade após esta data, especificamente no que se refere ao segundo período de compromisso.

3.3 CRÉDITOS DE CARBONO

As quantidades relativas a reduções de emissão de gases de efeito estufa e/ou remoções de CO₂ atribuídas a uma atividade de projeto resultam em Reduções Certificadas de Emissão (RCEs ou *Certified Emission Reductions* - CERs), medidas em tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente - tCO₂e. Dessa forma, as RCEs são calculadas pela diferença entre emissões da linha de base e emissões verificadas em decorrência das atividades de projeto do MDL, incluindo as fugas. Uma unidade de RCE corresponde a uma tonelada métrica de dióxido de carbono equivalente, calculada de acordo com o Potencial de Aquecimento Global, índice divulgado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática – IPCC e utilizado para uniformizar as quantidades dos diversos gases estufa em termos de CO₂e, possibilitando sua soma (BRASIL, 1997). Todo esse mecanismo para a obtenção de RCEs é exibido na Figura 8 a seguir.

Figura 8 - Princípios do MDL para obtenção de RCEs.



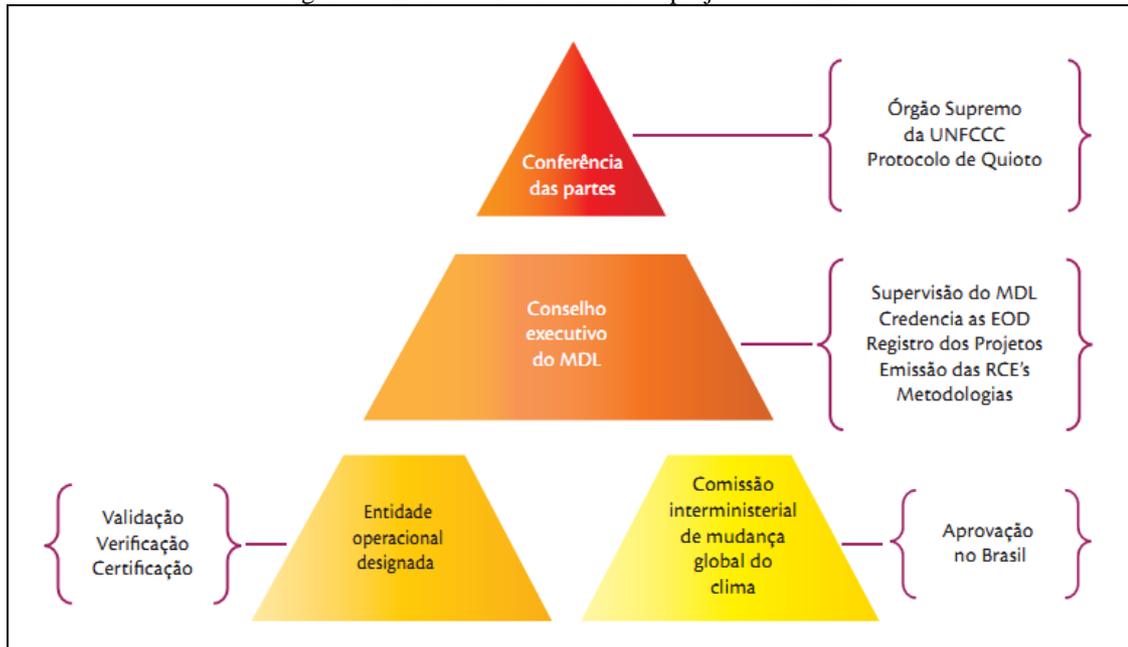
As RCEs podem ser utilizadas pelas Partes do Anexo B que tenham ratificado o Protocolo de Quioto como parte do cumprimento de suas obrigações quantificadas de redução ou limitação de emissões de GEE. Assim, o MDL permite que uma Parte com metas no âmbito do Protocolo cumpra parte delas a um custo mais baixo e, ao mesmo tempo, invista em Partes não-Anexo B, contribuindo para o desenvolvimento sustentável desses países (BRASIL, 2009a).

A redução certificada de emissão é o denominado crédito do MDL, que é comercializável, ou seja, uma RCE é um crédito de carbono. É importante destacar que o instrumento de Implementação Conjunta do Protocolo de Quioto também pode gerar créditos, de maneira que este tem seus procedimentos para obtenção do certificado específico, a unidade de redução de emissão (URE). O Art. 17 do Protocolo afirma que as Partes incluídas no Anexo B (países com quotas de redução) podem participar do Comércio de Emissões, e utilizar esses créditos (do MDL e da IC) com o objetivo de cumprir os compromissos assumidos de forma complementar as ações domésticas.

3.3.1 Estrutura institucional do MDL

Para a regulamentação, verificação e o efetivo funcionamento do MDL, há uma série de organismos engajados, cuja hierarquia está ilustrada na Figura 9.

Figura 9 - Estrutura Institucional de projetos de MDL.



Fonte - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2010.

A COP/MOP ou Conferência das Partes na qualidade de reunião das Partes do Protocolo de Quioto é o órgão máximo de decisão do MDL, cuja função é regulamentar e fiscalizar a implementação do Protocolo de Quioto. As suas principais atribuições são: decidir a respeito das recomendações relativas às regras do MDL feitas pelo Conselho Executivo; decidir sobre a designação das Entidades Operacionais Designadas (EODs) credenciadas provisoriamente pelo Conselho Executivo; analisar e revisar os relatórios anuais do Conselho Executivo; revisar a distribuição regional e sub-regional das EODs e das atividades de projeto; e auxiliar na obtenção de fundos para atividades de projeto do MDL (BRASIL, 2009a).

O Conselho Executivo deve supervisionar o funcionamento do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo sob a autoridade e a orientação da COP/MOP. Esta instituição deve ser constituída por representantes das Partes, conforme a proporção definida previamente pela Convenção, e ter capacidade técnica para analisar os projetos (BRASIL, 2009a). Dentre suas responsabilidades pode-se citar: o credenciamento das Entidades Operacionais Designadas; o registro das atividades de projeto do MDL; a emissão das RCEs; o desenvolvimento e operação do Registro do MDL; o estabelecimento e aperfeiçoamento de metodologias para definição da linha de base, monitoramento e fugas; a revisão das disposições sobre as modalidades simplificadas, procedimentos e definições de atividades de projeto de pequena

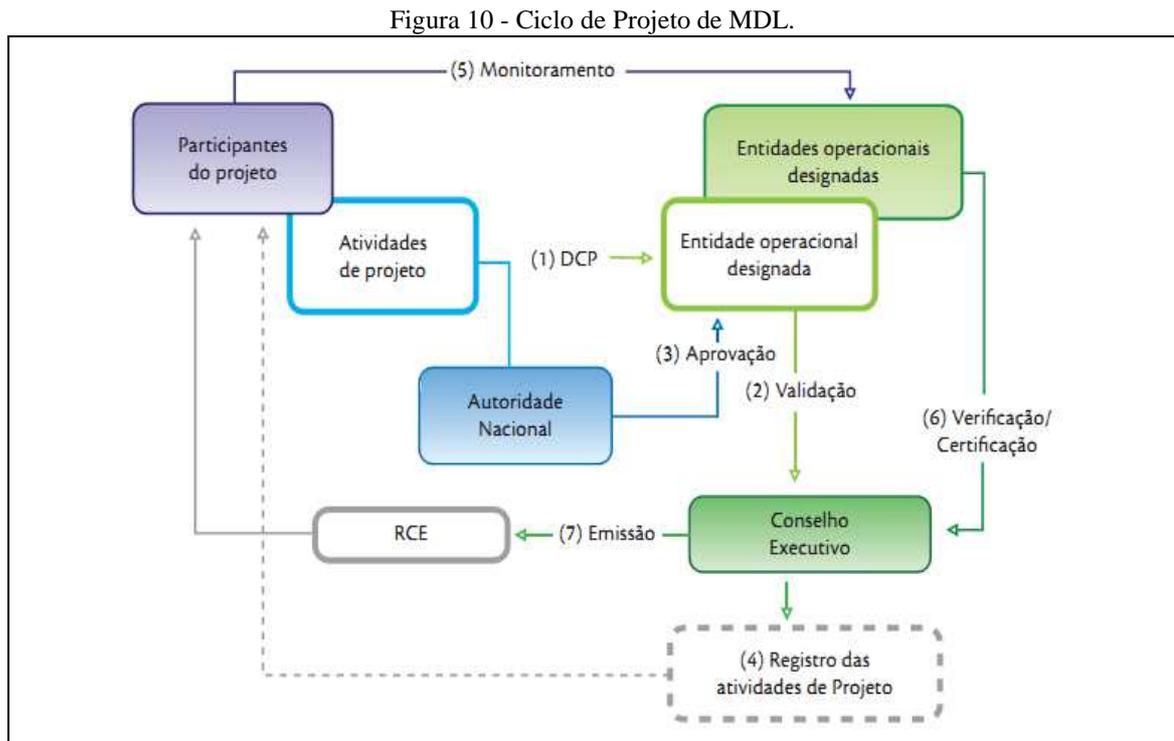
escala (SSC) e, se necessário, fazer recomendações apropriadas à COP/MOP; a disponibilização ao público relatórios técnicos para sugestões (FGV, 2002).

As Entidades Operacionais Designadas são órgãos nacionais ou internacionais credenciados pelo Conselho Executivo e designadas pela COP/MOP, que ratifica ou não o credenciamento feito inicialmente pelo Conselho Executivo. As EODs tratam de: validar atividades de projetos de MDL; verificar e certificar reduções de emissões de gases estufa e/ou remoções de CO₂; manter uma lista pública de atividades de projetos do MDL; enviar um relatório anual ao Conselho Executivo; manter disponíveis para a sociedade as informações a respeito das atividades de projeto do MDL, que não sejam consideradas confidenciais pelos participantes do projeto (FGV, 2002). É importante destacar que nas atividades de projeto de grande escala, cada uma dessas etapas é realizada por uma EOD diferente. Já nos projetos de pequena escala, uma mesma EOD poderá acumular ambas as etapas (BRASIL, 2009a).

A Autoridade Nacional deve ser designada pelos governos dos países participantes de uma atividade de projeto do MDL junto à CQNUMC. A Autoridade Nacional Designada (AND) verifica se a participação dos países é voluntária e, no caso do país onde são implementadas as atividades de projeto, que essas atividades contribuem para o desenvolvimento sustentável do país. São as ANDs que aprovam as atividades de projeto do MDL, que é concedida por meio da emissão de uma Carta de Aprovação (LoA, do inglês *letter of approval*) (BRASIL, 2009a). A Autoridade Nacional Designada no Brasil é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima – CIMGC, que além de aprovar projetos deve definir critérios adicionais de elegibilidade àqueles considerados na regulamentação de Quioto. A CIMGC é presidida pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e vice-presidida pelo Ministério do Meio Ambiente. É constituída ainda por representantes de vários Ministérios: Relações Exteriores; Agricultura; Pecuária e Abastecimento; Transportes; Minas e Energia; Planejamento, Orçamento e Gestão; Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior e Casa Civil da Presidência da República. A secretaria executiva da Comissão é desempenhada pelo Ministério da Ciência e Tecnologia e há representantes de todos os setores de atividades descritos no Anexo A do Protocolo de Quioto (FGV, 2002).

3.3.2 Obtenção de Créditos de Carbono

Conforme relatório divulgado pelo CGEE (2010), para que um projeto de MDL resulte em RCEs, suas atividades devem ainda, necessariamente, passar pelas etapas do ciclo do projeto ilustradas na Figura 10 e descritas em seguida.



Fonte - CGEE, 2010.

1. Elaboração de documento de concepção de projeto (DCP). Este procedimento deve ser realizado conforme a metodologia de linha de base e plano de monitoramento aprovados. Como visto, existem metodologias já aprovadas para uso, mas existe a possibilidade da aprovação de novas. O DCP apresenta informações sobre aspectos técnicos e organizacionais fundamentais da atividade de projeto, sobre as atividades do projeto, a metodologia de linha de base e a metodologia de monitoramento aprovadas aplicadas ao projeto.

2. Validação. Nesta etapa é examinada a conformidade do projeto em relação à regulamentação do Protocolo de Quioto. Trata-se do processo de avaliação independente da atividade de projeto com relação aos requisitos do MDL, tendo por base o DCP. Há um procedimento formal e a validação é realizada pela Entidade Operacional Designada.

3. Aprovação pela Autoridade Nacional Designada – AND. No caso do Brasil a AND é a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima, segundo critérios definidos pela COP e em caráter complementar, condições próprias.

4. Submissão ao Conselho Executivo para registro. O Registro é a aceitação formal de um projeto validado como uma atividade de projeto do MDL. Ele é feito pelo Conselho Executivo do MDL. Há um procedimento formal de solicitação do registro. Caso ocorram mudanças no projeto registrado, os participantes podem notificá-las e solicitar a aprovação delas.

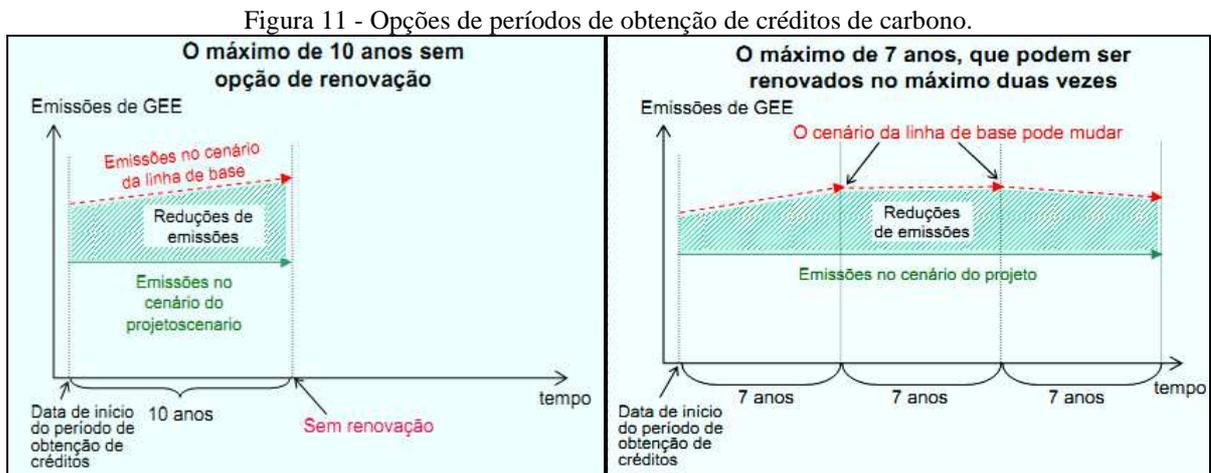
5. Monitoramento. Os participantes do projeto coletam e arquivam os dados relevantes necessários para os cálculos de reduções de GEE geradas por uma atividade de projeto do MDL, de acordo com o plano de monitoramento descrito no DCP.

6. Verificação/Certificação. Trata-se da revisão periódica independente e a determinação *ex-post* das reduções monitoradas de emissões de GEE feita por procedimento formal. É realizada por uma Entidade Nacional Designada. A certificação, feita pela EOD, é a garantia dada por escrito de que a atividade do projeto alcançou as reduções de emissões conforme verificado.

7. Emissão de unidades segundo o acordo de projeto. O Conselho Executivo emitirá RCEs equivalentes ao volume verificado de reduções. A emissão de RCEs- conforme o acordo de distribuição- será efetuada após o recebimento da parte dos recursos destinada a cobrir as despesas administrativas do MDL. Das RCEs emitidas, 2% serão deduzidas como parte dos recursos para auxiliar as Partes em desenvolvimento, particularmente vulneráveis aos efeitos adversos das mudanças climáticas, a cobrirem os custos de adaptação. A partir daí as RCEs serão distribuídas entre os participantes. A decisão a respeito da distribuição das RCEs de uma atividade de projeto deve ser tomada exclusivamente pelos participantes (CGEE, 2010).

A concepção e estrutura do MDL foram originalmente desenvolvidas para projetos de grande porte, todavia buscou-se simplificar os procedimentos para viabilizar projetos de pequena escala, sem comprometer a integridade do Protocolo (BRASIL, 2009a). Nesse sentido, foram elaborados pelo denominado Conselho Executivo do MDL, procedimentos e modalidades simplificados aplicáveis a projetos de Pequena Escala. Assim, os projetos de pequena escala são submetidos a processos compatíveis com seu tamanho, prazos e custos e, passam por um ciclo mais ágil.

As RCEs são emitidas para um determinado momento, escolhido pelos países participantes, o denominado período de obtenção de créditos (Figura 11), que tem início após a data de registro da atividade de projeto do MDL.



Fonte - BRASIL, 2009b.

Há como visto, dois cenários para o período de obtenção de créditos. O primeiro é para o prazo máximo de sete anos (Figura 11, à direita), passíveis de renovação por mais duas vezes, totalizando 21 anos. Nesse caso e para cada renovação, uma EOD determina e informa o Conselho Executivo se a linha de base permaneceu ou foi atualizada. A segunda opção é de no máximo de dez anos, sem opção de renovação (Figura 11, à esquerda).

3.3.3 Mercado de Carbono

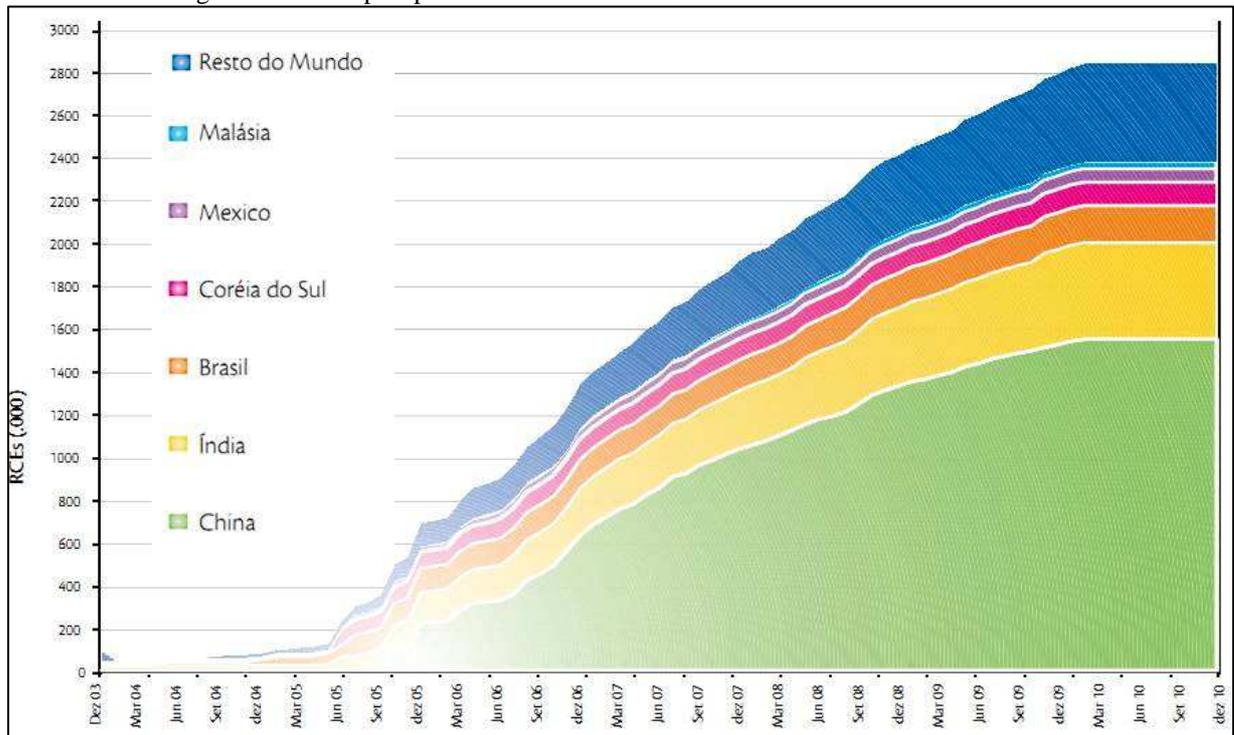
Os três mecanismos criados em Quioto induziram a formação de um novo mercado ambiental: o mercado de carbono. Ele foi formado a fim de contribuir para a estabilização das concentrações de gases estufa na atmosfera num nível que impeça uma interferência antrópica perigosa no sistema climático, o que é objetivo da CQNUMC.

Como cada mecanismo emite um tipo específico de certificado, todos referentes à redução de uma tonelada de dióxido de carbono equivalente (tCO_2e), eles apresentam preços de mercado diferentes, dentre eles o Mercado de Quioto. Com a entrada em vigor do Protocolo, em 16 de fevereiro de 2005, esse mercado (Quioto) tem evoluído e aumentado os volumes e os valores negociados. Além do mercado de Quioto, surgiram outros mercados mandatórios, cada um com regime próprio de metas e regulamentação, dentre eles: *Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI)*, *Western Climate Initiative (WCI)*, *New South Wales*

Greenhouse Gas Abatement Scheme (NSW GGA S). Hoje tem destaque na área o de Quioto e o *European Union Emissions Trading Scheme* (EU ETS), onde são comercializadas as permissões para emissão entre os países da União Européia (CGEE, 2010).

De acordo com CGEE (2010), poucos países dominam as ofertas de projetos e RCEs, sendo eles: China (55%), Índia (16%), Brasil (6%), Coreia do Sul (4%), México (2%) e Malásia (1%), como pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Principais países ofertantes de RCEs no mercado de carbono até 2010.



Fonte - CGEE, 2010.

A predominância dos projetos e das RCEs em um grupo pequeno de países, bem como a participação relativa de cada país nesse grupo pode ser explicada devido a(o):

(1) Ambiente político-institucional adequado: os países precisam definir e garantir o funcionamento eficiente de órgãos responsáveis pela aprovação dos projetos; o governo e/ou a iniciativa privada precisam investir na elaboração de projetos;

(2) Capacidade técnica e econômica local em desenvolver projetos unilaterais: poucos têm sido os projetos de MDL oriundos da iniciativa de países desenvolvidos, que têm se limitado a adquirir RCEs de projetos implementados pelos próprios países em desenvolvimento;

(3) Características dos projetos: países que possuem projetos que reduzem as emissões de GEE com elevado potencial de aquecimento global, como HFC, geram muito mais RCEs que os que não usam esses gases;

(4) Características das matrizes energéticas dos países: países costumam fazer uso de combustíveis fósseis (China e Índia - carvão mineral) têm vantagem em relação aos países que utilizam fontes renováveis (Brasil – hidroelétrica) (CGEE, 2010)

No mercado de carbono de Quioto, a demanda por RCE (créditos do MDL) depende do aumento das emissões de GEE (em relação a 1990) nos países Anexo B, das metas de redução de cada país, do custo das reduções domésticas e das estratégias adotadas em cada país para o cumprimento das metas. O Protocolo de Quioto estabeleceu que os mecanismos de flexibilização devem ser utilizados de forma complementar às ações domésticas. Já no mercado não-Quioto (voluntário), a demanda por projetos de mitigação das emissões de GEE depende das características do programa adotado (CGEE, 2010).

Nesse sentido, uma ferramenta útil para aumentar a credibilidade dos projetos de carbono é a norma ISO 14064 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 2007), constituída das seguintes partes:

Parte 1: Especificações com orientações no nível organizacional para quantificação e divulgação de emissões e remoções de GEE;

Parte 2: Especificações com orientações no nível de projeto para quantificação, monitoramento e divulgação de reduções de emissões e remoções de GEE;

Parte 3: Especificações com orientações para a validação e verificação de GEE.

O mercado de carbono (Quioto e não-Quioto) é uma realidade que tende a crescer, porque os instrumentos de mercado permitem reduzir os custos do abatimento das emissões (maior eficiência econômica).

De acordo com CGEE (2010), as atividades de projetos de MDL podem ainda ser melhoradas no que se refere ao processo de aprovação e registro de projetos; ao processo de submissão de novas metodologias de linha de base e de monitoramento; às metodologias aprovadas e ao processo de verificação e certificação. Apesar de deficiências existirem, o CGEE aponta que os projetos em andamento demonstram vários elementos funcionando de modo satisfatório; portanto, há necessidade de aperfeiçoar o MDL, e não eliminá-lo.

3.4 TRATAMENTO DE ESGOTO

Os esgotos podem ser de fontes domésticas, comerciais ou industriais e podem receber tratamento on-site (sem coleta), numa planta central (coletado) ou depositado bruto nas proximidades ou ainda serem transportados por tubulações despejo para outros locais (corpos d'água) (IPCC, 2006b).

O sistema de tratamento e disposição de esgoto aplicado depende das características do efluente bruto, assim como da população a ser atendida (no caso do esgoto municipal), do corpo d'água (estudo de autodepuração e os limites definidos pela legislação ambiental) e dos recursos disponíveis. De maneira geral e simplificada, as soluções buscam a redução do conteúdo orgânico dos resíduos, isto é, a diminuição de seu conteúdo de carbono orgânico degradável para torná-lo inerte. Há inúmeros sistemas para o tratamento, que podem agir individualmente ou de modo combinado (em associações). Metcalf e Eddy (2003) citam que alguns critérios relevantes nessa seleção são: eficiência/aplicabilidade, confiabilidade, disposição do lodo, requisitos de área, impactos ambientais, custos de operação, custos de implantação, sustentabilidade e simplicidade.

O esgoto sanitário é constituído basicamente por matéria orgânica, principalmente de proteínas, carboidratos e lipídeos. No que se refere à composição do esgoto urbano (ou sanitário) em termos de águas de contribuição à ETE, esta é caracterizada por três fontes distintas (VON SPERLING, 2005):

- o esgoto doméstico (incluindo residências, instituições e comércio);
- as águas de infiltração e
- os despejos industriais (diversas origens e tipos de indústrias).

De acordo com Von Sperling (2005), no Brasil adota-se predominantemente o sistema separador de esgoto sanitário, que faz uso de linhas de drenagem independentes para separar as águas pluviais e assim, não contribuem à ETE. Há também o sistema combinado, no qual o esgoto e as águas pluviais são veiculados conjuntamente (pelo mesmo sistema). Neste caso, o dimensionamento da ETE deve levar em consideração a parcela correspondente às águas pluviais.

3.4.1 Fases do tratamento de esgoto

O tratamento centralizado do esgoto é classificado, conforme Von Sperling (1996), através dos seguintes níveis: preliminar, primário, secundário e terciário.

3.4.1.1 Tratamento preliminar

O tratamento preliminar objetiva apenas a remoção dos sólidos grosseiros (materiais de maiores dimensões e areia) por meio de mecanismos físicos. Este nível de tratamento é sujeito aos processos de separação dos sólidos mais grosseiros como a gradagem, que pode ser composto por grades grosseiras, grades finas e/ou peneiras rotativas, o desarenamento nas caixas de areia, o peneiramento e o desengorduramento nas chamadas caixas de gordura ou em pré-decantadores. Nesta fase, o esgoto será preparado para as fases de tratamento subsequentes, podendo ser sujeito a um pré-arejamento e a uma equalização tanto de caudais como de cargas poluentes (VON SPERLING, 1996).

3.4.1.2 Tratamento primário

O tratamento primário visa, por meio de processos de ação física, remover sólidos sedimentáveis e, em decorrência, parte da matéria orgânica. Apesar de o esgoto apresentar um aspecto ligeiramente mais razoável após a fase de pré-tratamento, ele possui ainda praticamente inalteradas as suas características poluidoras. Por isto, há a necessidade de novo tratamento. Nesta fase, a água é separada dos materiais poluentes por meio da sedimentação. Em alguns casos, a ação física pode ser auxiliada pela adição de agentes químicos (coagulantes e/ou floculantes) que possibilitam a obtenção de flocos de maiores dimensões do material poluente e assim mais facilmente decantáveis. Após o tratamento primário, o poluente que permanece na água é de reduzidas dimensões, normalmente colóides, devido à digestão do lodo, não sendo por isso passível de ser removida por processos exclusivamente físico-químicos (VON SPERLING, 1996). A remoção de poluentes é baixa: sólidos suspensos (50 - 80%), DBO e DQO (40 - 75%), nitrogênio (10 - 25%), fósforo (10 - 20%) e coliformes fecais (30 - 40%).

3.4.1.3 Tratamento secundário

No tratamento secundário predominam, conforme Von Sperling (1996), os mecanismos biológicos, e o objetivo é remover matéria orgânica carbonácea. O processo geralmente é biológico, no qual a matéria orgânica coloidal é consumida por microrganismos nos chamados reatores biológicos. Assim, podem ser empregados processos biológicos aeróbios (como lodos ativados, filtros biológicos aeróbios e lagoas aeradas), anaeróbios (como filtro anaeróbio, reator de manta de lodo ou RAFA e tanques sépticos) e anaeróbios/aeróbios (lagoas de estabilização, lagoas aeróbias e lagoas de sedimentação).

As eficiências de remoção de poluentes são maiores, atingindo valores elevados (satisfatórios) para alguns deles. Em média, verificam-se os seguintes valores de remoção: sólidos suspensos (80 - 95%), DBO e DQO (70 – 98 %), nitrogênio (30 – 50 %), fósforo (20 – 60 %) e coliformes fecais (60 - 99,9 %) (SALVADOR, 2010).

Os níveis de eficiência do tratamento secundário são suficientes para atingir os padrões legais de emissão de efluentes, mas quanto aos padrões de qualidade ambiental, depende do poluente considerado e da qualidade da água, da vazão e da classificação do corpo receptor. Geralmente, a remoção de nutrientes e principalmente de coliformes fecais é insuficiente, requerendo tratamento em grau terciário (SALVADOR, 2010).

3.4.1.4 Tratamento terciário

O tratamento terciário busca a remoção de poluentes específicos (tóxicos ou compostos não-biodegradáveis), ou ainda remoção complementar de poluentes não suficientemente removidos no tratamento secundário. A remoção de nutrientes e de organismos patogênicos pode ser considerada como integrante do tratamento secundário ou do tratamento terciário, dependendo do processo adotado (VON SPERLING, 1996).

O tratamento em grau terciário remove até 95 % de nitrogênio, até 99 % de fósforo e retira completamente (100 %) de coliformes fecais/patogênicos. Todavia, trata-se de um mecanismo bastante dispendioso e por isso, pouco utilizado no Brasil.

3.4.2 Processos biológicos de tratamento

Os processos biológicos, tanto aeróbios quanto anaeróbios, podem contribuir para a intensificação do efeito estufa devido ao metabolismo microbiano produzir, dentre outros elementos, alguns GEE.

Segundo Von Sperling (1996), o tratamento biológico de esgoto é uma imitação de processos que ocorrem normalmente na natureza, conhecidos como autodepuração. Portanto, o tratamento biológico de esgoto resume-se à atividade de microrganismos, principalmente bactérias, que se alimentam da matéria orgânica dos próprios resíduos.

Os processos biológicos de tratamento têm por princípio reproduzir, em volumes controlados, as reações bioquímicas de oxidação da matéria orgânica por microrganismos que ocorreriam naturalmente em corpos d'água receptores, antes do lançamento dos despejos nos mesmos. Todavia, por tratar-se de volumes de confinamento relativamente pequenos, estas transformações são realizadas mediante a concentração de microrganismos. Portanto, cada processo de tratamento é concebido visando à manutenção de uma biomassa ativa depuradora de poluentes orgânicos (VON SPERLING, 1996). Nesse processo metabólico, diversos produtos são gerados, dentre eles, os GEE.

Com relação à contribuição para o aquecimento global, a disposição e os processos de tratamento mais comumente utilizados no Brasil e que apresentam potencial para emissões de GEE de acordo com o Relatório da CETESB (SÃO PAULO, 2010) são:

- Sem rede coletora: tanque séptico e sumidouro, fossa seca, vala aberta, lançamento em cursos d'água sem coleta e
- Com rede coletora: lodo ativado/digestor anaeróbio, tanque séptico, reator anaeróbio, lagoas de estabilização (lagoa anaeróbia, lagoa facultativa, lagoa mista e lagoa de maturação), tanque séptico condominial, lançamento em cursos d'água com coleta.

Outros tipos de processos aeróbios incluem Lagoas Aeradas (uma variante do processo que se situa entre o de lodos ativados "sem recirculação de lodo" e o de lagoas de estabilização), e variantes do processo de lodos ativados, tais como Valos de Oxidação, depuração em alta carga etc.. Existem ainda, como no caso das lagoas de estabilização, associações (arranjos sequenciais) de processos de tratamento com o objetivo de melhorar a eficiência ou mesmo otimizar o funcionamento do sistema. No contexto brasileiro, as associações mais encontradas, segundo Salvador (2010), são: Tanque Séptico e Filtro

Anaeróbio, Lagoa Anaeróbia e Lagoa Facultativa, Lagoa Aerada de Mistura Completa e Lagoa Facultativa, Lagoa Aerada Mistura Completa e Lagoa de Sedimentação.

É importante destacar que todo o efluente produzido, tratado ou não, tem como destinação final um corpo d'água superficial ou subterrâneo (lençol freático). Nos ambientes aquáticos também há ação de microrganismos, ou seja, pode ocorrer geração de GEE.

3.4.3 Tratamento do lodo

A carga de DBO presente no lodo depende do tipo de tratamento de efluente pelo qual o lodo é produzido e também se o esgoto é industrial ou doméstico.

O lodo é produzido no tratamento primário, secundário e terciário. O lodo do tratamento primário é constituído pelos sólidos removidos do esgoto e não é contabilizado no setor de Resíduos (definido pelo IPCC e referenciado no Quadro 1). O lodo proveniente dos tratamentos secundário e terciário é resultado do crescimento biológico da biomassa. O tratamento de lodo inclui processos aeróbios e anaeróbios de digestão, condicionamento, centrifugação, compostagem e desidratação (SALVADOR, 2010).

O lodo gerado pelo tratamento de efluentes industriais e domésticos é abordado separadamente. Cada país pode adotar seu próprio procedimento: incorporar o lodo do esgoto doméstico no gerenciamento do resíduo municipal e o lodo industrial na gestão de resíduos industriais. Mas também pode considerar todo o lodo gerado na categoria industrial (IPCC, 2006b). Nesse sentido, as emissões de gases do tratamento do lodo devem ser contabilizadas de acordo com a categoria no qual está inserido em cada país para não serem estimadas duas vezes. Desta forma, a quantidade de DBO correspondente ao tratamento do lodo devido a disposição de resíduos sólidos, compostagem, incineração ou uso na agricultura tem que ser coerente com as parcelas das fontes definidas pelo IPCC (referenciados no Quadro 1).

3.5 ROTAS DE DECOMPOSIÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA

Como visto, o tratamento de esgoto consiste basicamente em degradar e remover a matéria orgânica através da transformação de substâncias complexas em produtos mais simples. Essa decomposição pode ocorrer por meio de três rotas: aeróbia, anóxica e anaeróbia. Conforme Von Sperling (1996) há organismos adaptados funcionalmente para diversas

condições metabólicas, distinguindo-se alguns de fundamental importância no tratamento de esgoto:

- Organismos aeróbios estritos: utilizam apenas o oxigênio livre na sua respiração;
- Organismos facultativos: utilizam o oxigênio livre (preferencialmente) ou o nitrato como aceptores de elétron e
- Organismos anaeróbios estritos: utilizam o sulfato ou o dióxido de carbono como aceptores de elétron, não podendo obter energia através da respiração aeróbia.

De maneira geral, Metcalf e Eddy (2003) apontam como características do tratamento aeróbio: produção de efluentes que atendem ao padrão de lançamento exigido legalmente; possibilita a remoção de nutrientes; tempo considerado para a eficiência de projeto; consumo de energia elevado (aeração) e; produção considerável de lodo a ser estabilizado. Já os processos anaeróbios têm como principais aspectos: baixo consumo energético; menor produção de lodo; recuperação e utilização do biogás (combustível); bom funcionamento após longos períodos de interrupção; longo período de partida do sistema; sensibilidade às condições ambientais; necessidade de pós-tratamento para atingir os padrões legais e; emissão de maus odores.

É importante destacar que há maior liberação de energia nas reações aeróbias que nas reações anaeróbias, assim, os organismos aeróbios se reproduzem mais rapidamente e a estabilização aeróbia da matéria orgânica se processa a taxas mais rápidas que a anaeróbia. Por isso, a geração de lodo é maior nos processos aeróbios (VON SPERLING, 1986).

As principais reações para a geração de energia que ocorrem em condições aeróbias, anóxicas e anaeróbias são:

- Condições aeróbias:



- Condições anóxicas: redução de nitratos (desnitrificação)



- Condições anaeróbias: redução dos sulfatos (dessulfatação)



- Condições anaeróbias: redução de CO_2 (metanogênese hidrogenotrófica)

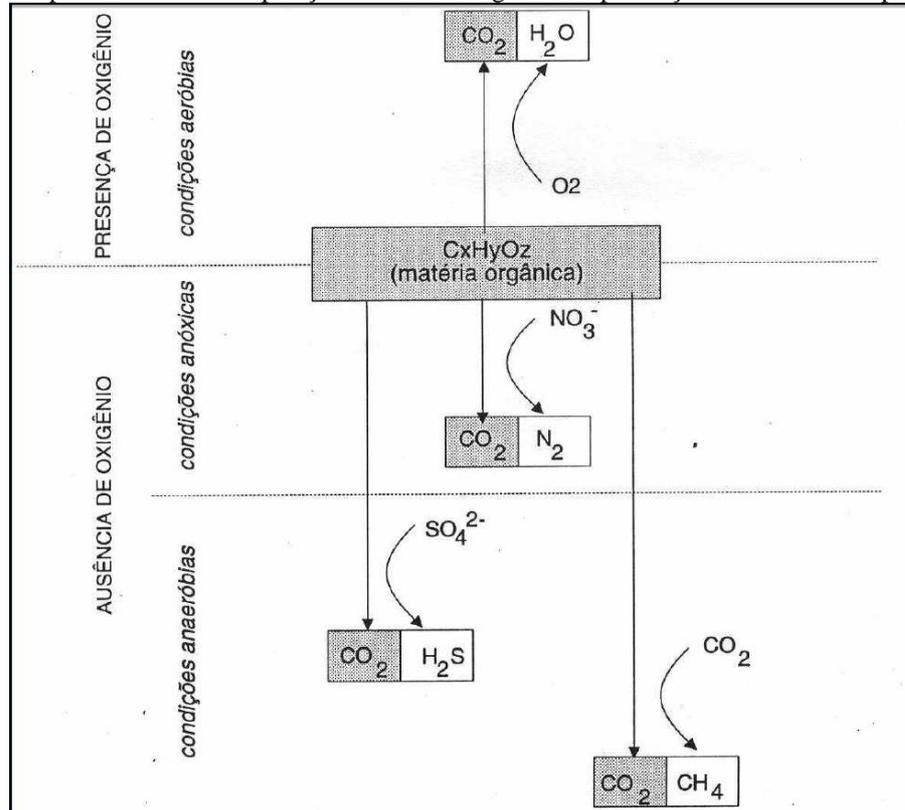


- Condições anaeróbias: (metanogênese acetotrófica)



A Figura 13 ilustra o mecanismo de degradação da matéria orgânica carbonácea e nitrogenada, bem como os aceptores de elétrons e as condições de disponibilidade de oxigênio envolvidas em cada transformação.

Figura 13 - Principais rotas de decomposição da matéria orgânica na presença de diferentes aceptores de elétron.

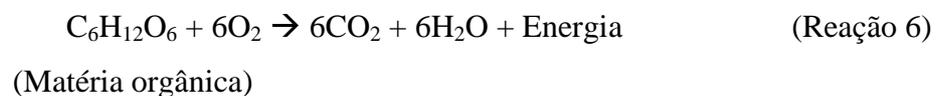


Fonte - Lubberding, 1995 apud em Von Sperling, 1996.

As próximas seções descrevem os processos exibidos na Figura 13 com base em Von Sperling (1996).

3.5.1 Condição aeróbia

O processo inicia-se com a hidrólise, na qual macro-moléculas sofrem quebra para transformar-se em compostos mais simples metabolizáveis pelos microrganismos. A conversão aeróbia em si é basicamente o processo de respiração, cuja reação é expressa por:



Esta reação é simplificada, sendo que na realidade ocorrem diversas etapas intermediárias. A composição da matéria orgânica é generalizada pela adoção da fórmula molecular da glicose como modelo representativo da fração carbonácea. Analisando-se a reação, observa-se que ocorre a estabilização da mesma (ou seja, a sua transformação para produtos inertes) por meio da utilização do oxigênio, resultando na produção de gás carbônico e água e, na liberação de energia (VON SPERLING, 1996).

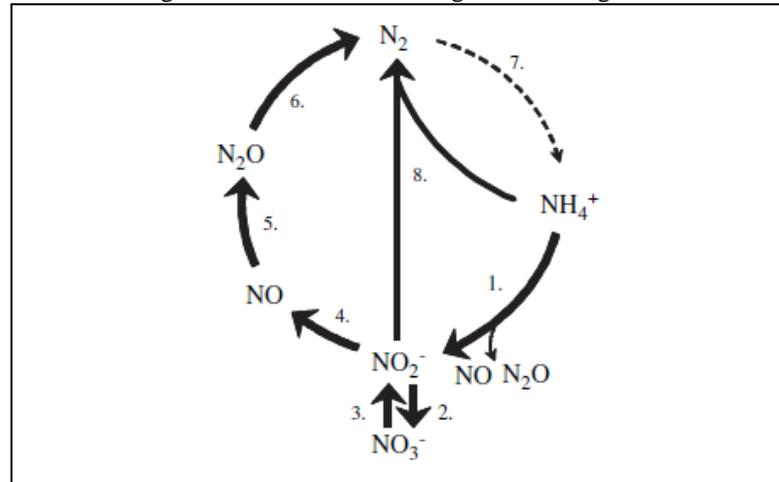
Como referido, a reação é genérica, foca apenas na oxidação da matéria orgânica carbonácea. Outros elementos como nitrogênio, fósforo e potássio frequentemente fazem parte da composição da matéria orgânica, a qual é mesmo assim passível de sofrer oxidações bioquímicas.

Nesse sentido, os principais agentes responsáveis pela estabilização aeróbia da matéria carbonácea contida nos esgoto são os organismos decompositores, representados em sua maioria por bactérias heterotróficas aeróbias e facultativas (METCALF; EDDY, 2003).

3.5.2 Condição anóxica

Metcalf e Eddy (2003) descrevem que em condições anóxicas ocorre principalmente a conversão da matéria nitrogenada, outro importante processo de oxidação no tratamento do esgoto. Nesse caso, a remoção do nitrogênio acontece por meio da desnitrificação (transformação do nitrato a nitrogênio gasoso). No esgoto o nitrogênio é encontrado sob a forma de amônia (NH_4) e o nitrato (NO_3) é obtido através da nitrificação (oxidação da amônia a nitrito (NO_2) e em seguida nitrato), cujo processo é aeróbio. Já a remoção do nitrogênio (sintetizada na Figura 14) se dá pela ocorrência de dois fenômenos sequenciais: nitrificação e desnitrificação.

Figura 14 - Conversões biológicas do nitrogênio.

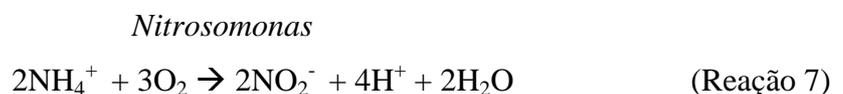


Fonte - Kampschreur et al., 2009.

Conforme pode ser visto na Figura 14, as conversões do nitrogênio ocorrem seguindo os processos: (1) Oxidação da amônia, (2) Oxidação aeróbia do nitrito, (3) Redução do nitrato para nitrito, (4) Redução do nitrito para óxido nítrico, (5) Redução do óxido nítrico para óxido nitroso, (6) Redução do óxido nitroso para gás nitrogênio, (7) Fixação do nitrogênio (não significativo em ETEs), (8) Oxidação do amônio com nitrito para gás nitrogênio. A nitrificação completa contempla as etapas 1 e 2, e a desnitrificação completa as etapas 3-6.

Os microrganismos envolvidos na nitrificação biológica são autótrofos e quimiossintetizantes (ou quimioautótrofos), para os quais o gás carbônico é a principal fonte de carbono. A energia, por sua vez, é obtida através da oxidação de um substrato inorgânico, como a amônia, a formas mineralizadas.

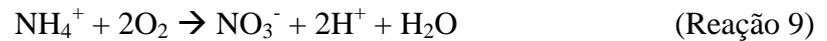
A transformação da amônia em nitritos é efetivada através de bactérias, como as do gênero *Nitrosomonas*, descrito em Metcalf e Eddy (2003) pela seguinte reação:



Já a oxidação dos nitritos a nitratos dá-se principalmente pela atuação de bactérias, como as do gênero *Nitrobacter*, sendo expressa por:

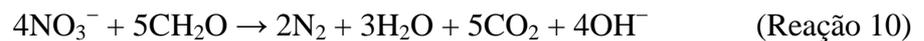


A reação global da nitrificação é a soma das anteriores:

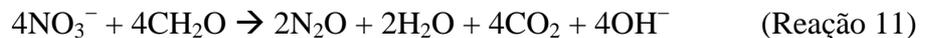


Percebe-se de todo este mecanismo de oxidação que o consumo de oxigênio livre (ou demanda nitrogenada) libera H^+ , e assim consome a alcalinidade e reduz o pH do meio.

Com relação à desnitrificação, esta é realizada por um grupo de microrganismos metabolicamente muito diversificado (principalmente heterótrofos e facultativos), que é menos sensível às variações ambientais do que os nitrificantes (Metcalf e Eddy, 2003). A redução completa do NO_3^- para o gás N_2 ocorre durante a desnitrificação, cuja reação global é exibida a seguir:



Entretanto, segundo Metcalf e Eddy (2003), esta conversão envolve várias etapas intermediárias mediadas microbiologicamente nas quais o NO_3^- é reduzido a nitrito (NO_2^-), óxido nítrico (NO) e também óxido nitroso (N_2O) como indicado a seguir:



Como o N_2O é um intermediário no processo, a desnitrificação incompleta pode levar, então, a emissão de N_2O .

Segundo IPCC (IPCC, 2006b), O óxido nitroso é resultante da deposição de nitrogênio emitido como NO_x e NH_3 . O N_2O é produzido por meio dos processos biológicos de nitrificação (oxidação aeróbia microbiológica da amônia para nitrato) e desnitrificação (redução anaeróbia microbiológica do nitrato para gás nitrogênio ou N_2). O óxido nitroso pode ser um produto intermediário de ambos os processos, mas é mais freqüentemente associada com desnitrificação (IPCC, 2006b). Um dos principais fatores de controle desta reação é a disponibilidade de nitrogênio inorgânico no ambiente e, portanto, a deposição de nitrogênio proveniente dos NO_x e de NH_3 intensifica as emissões. A emissão de N_2O também aumenta se o nitrogênio é disposto nos oceanos ou em lagos.

Percebe-se que o N_2O , um importante GEE, é produzido na maioria dos ambientes desnitrificantes. Mas, se as condições forem suficientemente redutoras, ele é reduzido para o

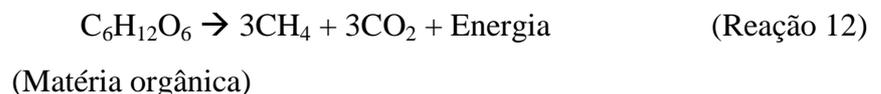
gás N₂ e não persiste (ELGOOD et al., 2010). Nesse sentido, os parâmetros operacionais determinantes na emissão de N₂O em ETEs, segundo Kampschreur et al. (2009), são: (i) baixa concentração de oxigênio dissolvido (OD) nas etapas de nitrificação e desnitrificação, (ii) aumento das concentrações de nitrito em ambas as etapas de nitrificação e desnitrificação e, (iii) baixa taxa de DQO/N na etapa de desnitrificação. Os autores afirmam ainda que a literatura não é clara sobre se de fato os microrganismos da nitrificação e desnitrificação são a principal fonte de emissão de N₂O, pois o mecanismo envolvido não está claro e as descobertas científicas são contraditórias.

No contexto do tratamento de esgoto, o óxido nitroso é proveniente da degradação de compostos de nitrogênio como uréia, amônia e proteínas. Isto porque, as águas residuais domésticas incluem esgoto humano misturado com esgoto doméstico, que pode conter ainda efluentes chuveiro, pias, ralos, máquinas de lavar, etc.. Alguns exemplos de sistemas centralizados de tratamento para remoção de nitrogênio são as lagoas e tecnologias de tratamento terciário avançado.

3.5.3 Condição anaeróbia

Este mecanismo (fermentação e oxidação anaeróbio) baseia-se na atividade de microrganismos, sob condições anaeróbias e controladas de operação, para a conversão biológica da matéria orgânica complexa em compostos químicos simples (METCALF; EDDY, 2003). Caracteriza-se pela transformação da matéria orgânica, em ambiente com restrição de oxigênio, em metano, dióxido de carbono, hidrogênio e uma variedade de ácidos orgânicos em pequenas ou grandes quantidades.

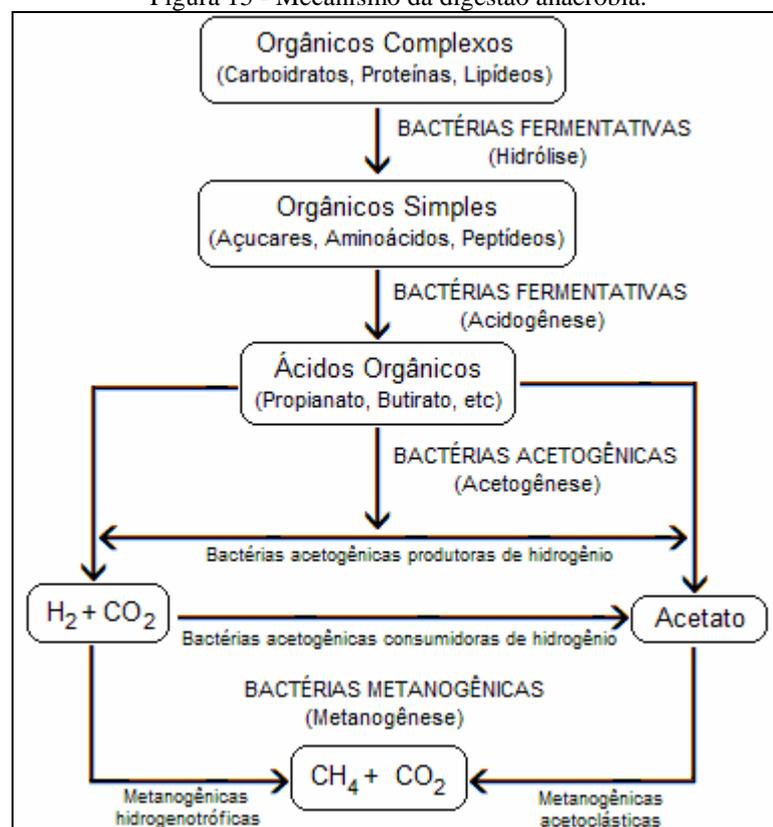
A estabilização da matéria carbonácea em condições anaeróbias processa-se da seguinte forma:



Esta reação é geral e simplificada, representa apenas o produto final de várias etapas intermediárias, e coloca a glicose como exemplo de matéria orgânica. A reação mostra que a matéria orgânica é convertida a uma forma mais oxidada (CO₂) e em outra forma mais reduzida (CH₄). No entanto, a maior parte do CH₄ é desprendida para a fase gasosa, resultando em uma efetiva remoção da matéria orgânica (VON SPERLING, 1996).

O processo anaeróbico pode ser representado por um composto orgânico genérico, formado por moléculas de carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio ($C_nH_aO_bN_d$), sobre o qual várias espécies bacterianas atuam para a redução até materiais mais simples. Trata-se de um fenômeno bioquímico complexo, que demanda condições ambientais específicas, e que é constituído pelas etapas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (CHERNICHARO, 1997). A Figura 15 ilustra o mecanismo de transformação e em seguida são detalhadas as respectivas etapas.

Figura 15 - Mecanismo da digestão anaeróbia.



Fonte - Chernicharo, 1997.

3.5.3.1 Hidrólise

A primeira fase da degradação anaeróbia é a hidrólise. Ela ocorre por meio da ação de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas, dentre as quais se podem destacar os gêneros *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Bacteroides*, *Butyvirio*, *Streptococcus*, *Bacillus*, *Eubacteriu* e *Acetivirio* (CHERNICHARO, 1997). Trata-se da quebra da matéria orgânica complexa - definida como o substrato que contém grande fração de sólidos suspensos ou insolúveis - como os carboidratos, as proteínas e os lipídios, em materiais

solúveis, ou seja, açúcares, aminoácidos e ácidos graxos de cadeia longa, respectivamente. Como visto, esta quebra ocorre tanto nas vias anaeróbias quanto nas aeróbias, pois os microrganismos não são capazes de assimilar os compostos no seu estado particulado.

Sob condições anaeróbias, a hidrólise da matéria orgânica usualmente ocorre de forma lenta, podendo representar a fase limitante da velocidade do processo global quando o resíduo é constituído predominantemente de material não dissolvido. Assim, esta pode ser influenciada por diversos fatores como, por exemplo, a estrutura molecular do composto orgânico, a relação entre a superfície e o volume das partículas, a temperatura e o pH operacional do reator e o tempo de residência (CHERNICHARO, 1997). Contudo, essa etapa de degradação anaeróbia pode ser acelerada por meio da adição de compostos químicos e assim, proporcionar maior rendimento, como na produção de CH_4 .

3.5.3.2 Acidogênese

Nesta etapa, as substâncias solúveis provenientes da etapa de hidrólise são metabolizadas por bactérias fermentativas, dentre as quais se destacam os gêneros *Escherichia*, *Clostridium*, *Staphylococcus*, *Streptococcus*, *Desulphovibrio*, *Lactobacillus* e *Actinomyces* (METCALF; EDDY, 2003). Essas substâncias solúveis são convertidas em diversos compostos simples, como os ácidos graxos voláteis (AGV), os álcoois, o ácido láctico e os compostos minerais, que são o dióxido de carbono, hidrogênio, amônia e gás sulfídrico; além de novas células bacterianas. Considerando-se que os AGV são os principais produtos dos organismos fermentativos, esses são geralmente designados de bactérias fermentativas acidogênicas.

A maioria das bactérias acidogênicas são anaeróbias estritas, entretanto as bactérias facultativas podem oxidar o substrato orgânico por via aeróbia. Este consumo do oxigênio dissolvido eventualmente presente no meio é importante porque esta substância poderia ser tóxica para a etapa seguinte de degradação (metanogênese).

Não obstante, durante as etapas fermentativas de hidrólise e acidogênese, não ocorre redução da demanda química de oxigênio (DQO), uma vez que há somente a conversão de compostos orgânicos complexos em substâncias mais simples, as quais também exercem uma demanda de oxigênio.

3.5.3.3 Acetogênese

A acetogênese consiste na transformação dos produtos gerados na fase acidogênica em substratos intermediários que são: hidrogênio, acetato e dióxido de carbono. Estas substâncias, por sua vez, são precursoras da formação do metano na etapa seguinte. As bactérias responsáveis por esse processo são acetogênicas, cujos gêneros mais encontrados são *Syntrophobacter* e *Syntrophomonas* (CHERNICHARO, 1997).

3.5.3.4 Metanogênese

A metanogênese, etapa final do processo de degradação anaeróbia, é a responsável direta pela produção de metano e dióxido de carbono. As bactérias metanogênicas (*Archeobactérias*) apresentam a maior diversidade em termos morfológicos entre todos os grupos responsáveis pelo processo anaeróbio. Elas degradam apenas um número limitado de substratos com baixo número de carbonos, dentre eles, o ácido acético, o hidrogênio/dióxido de carbono, o ácido fórmico, o metanol, as metilaminas e o monóxido de carbono (CHERNICHARO, 1997). É importante destacar que estes organismos são anaeróbios obrigatórios.

Nesse sentido, as metanobactérias são divididas por Von Sperling (1996) em dois grandes subgrupos, de acordo com substrato utilizado como fonte de energia:

a) Bactérias que utilizam o acetato (acetoclásticas ou acetotróficas): na ausência de hidrogênio no meio, essas bactérias promovem a clivagem do ácido acético, no qual o grupo metil é reduzido a metano, enquanto o grupo carboxílico é oxidado a gás carbônico, conforme mostra a reação 13:



A hipótese do mecanismo de redução, aplicado ao acetato, para a produção de metano consiste em a matéria orgânica ser oxidada completamente a CO_2 , associada com a redução do CO_2 , total ou parcialmente, para a produção de metano. Os principais gêneros das bactérias acetotróficas são: *Methanosarcina* e *Methanotherix*.

b) Bactérias que utilizam hidrogênio (hidrogenotróficas): quando há disponibilidade de hidrogênio no meio, as bactérias hidrogenotróficas são responsáveis pela produção de

metano a partir da redução do dióxido de carbono, onde este atua como um acceptor dos átomos de hidrogênio. A reação de formação do metano é exibida a seguir.



Os principais gêneros pertencentes a esse grupo de bactérias são: *Methanobacterium*, *Methanococcus*, *Methanogenium*, *Methanobrevibacter*, *Methanospirillum*, *Methanoculleus* e *Methanocorpusculum* (CHERNICHARO, 1997).

Como visto, as bactérias metanogênicas (*Archeas*) dependem do substrato fornecido pelas bactérias acidogênicas e, aquelas retiram o carbono e o hidrogênio do ambiente anaeróbio, favorecendo para as bactérias acidogênicas produzam o ácido acético, o que configura uma interação comensal.

Uma vez que as bactérias metanogênicas são responsáveis pela maior parte da degradação do resíduo, por meio da redução da DQO, sua baixa taxa de crescimento e de utilização dos ácidos orgânicos normalmente representa o fator limitante no processo de digestão como um todo.

Além das quatro fases descritas anteriormente, a digestão anaeróbia pode incluir ainda uma quinta etapa, dependendo da composição química do efluente a ser tratado.

Sistemas de tratamento ou as vias de descarga que proporcionam ambientes anaeróbios, geralmente produzem metano. Em contrapartida, sistemas que fornecem ambientes aeróbios, normalmente, produzem pouco CH₄ ou nenhum. No caso de lagoas sem mistura ou aeração, sua profundidade é um fator crítico na produção de CH₄. Lagoas rasas, com menos de 1 metro de profundidade, geralmente oferecem as condições aeróbias e pouca ou nenhuma geração de metano. Lagoas mais profundas do que cerca de 2-3 metros, geralmente fornecem ambientes anaeróbios e produção de CH₄ significativa (IPCC, 2006b).

3.6 MITIGAÇÃO DAS EMISSÕES DE GEE

A perspectiva de diminuição global de emissões de GEE aponta para um potencial de redução de apenas 30% das emissões de CH₄ e de menos de 20% para as emissões de N₂O, considerando a participação mundial de todos os setores econômicos. Este potencial seria limitado pelo foco em tecnologias que poderiam ser implantadas a partir do ano de 2010 (LUCAS et al., 2007). Todavia, em longo prazo o desenvolvimento tecnológico e a

eliminação de barreiras de implementação deveriam melhorar este cenário. Desta maneira, em longo prazo e em termos globais, o potencial de redução de metano foi estimado em 80% até 2050 e em 90% até 2100, cujos respectivos custos não ultrapassariam US\$500/tCO₂e. A respeito do óxido nitroso, este potencial global chegaria a 20% em 2050 e a 35% em 2100 e seus custos alcançaram também o valor de US\$500/tCO₂e para ambos os anos (LUCAS et al., 2007).

Nesse sentido, é importante que sejam tomadas medidas para mitigação da emissão de GEE de cunho tecnológico e não-tecnológico (político e educacional). A seguir são comentadas as principais abordagens nesse sentido com foco no tratamento de esgoto.

3.6.1 Abordagem Tecnológica

Como visto na seção 3.2.1, os interessados podem criar, sugerir e submeter à aprovação metodologias de projetos de MDL. Até o momento, os projetos de MDL aprovados do setor de tratamento de efluentes contemplaram duas metodologias para pequena escala: “III.H. Recuperação de Metano no Tratamento de Águas Residuárias” (CQNUMC, 2006a) e “III.I. Produção de metano, no tratamento de águas residuárias, evitada por meio da substituição de sistemas anaeróbicos por sistemas aeróbicos” (CQNUMC, 2006b).

A metodologia III.H envolve medidas que recuperem o biogás (proveniente do tratamento anaeróbio) através das seguintes alternativas (de forma isolada ou combinada):

- a) Substituição de sistema/processo de tratamento aeróbio de águas residuárias ou de lodo por sistemas anaeróbios com recuperação e queima de metano;
- b) Introdução de processo anaeróbio de tratamento de lodo com recuperação e combustão de metano em uma estação existente de tratamento de águas residuárias sem tratamento de lodo;
- c) Introdução de recuperação e combustão de metano em processos existentes de tratamento de lodo;
- d) Introdução de recuperação e combustão de metano em um processo existente de tratamento anaeróbio de águas residuárias, como reator anaeróbio, lagoa ou tanque séptico;
- e) Introdução de tratamento anaeróbio de águas residuárias com recuperação e combustão de metano, com ou sem tratamento de lodo, em águas residuárias não tratadas;

f) Introdução de uma fase seqüencial do tratamento de águas residuárias com recuperação e combustão de metano, com ou sem tratamento de lodo, em um processo existente de tratamento de águas residuárias sem recuperação de metano.

Como visto, o biogás recuperado com estas medidas pode ser queimado ou ainda utilizado na:

- Geração direta de energia térmica ou elétrica. Nesse caso, outra metodologia de geração de energia renovável deve ser associada para se requerer reduções de emissões por esse componente (setor I - Energia).
- Geração de energia térmica ou elétrica após o engarrafamento do biogás purificado.
- Geração de energia térmica ou elétrica após a purificação e distribuição:
- Produção de hidrogênio. Nesta situação, esse componente da atividade do projeto deverá usar a categoria correspondente.

Caso haja geração de energia, deverão ser observadas as disposições da metodologia correspondente do tipo I, de geração de energia renovável, para se requerer reduções de emissões por esse componente.

Só poderão ser reivindicadas reduções de emissão se o biogás for utilizado (substituição de combustíveis) dentro do limite do projeto e monitorado durante o período de obtenção de créditos.

Por isso, para a RCE ser relatada no tratamento de esgoto, a energia pode, por exemplo, ser usada para fins de secagem do lodo. Segundo o IPCC (2007), estas são as práticas mais viáveis em curto prazo, ou seja, são projetadas para serem comercializadas antes do ano de 2030.

No que se refere à distribuição como gás natural, que pode ser de RCEs para o setor energético, detalhes podem ser obtidos no Volume 2 do IPCC 2006, “Energia”.

É importante destacar que todo gás, queimado ou utilizado como fonte energética, deve ser subtraído do volume de emissões por meio de um parâmetro de recuperação. A geração de GEE do flare é insignificante, pois as emissões de dióxido de carbono são de origem biogênica, e as de metano e óxido nitroso são pequenas; assim o IPCC sugere não estimá-las (IPCC, 2006b).

Já a metodologia III.I contempla medidas que evitem a produção de metano decorrente do tratamento anaeróbico de águas residuárias. A atividade de projeto, então, consiste em

substituir sistemas anaeróbios (sem recuperação de metano) por sistemas biológicos aeróbios. Desta maneira, o projeto não envolve produção nem recuperação/queima de biogás nas instalações de tratamento de esgotos (diferentemente da AMS-III.H).

Sob essa perspectiva, ainda não existem metodologias de linha de base e monitoramento para a redução de emissões de N₂O. Mas, alguns autores já estudam o assunto, e por exemplo, Lucas et al. (2007) sugerem a implantação de ETEs para diminuição da emissão desse gás.

3.6.2 Abordagem Política

A mudança do clima é um dos elementos das políticas de desenvolvimento sustentável; e para alcançar este novo padrão é imprescindível que existam interações articuladas entre as iniciativas dos setores público e privado (envolvendo governo, empresas e a sociedade civil) e participação equitativa desses agentes. Segundo IPCC (2007), os governos têm papel fundamental de apoio à formação de um ambiente propício, em âmbitos institucional, político, legal e de regulamentações, para sustentar os fluxos de investimento e para a transferência eficaz de tecnologias mais limpas.

Políticas que priorizam e valorizam tecnologias mais limpas, investimentos em infraestrutura e modernização na área de tratamento de esgotos nos países em desenvolvimento devem criar oportunidades para que se conseguir reduzir as emissões de GEE. Práticas como o estabelecimento de contribuições financeiras, créditos fiscais, padrões e criação de fundos e de mercado são interessantes nesse sentido. É importante mobilizar o financiamento dos custos incrementais das tecnologias com baixo uso de carbono. Acordos tecnológicos internacionais podem fortalecer essa infra-estrutura.

Além do aspecto financeiro, um fato que limita o manejo adequado de águas residuárias nos países em desenvolvimento é a falta de especialistas em tecnologia sustentável. Portanto, políticas e programas de educação, conscientização social e capacitação profissional são imprescindíveis na busca pela mitigação das mudanças climáticas.

A aplicabilidade das políticas e instrumentos que visam a criação de incentivos para as medidas de mitigação depende das circunstâncias nacionais e de uma compreensão das suas interações, mas a implementação em vários países e setores mostra que há vantagens e desvantagens para qualquer instrumento. De maneira geral, o IPCC (2007) aponta que:

- A integração das políticas climáticas com outras políticas mais abrangentes de desenvolvimento facilita a superação das barreiras e conseqüentemente, a implantação.
- As regulamentações e os padrões fornecem um direcionamento para os envolvidos com redução de emissões de gases.
- Os impostos e taxas podem determinar um preço para o carbono, mas não podem garantir um determinado nível de emissões. As publicações identificam os impostos como uma forma eficiente de internalizar os custos das emissões de gases estufa.
- Os incentivos financeiros (subsídios e créditos fiscais) são usados com freqüência pelos governos para estimular o desenvolvimento e a difusão de novas tecnologias. Trata-se de um instrumento de custo econômico maior que os anteriores, mas que freqüentemente é essencial para superar as barreiras.
- Os acordos voluntários entre a indústria e os governos são politicamente atrativos, pois aumentam a conscientização entre as partes interessadas. Acordos recentes, em alguns países, aceleraram a aplicação da melhor tecnologia disponível e promoveram reduções de emissões mensuráveis.
- Os instrumentos informativos (como campanhas de conscientização) afetam positivamente a qualidade ambiental, promovendo escolhas fundamentadas e contribuindo para a mudança de comportamento;
- Os planos de incentivo a PD&D (Pesquisa, Desenvolvimento e Demonstração) podem estimular os avanços tecnológicos, reduzir custos e promover progressos em direção à estabilização do balanço de gases.

Com relação a medidas específicas aplicadas ao tratamento de esgoto, três se destacaram e estão no Quadro 3.

Quadro 3 - Seleção de políticas, medidas e instrumentos aplicadas ao setor de Manejo de Esgotos que se mostraram ambientalmente eficazes.

POLÍTICA, MEDIDA OU INSTRUMENTO	PRINCIPAIS RESTRIÇÕES OU OPORTUNIDADES
Incentivos financeiros para a melhoria do manejo dos resíduos e das águas residuárias	Podem estimular a difusão de tecnologias
Incentivos à energia renovável ou obrigaçao de uso de energia renovável	Aumentam a disponibilidade local de combustível de baixo custo
Regulamentação do manejo de efluentes	Melhorar a aplicação de forma mais eficaz em âmbito nacional, com estratégias de garantia e cumprimento

Fonte - IPCC, 2007.

Os co-benefícios das medidas adotadas são específicos de cada país, mas envolvem, com frequência, a redução da poluição do ar e do solo, melhoria da balança comercial, redução dos custos com saúde pública, fornecimento de serviços modernos e geração de empregos. Um aspecto importante que se refere aos co-benefícios para a saúde, é que numa análise de curto prazo, a redução da poluição do ar como consequência da redução das emissões de GEE, pode ser substancial e compensar uma parcela significativa dos custos de mitigação. Outro ponto relevante constatado é que a integração das políticas de redução da poluição do ar e de mitigação da mudança do clima pode também oferecer diminuição de custo potenciais em relação à implementação dessas políticas isoladamente (IPCC, 2007).

3.6.3 Abordagem Educacional e Cultural

Há ainda lacunas importantes no conhecimento existente atualmente sobre alguns aspectos da mitigação da mudança do clima, em especial nos países em desenvolvimento. No que se refere ao tratamento de águas residuárias, nota-se carência de dados nacionais para cálculos de emissões e monitoramento e trabalhos publicados, principalmente a respeito do gás óxido nitroso. A realização de mais pesquisas para tratar dessas lacunas reduziria as incertezas, facilitando a tomada de decisões e a adoção de medidas de adaptação relativas à mitigação da mudança do clima (IPCC, 2007).

Não obstante, o fato de existirem medidas tecnológicas e políticas públicas por si só não garante uma conduta social mais sustentável. É preciso que a sociedade seja conscientizada. Alterações no estilo de vida e em características culturais de comportamento são primordiais para a mitigação da mudança do clima em todos os setores, reduzindo as emissões de gases de efeito estufa. Nesse sentido, podem-se citar alguns aspectos: mudanças no padrão de consumo que ressaltem a conservação dos recursos naturais e não-naturais podem contribuir para o desenvolvimento de uma economia com baixo uso de carbono, que seja equitativa e sustentável; programas educativos e de treinamento podem ajudar a superar as barreiras à aceitação pelo mercado da eficiência energética (associado ao uso do biogás); mudanças no comportamento doméstico são transferidas para o ambiente de trabalho minimizando o desperdício em ambos os lugares, por exemplo, reduzindo a geração de esgotos.

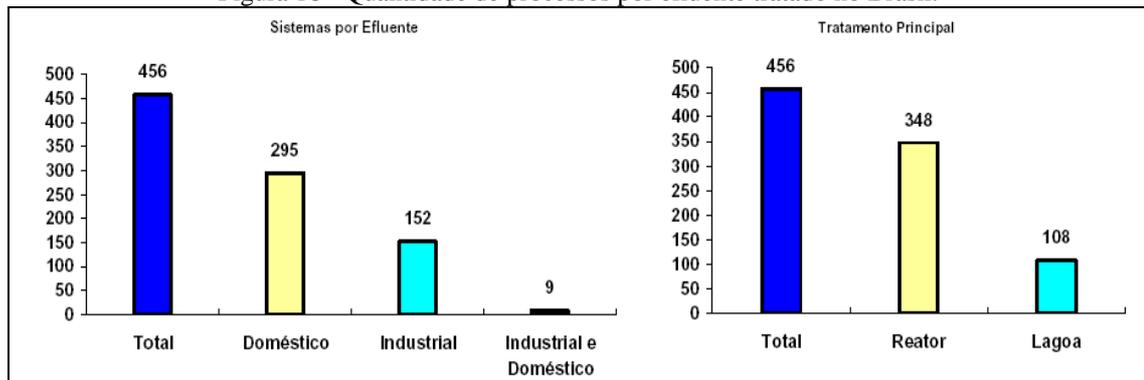
3.7 O TRATAMENTO DE ESGOTO E A EMISSÃO DE GEE NO BRASIL

Segundo os últimos levantamentos do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento Básico (BRASIL, 2010a), entre os serviços de saneamento básico que incluem o abastecimento de água, esgotamento sanitário, limpeza e coleta de lixo e drenagem urbana, o esgotamento é o que tem tido menor atenção. Os dados revelam situação grave, na qual o índice médio nacional de tratamento do total de esgoto gerado é de apenas 34,6%. A maior parte do esgoto não-tratado é lançada *in natura* em corpos d'água, contribuindo para a ocorrência da eutrofização e diminuição da qualidade do recurso hídrico localizado na superfície. Uma parcela pequena é destinada a tanques sépticos e sumidouros, que também influencia na qualidade da água, neste caso subterrânea, e do solo. Por isso, o tratamento de esgoto configura-se como um dos principais passivos ambientais no Brasil. Essa insuficiência compromete o meio ambiente e, conseqüentemente a saúde da população. Nesse sentido, a universalização do tratamento de esgoto constitui-se em um instrumento fundamental de promoção do desenvolvimento sustentável nacional e local, com ganhos à qualidade de vida da população, redução de custos financeiros nos sistemas de saúde, ganhos econômicos potenciais decorrentes de aumentos na produtividade do trabalho e valorização de ativos ambientais (PAIVA, 2008).

No Brasil encontra-se desde os processos de tratamento sépticos até os sistemas com tecnologia para aeração. As áreas rurais e os sistemas individuais de moradia aplicam os tanques sépticos, usualmente associados ao filtro anaeróbio ou a infiltração do efluente no solo. No meio urbano, observa-se, para sistemas coletivos, o uso do tratamento biológico, por meio de lagoas de estabilização e de variações de lodos ativados, particularmente aquelas que empregam aeração prolongada. As lagoas aeradas têm sido bastante empregadas em comunidades médias e para tipos específicos de efluentes industriais (BRASIL, 2006b).

A Figura 16 mostra a distribuição dos diferentes sistemas de tratamento em relação aos tipos de efluente, bem como o sistema principal aplicado.

Figura 16 - Quantidade de processos por efluente tratado no Brasil.



Fonte - SÃO PAULO, 2001.

De acordo com a Figura 16, há uma predominância de processos para tratamento de efluentes de origem doméstica sobre os destinados ao tratamento de efluentes gerados por indústrias e ainda, que a maior parte do tratamento é realizada por meio de reatores.

Sob essa perspectiva, a CETESB (SÃO PAULO, 2001) divulgou também que do total de reatores inventariados (348), 227 destinavam-se ao tratamento de esgoto doméstico, 117 aos efluentes industriais e quatro ao tratamento de ambos, sendo todos eles anaeróbios. A CETESB apontou ainda que dos reatores anaeróbios instalados no Brasil, a grande maioria estava localizada nos estados de São Paulo e Paraná e era do tipo RAFA (como mostra a Tabela 3). Esta tecnologia é muito apropriada às condições do país devido às condições climáticas favoráveis, simplicidade de construção e operação do processo, além de não serem necessários equipamentos eletro-mecânicos de agitação e aeração e nem material de enchimento para o reator.

Tabela 3 - Quantidade de reatores por tipo utilizado no Brasil.

Reatores utilizados	Quantidade
RAFA- Reator anaeróbio de fluxo ascendente	234
RALF- Reator anaeróbio de leito fluidizado	64
Filtro anaeróbio	41
Reator anaeróbio de contato	6
Reator anaeróbio com circulação interna	3
Total	348

Fonte - SÃO PAULO, 2001.

Sob essa perspectiva, é importante mostrar as principais diferenças entre os processos de tratamento: do ponto de vista da implementação de tecnologias sustentáveis, o processo anaeróbio requer pouco espaço para sua implementação, menores custos de investimentos

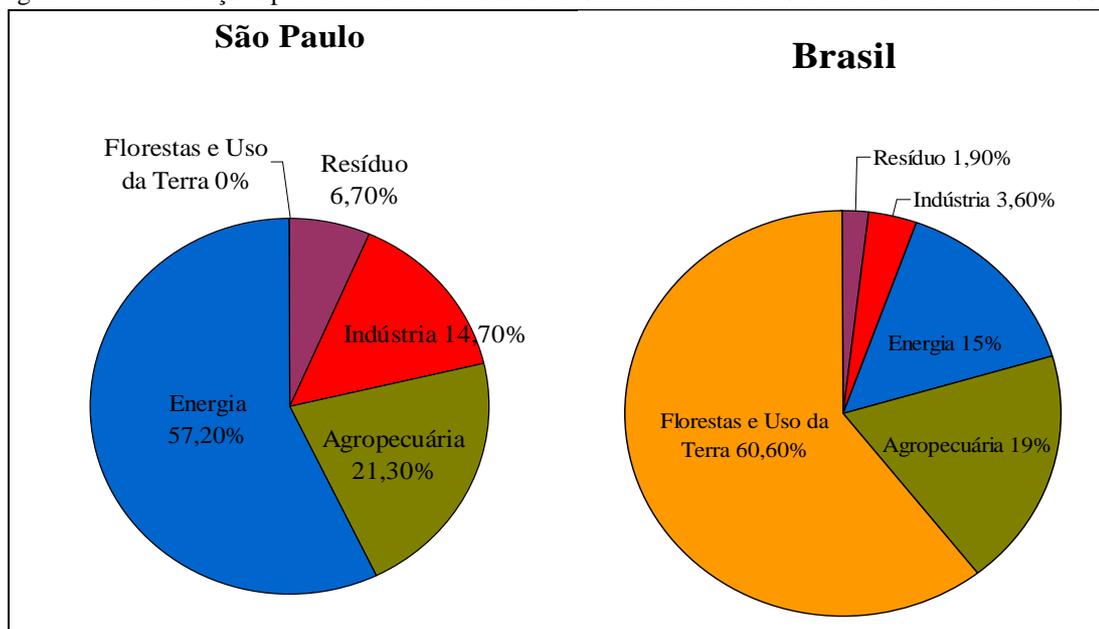
para maiores cargas volumétricas, produz energia útil na forma de biogás, pouco lodo e pode ser operado com baixo custo. Já nos processos aeróbios, a matéria orgânica se transforma em gás carbônico, água e biomassa ou lodo, sendo que este se torna um grande problema, pois seu posterior aproveitamento na agricultura e outras formas de disposição demandam maiores custos e grandes quantidades de energia (PAIVA, 2008).

O tratamento dos efluentes com alto teor de matéria orgânica, como o esgoto doméstico e aqueles das indústrias alimentícias, de bebidas e de papel e celulose, como já comentado, têm potencial para emissão de GEE (principalmente CH₄ e N₂O) e por isso podem contribuir no contexto do MDL.

Os principais fatores determinantes da produção de gases são a carga orgânica do efluente, a temperatura do ambiente e o tipo de processo de disposição/tratamento do esgoto. Por isso, é importante destacar que no caso da maioria dos países em desenvolvimento, características climáticas -como, por exemplo, as temperaturas elevadas- favorecem condições de anaerobiose necessárias à produção do metano. Além disso, a maior parte do tratamento nesses países faz uso de processos anaeróbios, diferentemente dos países desenvolvidos (IPCC, 2006b). Assim, as características da coleta/tratamento escolhido também determinam a emissão de GEE quanti-qualitativamente. No âmbito do MDL e deste trabalho, é necessário que o tratamento seja realizado de forma a diminuir as emissões de metano e óxido nitroso.

O gráfico da Figura 17 apresenta a distribuição das emissões de GEE do Estado de São Paulo e do Brasil.

Figura 17 - Distribuições percentuais das emissões de GEE do Estado de São Paulo e do Brasil em 2005.



Fonte - SÃO PAULO, 2011.

No caso do Brasil (gráfico acima à direita), de acordo com o inventário de emissões feito pela CETESB (SÃO PAULO, 2011), ano-base 2005, as emissões provenientes do setor de resíduos representaram cerca de 2% das emissões totais. Este valor não sugere muita relevância porque as emissões provenientes do setor de Mudança no uso do solo e Florestas, contempladas na análise, são as mais expressivas em território nacional. Se as emissões deste setor forem excluídas da análise, a participação do setor de resíduos deve aumentar significativamente, o que indica uma oportunidade para se atuar com o objetivo de reduzir emissões (CGEE, 2010). Este é o caso indicado pelo gráfico à esquerda da Figura 17, que mostra a contribuição setorial no Estado de São Paulo, no total de emissões de GEE de 139811GgCO₂e (Giga gramas) do ano de 2005, que não detém muitas florestas em seu território; por isso, em comparação com os outros setores a emissão de gases do setor de Resíduos chega a 6,7%. Nesse sentido, é importante observar que quando se trata do setor de resíduos do Estado de São Paulo, por exemplo, este emite 9365GgCO₂e (2005), sendo 23% oriundos do tratamento do esgoto doméstico, 14% dos efluentes industriais e 63% da disposição de resíduos sólidos em aterros sanitários (SÃO PAULO, 2011).

Em termos de produção mundial de gás metano, o CH₄ gerado no tratamento de efluentes sob condições anaeróbias (principais geradoras desse gás) varia entre 30 e 40 Tg/ano (Tera gramas-10¹²), o que representa de 8 a 11% do total global de emissões antropogênicas de CH₄, estimado em 360 Tg/ano. As emissões mundiais de metano provenientes do tratamento de esgoto doméstico e comerciais, por sua vez, foram estimadas em, aproximadamente, 2 Tg/ano para o mesmo período (IPCC, 2005 apud BRASIL, 2009c).

Os dados da TABELA 4.2 revelam o respectivo cenário brasileiro. Nesse sentido, o tratamento de esgoto doméstico encontra-se no setor de tratamento de resíduos, como pode ser visto na Tabela 4.

Tabela 4 - Emissões de CH₄ no Brasil no ano de 2005 por setores em giga gramas.

Setor/Ano	1990	1994	2000	2005
Energia	425	379	416	546
Processos Industriais	3	3	4	4
Agropecuária	9869	10571	11144	13465
Mudança no uso do solo	1615	1805	2762	2843
Tratamento de resíduos	1146	1333	1739	2113
Lixo	758	913	1177	1482
Esgoto	388	420	562	631
Industrial	126	129	203	238
Doméstico	262	290	359	393
Total	13058	14091	16065	18971

Fonte - BRASIL, 2009c.

Os dados revelam que o tratamento de resíduos era, em 2005, responsável por 11,1 % (2113 GgCH₄) das emissões totais de metano no Brasil, enquanto que contribuição do esgoto doméstico era de cerca de 2 % (393 GgCH₄ no total de 18971).

Apesar da baixa participação do setor de tratamento de esgoto para o agravamento do aquecimento global em comparação a outros setores, isso não diminui a sua importância. Isto porque, além da grande margem de erros da metodologia de estimativas das publicações, a cobertura dos serviços de tratamento de esgoto era menor, o que provavelmente produziu valores subestimados (PAIVA, 2008). Não obstante, a meta do Protocolo é que ocorram as reduções dos GEE independente do setor emissor e gás emitido.

Todavia, não foi possível relatar um cenário detalhado para o óxido nitroso, pois poucos estudos e dados foram encontrados a respeito da emissão de N₂O pelo setor de tratamento de esgotos, principalmente no Brasil. Um estudo da CETESB (SÃO PAULO, 2011) revelou que não houve variação significativa do volume de emissões de N₂O no Estado de São Paulo desde a década de 1990 considerando todos os setores da economia; e que a Agropecuária gerou as maiores emissões, 37 GgN₂O no ano de 2005 (59,8% do total). É importante destacar que esse gás, apesar de receber pouca ênfase nos relatórios para o tratamento de esgotos, pode ser gerado em sistemas aeróbios que promovam condições de nitrificação e desnitrificação, como por exemplo, lodos ativados por aeração prolongada e filtro biológico aeróbio.

Diante do exposto, a utilização de tratamento anaeróbio tem sido mais utilizada no cenário de projetos de MDL dentro do sub-setor de Tratamento de Esgotos. Sendo assim, os processos de tratamento de esgoto de forma anaeróbica têm pleiteado a maior parte dos CERs

relativos à redução das emissões do biogás utilizando processos como biodigestores anaeróbios, para a captura desse gás. Depois de capturado, o biogás pode ser queimado e sua combustão transforma-o em gás carbônico (este de origem biogênica), ou ainda para fins energéticos.

Nesta seção foi mostrado o cenário de emissões de gases contemplados pelo Protocolo de Quioto que são relevantes para o tratamento de esgotos. Mais informações sobre as emissões de GEE controlados pelo Protocolo de Montreal podem ser encontradas no endereço eletrônico da CETESB.

3.8 CENÁRIO ATUAL DO MDL NO BRASIL

O governo brasileiro vem tomando iniciativas para motivar a implantação de projetos de MDL no país por meio de regulamentações, estabelecimento de acordos, criação de formas de financiamento, entre outros. As próximas seções trazem um panorama sobre os avanços do MDL no Brasil, em termos de medidas legais, bem como de desenvolvimento de projetos.

3.8.1 Base Legal

O Brasil possui um arcabouço legal que contempla a redução da emissão de gases estufa, a mitigação das mudanças climáticas e diretrizes para elaboração de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo em âmbito federal, estadual e municipal. Devido ao número de leis e ao foco deste trabalho, optou-se por apresentar as principais regulamentações de instância Federal. Entretanto, conforme informações divulgadas pela CETESB (disponíveis no endereço eletrônico <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/proclima/Legisla%C3%A7%C3%A3o/88-Federal>>, acessado em 27/01/2012 e <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/77650.html>>, acessado em 27/01/2012) há 19 estados e 7 municípios que possuem sua base legal local. Estes Estados são: Acre, Amapá, Amazonas, Bahia, Ceará, Espírito Santo, Goiás, Maranhão, Mato Grosso, Minas Gerais, Pará, Paraná, Pernambuco, Piauí, Rio de Janeiro, Rio Grande do Sul, Santa Catarina, São Paulo e Tocantins. E os Municípios são: Belo Horizonte (MG), Palmas (TO), Porto Alegre (RS), Rio de Janeiro (RJ), Birigui (SP), São Paulo (SP) e Valinhos (SP). É importante destacar que cada um dos seis setores (Energia, Indústria, Uso de Solventes, Agricultura, Resíduos, Mudança de

uso do solo e Florestas) tem suas diretrizes e normas específicas. O Quadro 4 mostra as principais, e gerais, regulamentações no contexto do MDL.

Quadro 4 - Regulamentações em âmbito nacional sobre mitigação de GEE.

Regulamentação	Descrição
LEI Nº 12.187, DE 29 DE DEZEMBRO DE 2009	Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC e dá outras providências.
LEI Nº 12.114, DE 9 DE DEZEMBRO DE 2009	Cria o Fundo Nacional sobre Mudança do Clima, altera os arts. 6º e 50 da Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, e dá outras providências.
LEI Nº 10.295, DE 17 DE OUTUBRO DE 2001	Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia e dá outras providências.
LEI Nº 9.478 DE 06 DE AGOSTO DE 1997	Dispõe sobre a Política Energética Nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências.
RESOLUÇÃO DE Nº 4.008, DE 14 DE SETEMBRO DE 2011	Dispõe sobre financiamentos ao amparo de recursos do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (FNMC).
RESOLUÇÃO DE Nº 09, DE 20 DE MARÇO DE 2009	Dispõe sobre o Programa de Atividades no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.
RESOLUÇÃO Nº 3, DE 24 DE MARÇO DE 2006	Estabelece os procedimentos para aprovação das atividades de projeto de pequena escala no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Quioto, e dá outras providências.
DECRETO Nº 6.263, DE 21 DE NOVEMBRO DE 2007	Institui o Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima - CIM, orienta a elaboração do Plano Nacional sobre Mudança do Clima, e dá outras providências.
DECRETO Nº 5445, DE 12 DE MAIO DE 2005	Promulga o Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, aberto a assinaturas na cidade de Quioto, Japão, em 11 de dezembro de 1997, por ocasião da Terceira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das nações Unidas sobre Mudança do Clima.
DECRETO LEGISLATIVO Nº 144, DE 2002	Aprova o texto do Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima aberto a assinaturas na cidade de Quioto, Japão, em 14 de dezembro de 1997, por ocasião da Terceira Conferência das Partes da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.

DECRETO Nº 3.515, DE 20 DE JUNHO DE 2000	Cria o Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, com o objetivo de conscientizar e mobilizar a sociedade para a discussão e tomada de posição sobre os problemas decorrentes da mudança do clima por gases de efeito estufa, bem como sobre o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM) definido no Artigo 12 do Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, ratificada pelo Congresso nacional por meio do Decreto Legislativo nº 1, de 3 de fevereiro de 1994.
DECRETO DE 07 DE JULHO DE 1999	Cria a Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima com a finalidade de articular as ações de governo nessa área.
DECRETO Nº 2.965 DE 25 DE FEVEREIRO DE 1999	Promulga o Acordo entre o Governo da República Federativa do Brasil e o Instituto Interamericano para Pesquisa em Mudanças Globais acerca da Sede do IAI celebrado, no Rio de Janeiro, em 28 de abril de 1995.
DECRETO DE 26 DE FEVEREIRO DE 1997	Cria a Comissão de Políticas de Desenvolvimento Sustentável e da Agenda XXI Nacional, e dá outras providências.
DECRETO Nº 1.160, DE 21 DE JUNHO DE 1994	Cria a Comissão Interministerial para o Desenvolvimento Sustentável (CIDES) e dá outras providências.
PORTARIA INTERMINISTERIAL MCT/MMA Nº 356, DE 25 DE SETEMBRO DE 2009	Institui o Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas - PBMC, com o objetivo de disponibilizar a tomadores de decisão e à sociedade, informações técnico-científicas sobre mudanças climáticas.
PORTARIA INTERMINISTERIAL MCIDADES/MMA Nº 695, DE 20 DE DEZEMBRO DE 2006	Cria o Projeto Mecanismos de Desenvolvimento Limpo aplicado à redução de Emissões de Gases em Unidades de Disposição Final de Resíduos Sólidos - Projeto MDL Resíduos Sólidos Urbanos, sua estrutura organizacional, e dá outras providências.
PORTARIA Nº 533, DE 29 DE AGOSTO DE 2000	Publica o Regimento Interno da Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima, criado pelo Decreto de 7 de julho de 1999, aprovada na reunião daquela Comissão, realizada em 17 de abril de 2000.

Fonte - Baseado em dados do site da CETESB e do MCT (<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/proclima/Legisla%C3%A7%C3%A3o/88-Federal>, acesso em 27/01/2012 e <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/77650.html>>, acesso em 27/01/2012).

Segundo Reis (2009) em termos de medidas de caráter nacional de estímulo ao desenvolvimento de projetos de MDL destacam-se a proposta de criação do Fundo Nacional sobre Mudança do Clima (em 2009), com o objetivo de prover os recursos financeiros para implantar a Política e o Plano sobre Mudança do Clima (de 2009). Outra iniciativa é o Pró-MDL (ou Programa de Apoio a Projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) lançado em 2006 pela FINEP - Financiadora de Estudos e Pesquisas do Governo Federal, com o objetivo de financiar projetos de pré-investimento e de desenvolvimento científico-tecnológico. Com o Pró-MDL vários agentes envolvidos com o desenvolvimento de projetos de MDL poderão ter acesso a recursos na forma de financiamento (reembolsáveis) e não reembolsáveis (BRASIL, 2008b).

Finalmente, o Brasil vem estabelecendo projetos de cooperação internacional com países como Canadá, Dinamarca, Espanha, França, Holanda, Itália, Japão, Portugal e Reino Unido, em alguns casos por meio de Memorandos de Entendimento para cooperação nas áreas de mudança do clima e execução de projetos de MDL (BRASIL, 2008b).

3.8.2 Projetos

O Brasil apresenta uma postura favorável e incentivadora de projetos, visto que foi o precursor da idéia de criação do MDL. O reflexo desses esforços é evidenciado a cada nova atualização das estatísticas. De acordo com divulgação do MCT (BRASIL, 2010b), de um total mundial de 6245 projetos (em alguma fase do ciclo de projetos), o Brasil ocupa o 3º lugar em número de atividades de projeto, com 453 projetos (7 %), sendo que em primeiro lugar encontra-se a China com 2355 (38 %) e, em segundo, a Índia com 1661 projetos (27 %). Em termos do potencial de reduções de emissões associado aos projetos no ciclo do MDL, o Brasil ocupa também a terceira posição, sendo responsável pela redução de aproximadamente 400 milhões de tCO₂e. Isto corresponde a 5 % do total mundial, para o primeiro período de obtenção de créditos, que pode ser de no máximo 10 anos para projetos de período fixo ou de sete anos para projetos de período renovável (os projetos são renováveis por no máximo três períodos de sete anos dando um total de 21 anos). A China ocupa o primeiro lugar (47 %), seguida pela Índia (23 %) nesse ranking.

No que se refere à distribuição das atividades de projeto por tipo de gás no Brasil, este mesmo relatório do MCT (BRASIL, 2010b) aponta que a participação mais relevante hoje diz respeito ao gás carbônico (65 %), seguido pelo metano (34 %) e pelo óxido nitroso (1,1 %).

Isto ocorre devido à predominância das atividades de projeto no setor energético como evidencia a Tabela 5.

Tabela 5 - Atividades de projeto no Brasil por escopo setorial.

Projetos em Validação/Aprovação	Número de Projetos	Redução Anual de Emissão (tCO₂e)	Redução de emissão 2008-2012 (tCO₂e)	Número de Projetos (%)	Redução Anual de Emissão (%)	Redução de emissão 2008-2012 (%)
Energia Renovável	228	19625226	146091126	50,30	39,90	37,50
Aterro Sanitário	36	11327606	84210095	7,90	23,00	21,60
Redução de N₂O	5	6373896	44617272	1,10	13,00	11,50
Suinocultura	75	4194441	38998139	16,60	8,50	10,00
Troca de combustível fóssil	45	3296291	27630240	9,90	6,70	7,10
Eficiência energética	28	2027173	19853258	6,20	4,10	5,10
Reflorestamento	2	434438	13033140	0,40	0,90	3,30
Processos Industriais	14	1002940	7449083	3,10	2,00	1,90
Resíduos	17	646833	5002110	3,80	1,30	1,30
Emissões fugitivas	3	269181	2564802	0,70	0,50	0,70
Total	453	49198025	389449265	100,00	99,90	100,00

Fonte - BRASIL, 2010b.

A Tabela 5 mostra ainda que os escopos que mais prevêm redução de emissões de CO₂e são os de energia renovável, aterro sanitário e redução de N₂O, que representam juntos 71 % do total de emissões de CO₂e a serem reduzidas no primeiro período de obtenção de créditos, ou seja, um potencial de redução de emissões de 274918493 tCO₂e. Vale ressaltar que a maioria dessas atividades de projeto tem como tipo de metodologia a larga escala, 57 % em relação à pequena escala (43 %).

Em termos de concentração geográfica, o MCT (BRASIL, 2010b) verificou que quatro estados brasileiros (SP, MG, RS, SC) concentram juntos 57 % do total de projetos registrados no Brasil, sendo a região Sudeste predominante em número de projetos devido à posição dos Estados de São Paulo e de Minas Gerais, com 22 % e 16 % respectivamente.

Os dados anteriores revelam um cenário favorável ao desenvolvimento de projetos de MDL, pois o Brasil coloca-se competitivamente como um importante ator, em nível mundial, principalmente do ponto de vista institucional, devido à criação de leis e diversas instâncias que regulamentam e operacionalizam o funcionamento do mecanismo. Entretanto, na prática, existem apenas cinco projetos de MDL brasileiros registrados no IPCC aplicados a efluentes

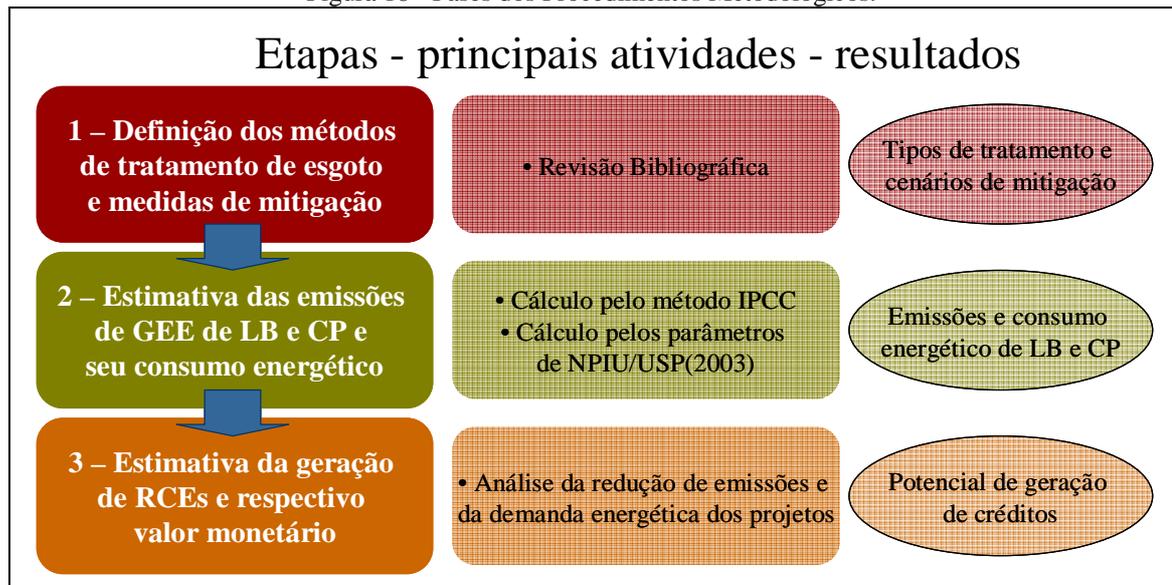
industriais (todos com a metodologia AMS – III.I) e; não há nenhum projeto registrado envolvendo esgoto doméstico, também considerando seu desenvolvimento em território nacional (dados obtidos em <<http://cdm.unfccc.int/Projects/projsearch.html>>, na data 15/02/2012). Os projetos aprovados junto à autoridade brasileira e as respectivas metodologias adotadas são:

- 2008- Projeto de Evitação de Metano no Tratamento de Efluentes da Irani (AMS-III.I);
- 2009- Avelino Bragagnolo – Tratamento de Efluentes usando Sistema Aeróbio (AMS-III.H e AMS-III.I);
- 2010- Projeto JBS S/A - Tratamento aeróbio de Águas Residuais de Matadouro - Unidade de Vilhena (AMS-III.I);
- 2010- Projeto JBS S/A - Tratamento aeróbio de Águas Residuais de Matadouro - Unidade de Barra do Garças (AMS-III.I); e
- 2012- Redução de emissões de GEE do tratamento de esgoto industrial melhorado em Embaré, Lagoa da Prata, MG (AMS-III.H).

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A estratégia metodológica adotada nesse estudo se divide em três etapas (Figura 18) que são descritas a seguir.

Figura 18 - Fases dos Procedimentos Metodológicos.



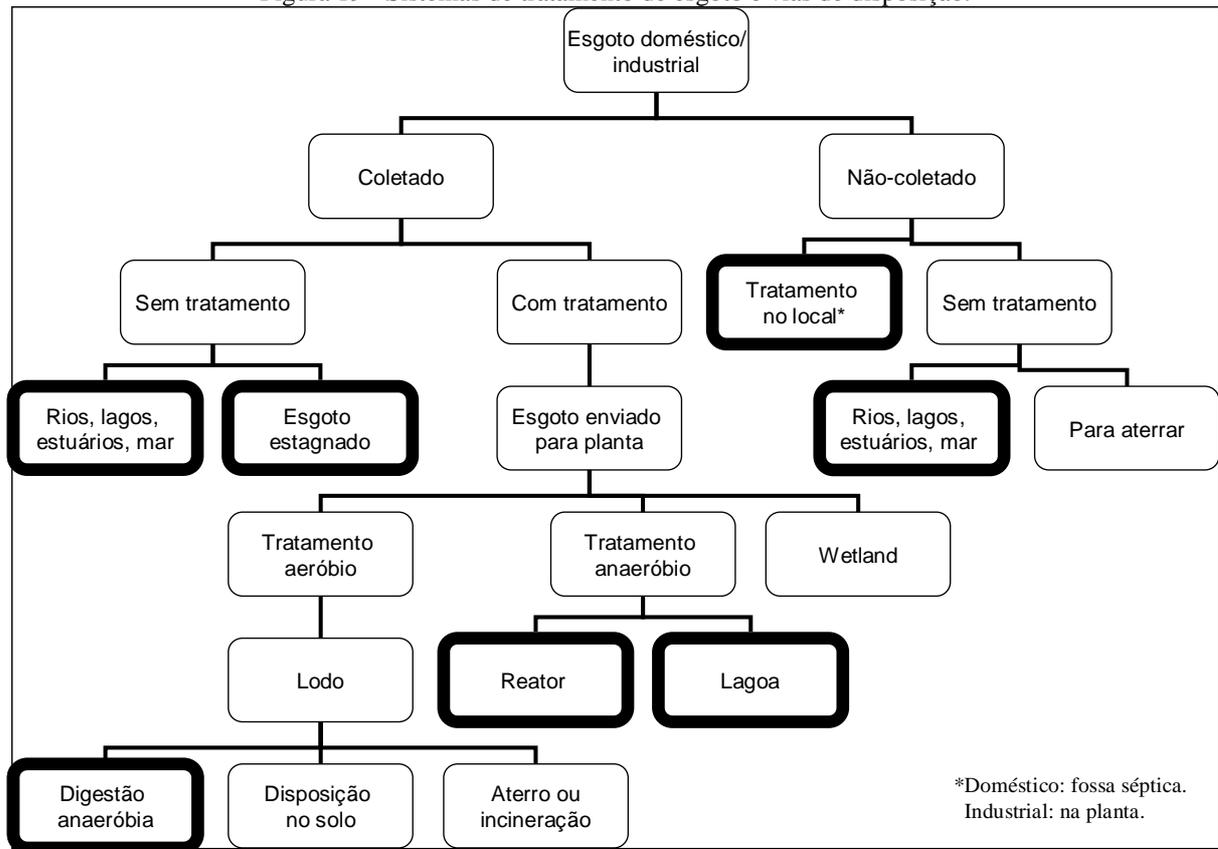
Fonte - Elaborado pelo autor, 2011.

4.1 DEFINIÇÃO DAS FORMAS DE TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO DE ESGOTO E ESCOLHA DOS CENÁRIOS DE MITIGAÇÃO

A seleção dos processos de tratamento e disposição final de esgoto sanitário foi embasada em dois critérios: produção de GEE e ocorrência no Brasil. Este procedimento ocorreu por meio de três etapas. Primeiro, foi realizado um levantamento bibliográfico, cuja base foram os autores Metcalf e Eddy (2003), a série de livros de Von Sperling (1986, 1996, 2002, 2005) e a publicação da CETESB (SÃO PAULO, 1977), buscando abranger todos os tipos de tratamento de esgoto físicos, químicos e biológicos.

Num segundo momento, sobre essa gama de opções foi feita uma triagem dos sistemas que são potencialmente emissores de GEE (metano e óxido nitroso), com base nos relatórios e inventários do IPCC (1996, 2001, 2006, 2007), e estes formaram um subgrupo. As opções sugeridas pelo IPCC como fontes potenciais de emissão do gás estufa metano no setor de tratamento de efluentes (domésticos e industriais) estão em destaque na Figura 19.

Figura 19 - Sistemas de tratamento de esgoto e vias de disposição.



Fonte - IPCC, 2006b.

Como pode ser visto em destaque na Figura 19, os processos que tem potencial de produzir CH_4 são disposição em corpos d'água (com e sem coleta), reatores e lagoas anaeróbios e tanques sépticos.

Além das informações anteriores, a escolha dos tipos de tratamento emissores de GEE foi fundamentada nos dados do Quadro 5, que contempla os potenciais emissores de metano e óxido nitroso em processos usuais tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento.

Quadro 5 - Potenciais de emissões de CH₄ e N₂O para os processos de tratamento e disposição de esgoto e lodo.

Tipos de tratamento e disposição		Emissões potenciais de CH₄ e N₂O		
Esgoto coletado	<i>Sem tratamento</i>	Disposição em rios	Estagnado, rios e lagos com deficiência de oxigênio podem provocar decomposição anaeróbia e produzir CH ₄ .	
		Esgoto (em canal fechado)	Não é considerado fonte de CH ₄ /N ₂ O.	
		Esgoto (canal aberto)	Estagnado, esgoto com sobrecarga orgânica ou valas/canais são possíveis fontes (significativas) de CH ₄ .	
	<i>Com tratamento</i>	Tratamento aeróbio	Planta de tratamento aeróbio centralizada	Pode produzir CH ₄ provenientes de bolsões anaeróbios. Sistemas aeróbios mal gerenciados/projetados podem produzir CH ₄ . Plantas de tratamento avançado com remoção de nutrientes (nitrificação e desnitrificação) são poucas mas emitem N ₂ O.
			Tratamento anaeróbio de lodo em plantas de tratamento aeróbio	O tratamento de lodo pode ser fonte significativa de CH ₄ se o gás emitido não for recuperado e queimado.
			Lagoas aeróbias pouco profundas	Fonte pouco provável de CH ₄ /N ₂ O. Sistemas aeróbios mal gerenciados/projetados produzem CH ₄ .
		Tratamento anaeróbio	Lagoas anaeróbias	É uma provável fonte de CH ₄ . Não é uma fonte de N ₂ O.
			Reatores anaeróbios	Pode ser uma fonte significativa de emissão de CH ₄ se este gás não for recuperado e queimado.
	Esgoto não-coletado	Tanques sépticos		A remoção de sólidos com frequência reduz a produção de CH ₄ .
		Tanques abertas ou latrinas		Fossa abertas são passíveis de produzir CH ₄ quando a temperatura e o tempo de retenção são favoráveis.
Disposição em rios		Conferir acima.		

Fonte - IPCC, 2006b.

Do Quadro 5, observou-se que as emissões de óxido nitroso podem ocorrer em estações de tratamento ou pela disposição de águas residuárias em corpos d'água. Segundo IPCC (IPCC, 2006b), emissões diretas da nitrificação (via aeróbia) e desnitrificação (via anóxica) em ETEs são consideradas fonte minoritária se comparadas com as indiretas e podem ser apenas de interesse de países desenvolvidos que têm avançadas estações de tratamento de esgotos, em grau terciário. Por esta razão, o IPCC assume que a maior emissão do nitrogênio no setor de esgotos, principalmente em países em desenvolvimento, ocorre pela

nitrificação e desnitrificação em estuários e rios, ou seja, adota que em geral não há remoção significativa de nitrogênio durante o tratamento secundário em si. Entretanto, as pesquisas encontradas na área não são conclusivas nesse sentido e sugerem que a emissão de N_2O de processos aeróbios também pode ser significativa. Por isso, este trabalho contempla as formas de emissão direta e indireta de N_2O do tratamento de esgotos.

Na terceira etapa, tendo como referências o trabalho de Salvador (2010) e o estudo da CETESB (2010), foram escolhidos -dentro do subgrupo de processos com potencial de lançar gases estufa- os principais tipos de tratamento e disposição de esgoto doméstico empregados no Brasil. Este conjunto final é apresentado na subseção de Estimativa, juntamente com os valores de MCF adotados. É importante destacar que a Figura 19 e o Quadro 5 mostram a lançamento em rios como um destino para esgoto in natura. Todavia, o esgoto tratado também pode ter esta destinação. Assim, este trabalho considerou esta hipótese (os esgotos tratados são lançados em corpos d'água) para o desenvolvimento dos cálculos.

No que se refere à seleção das alternativas para mitigação no setor, esta foi efetuada com base nas medidas contidas nas duas metodologias de projetos de MDL mais empregadas atualmente, a AMS III.H e AMS III.I (descritas na Revisão Bibliográfica na seção 3.6.1). As propostas foram sintetizadas e sistematizadas em dois cenários:

A) Substituição de um processo anaeróbio por um aeróbio. Medida aplicada para o caso de sistemas individuais anaeróbios abertos no cenário de linha de base, pois estes dificultam a coleta de gases como as lagoas; e

B) Introdução de tecnologias de recuperação e combustão do biogás, como flares, em sistemas individuais existentes de tratamento anaeróbio, com volume definido, ambiente fechado e controlado (reatores). Neste caso, o sistema gera dióxido de carbono em vez de metano, e como já dito, o CO_2 não é contabilizado. Optou-se por não projetar os usos futuros do biogás (fins energéticos). Isto porque, a descrição da medida contida na metodologia de projeto não propõe sugestões nesse sentido e de acordo com o uso final, cada RCE pode ser relatada em uma categoria diferente.

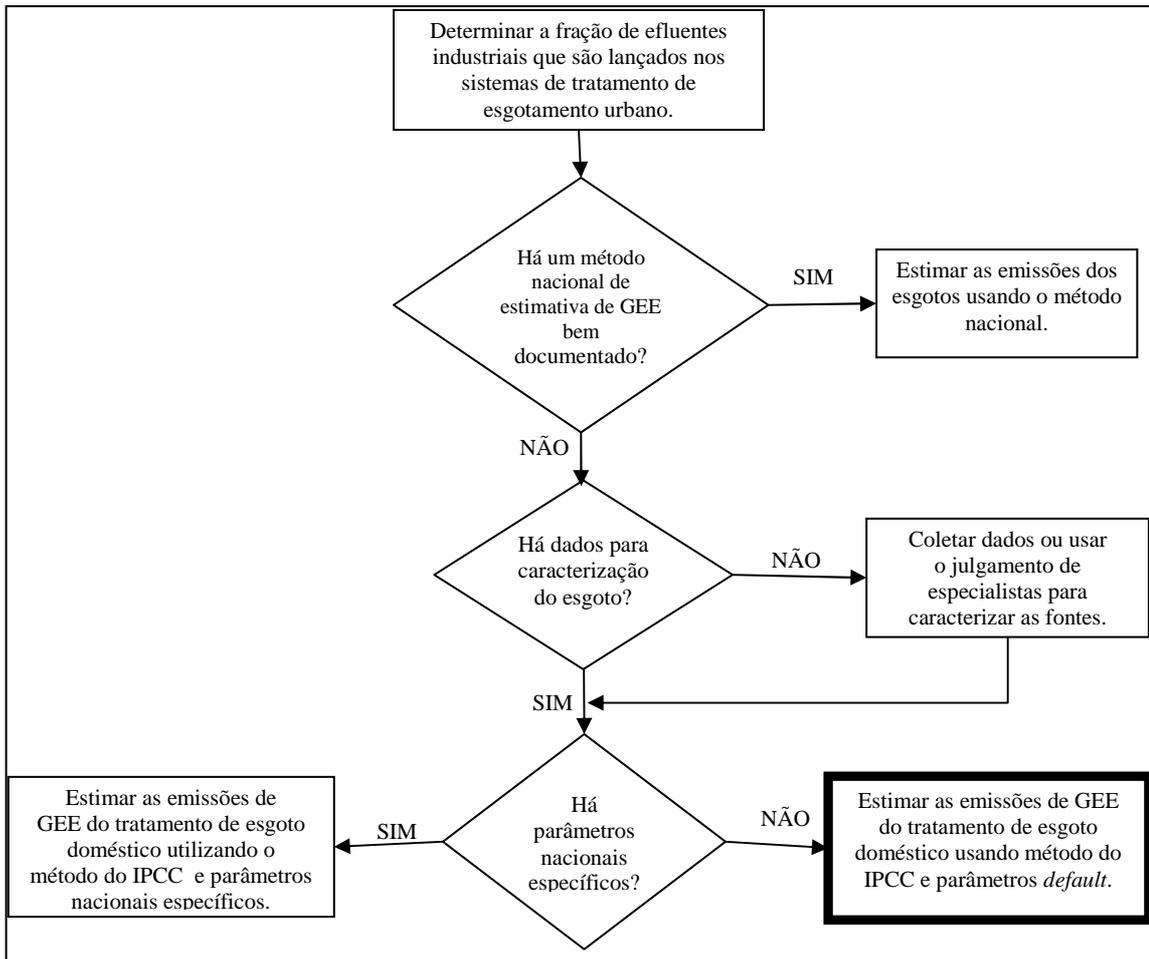
No que se refere às associações de processos, o critério utilizado para escolha do cenário A ou B, foi o volume de emissão de GEE dos sistemas isolados, conforme a estimativa de linha de base. Desta forma, os processos que individualmente tinham maior contribuição dentro de cada arranjo foram escolhidos para serem representativos do conjunto; e em seguida substituídos ou não no cenário de projeto, se fossem definidos como sistema aberto ou fechado, respectivamente.

Os critérios anteriores, bem como os parâmetros para estimativa a seguir, foram selecionados a fim de maximizar as emissões da linha de base e a produção de RCEs do cenário de projeto e assim mostrar o potencial, ou seja, as máximas possibilidades do setor. A escolha fundamentada na característica do processo anaeróbio, volume aberto ou fechado, foi devido a viabilidade e facilidade em implantar a tecnologia de recuperação do biogás. Sob essa perspectiva, sistemas puramente aeróbios (lagoas aeradas e filtros aeróbios) não foram considerados como fonte significativa de geração de RCEs, devido ao metabolismo microbiano envolvido produzir basicamente CO₂ e água. Desta forma, suas emissões da linha de base foram estimadas, mas com relação às medidas mitigadoras, recomendou-se melhorias operacionais.

4.2 ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE GEE E CONSUMO DE ENERGIA DA LINHA DE BASE E DO CENÁRIO DE PROJETO

A estimativa das emissões de GEE do tratamento de esgoto foi embasada em diretrizes do IPCC, ilustradas na Figura 20.

Figura 20 - Árvore de decisão para estimativa das emissões de GEE pelo tratamento de efluente doméstico.



Fonte - Adaptado de IPCC, 2000.

Conforme a Figura 20, as seguintes condições foram adotadas no presente trabalho: as frações de efluentes industriais foram desconsideradas na estimativa, pois não se tem essa informação; não há um método nacional de estimativa consolidado e bem documentado; nem todos parâmetros exigidos para o cálculo estão disponíveis no país (o que requer a aplicação de dados *default*); e a caracterização das fontes de esgoto foi feita por meio de valores-padrão médios. Com isso e a partir das recomendações da árvore de decisão, estimou-se as emissões de gases estufa do tratamento do esgoto na presença e ausência do projeto de MDL conforme o procedimento (em destaque na Figura 20) descrito nas metodologias AMS-III.H (versão 10) e AMS-III.I (versão 7).

É importante ressaltar que essas metodologias apresentam procedimentos específicos para cada situação de projeto. Nesse sentido, as AMS são constituídas de várias componentes como as emissões do metano produzido pela decomposição anaeróbia do lodo final e as emissões decorrentes de eletricidade ou consumo de combustível, dentre outras. Neste trabalho, devido a elevada quantidade de tipos de tratamento de esgoto abordados, optou-se por verificar a viabilidade dos projetos por meio da análise de dois parâmetros: as emissões de GEE (N_2O e CH_4) e o consumo de energia.

Com relação ao cálculo das emissões de óxido nitroso, adotou-se o modelo indicado unicamente pelo IPCC (2006b), já que não existem metodologias de projeto de MDL recomendadas pela CQNUMC neste caso. Portanto, só foi possível estimar a linha de base.

Desta forma, as emissões, tanto para a linha de base como para o cenário de projeto, foram calculadas da seguinte forma:

$$E_y = E_{CH_4,y} + E_{N_2O,y} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

E_y = emissões de GEE (CH_4 e N_2O) oriundas do processo de tratamento no ano y [tCO_2e/ano];

$E_{CH_4,y}$ = emissões totais de metano no ano y [tCO_2e/ano];

$E_{N_2O,y}$ = emissões totais de óxido nitroso no ano y [tCO_2e/ano].

4.2.1 Estimativa das emissões de metano ($E_{CH_4,y}$)

O modelo matemático a ser empregado para a linha de base e para o cenário de projeto está descrito na Equação a seguir.

$$E_{CH_4,y} = E_{ww,treatment,y} + E_{ww,discharge,y} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

$E_{CH_4,y}$ = emissões totais de metano no ano y [tCO₂e/ano];

$E_{ww,treatment,y}$ = emissões de metano do sistema de tratamento anaeróbio ou aeróbio de esgoto no ano y [tCO₂e/ano];

$E_{ww,discharge,y}$ = emissões de metano devido ao lançamento do esgoto em corpos d'água no ano y [tCO₂e/ano].

a) Sistemas de tratamento ($E_{ww,treatment,y}$)

As emissões de metano dos sistemas de tratamento de esgoto ($E_{ww,treatment,y}$) são determinadas com o uso do potencial de geração de metano conforme a equação 3:

$$E_{ww,treatment,y} = Pop * D_{dom,y} * MCF * B_o * UF * GWP_{CH_4} \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

$E_{ww,treatment,y}$ = emissões de metano do sistema de tratamento anaeróbio ou aeróbio de esgoto no ano y [tCO₂e/ano];

Pop = população atendida no ano y (1000) [habitantes];

$D_{dom,y}$ = componente orgânico degradável do efluente doméstico afluente ao sistema de tratamento no ano y [kgDBO/pessoa/ano];

MCF = fator de correção de metano para os sistemas de tratamento de águas residuárias (valores do MCF de acordo com a Tabela 6);

B_o = capacidade de produção de metano das águas residuárias (*default* 0,60 kgCH₄/kgDBO);

UF = fator de correção para contabilizar as incertezas do modelo (0,94 para sistemas anaeróbios e para sistemas aeróbios 1,06);

GWP_{CH_4} = potencial de aquecimento global do metano (valor de 21).

População - Pop

Foi definida para as estimativas uma população de um mil habitantes a fim de contemplar desde o uso do tanque séptico até os sistemas projetados para comunidades maiores.

Componente orgânico degradável do efluente doméstico - D_{dom}

Para $D_{dom,y}$ foi utilizado o valor indicado para o estado de São Paulo de 54 gDBO/hab/dia ou 19,71 kgDBO/hab/ano, conforme recomenda a NBR12209/92.

É importante destacar que a D_{dom} pode aumentar devido ao lançamento de efluentes industriais nos sistemas de esgotamento urbano ou também pode se reduzir por infiltrações pluviais no esgoto. Todavia, esses dados serão estimados nulos, pois não há informação a respeito.

O principal fator que determina a geração de metano é a quantidade de material orgânico degradável no esgoto. A concentração de DBO representa apenas a fração de carbono que é biodegradável aerobicamente e esta medida padrão da DBO é feita num período de 5 dias (DBO_5). O período de tempo utilizado na DBO indica que somente materiais facilmente biodegradáveis são contabilizados. Desta maneira, a DQO (que mede todo material disponível para oxidação, biodegradável ou não) é mais apropriada para a determinação dos componentes orgânicos em efluentes de modo geral do que a DBO. Todavia, ambas as tipologias de tratamento (aeróbio e anaeróbio) e os tipos de bactérias presentes no esgoto influenciam na concentração de DBO dos efluentes. Assim, apesar de a DBO ser o parâmetro mais utilizado, o fator DQO/DBO pode ser usado para determinar a DQO se a DBO é conhecida (IPCC, 1996). Geralmente, a DBO é utilizada para esgotos domésticos e a DQO para efluentes industriais, conseqüentemente, neste trabalho optou-se pela DBO.

Capacidade máxima de produção de metano – B_o

O IPCC recomenda adotar 0,25 kgCH₄/kgDQO para B_o , embasado em estudos teóricos. Mas também é possível utilizar o valor em DBO, pois é sabido que o carbono degradável do esgoto doméstico típico possui um valor de DQO (mg/L) de 2 a 2,5 maior que o valor de DBO (mg/L). Para assegurar que o resultado da estimativa é representativo da medida de carbono orgânico utilizada, o valor-base da DQO de B_o deve ser convertido para um valor-base de DBO por meio do valor de maior segurança. Assim, foi utilizado o *default* igual a 0,60 kgCH₄/kgDBO.

Existe a possibilidade de calcular B_o separadamente para o lodo. Entretanto, o IPCC recomenda esta distinção somente para países que coletam o lodo separadamente. Essa separação não altera a estimativa final, a menos que o país tenha valores de B_o específicos

para o lodo e para o esgoto. Como esta prática não é comum no Brasil, adotou-se o valor que considera a coleta conjunta (0,6 kgCH₄/kgDBO).

Observação: Dependendo de como o lodo é tratado, as emissões não fazem parte deste cálculo, como por exemplo, biossólidos enviados aos aterros ou para a agricultura, sendo assim relatados em sua respectiva categoria-fonte.

Fator de correção de metano - MCF

O valor de MCF indica o grau de potencial de produção de metano em cada sistema de tratamento. Os tipos de processos e arranjos foram selecionados por meio de uma análise dos trabalhos da CETESB (SÃO PAULO, 2001, 2010, 2011) e de Salvador (2010) e estão dispostos na Tabela 6 com os valores de MCF aplicados nesta pesquisa.

Tabela 6 - Fatores de conversão de metano - MCF (valores *default*) adotados.

SIGLA	Tipos de tratamento ou vias de disposição de esgoto doméstico	MCF adotado*
	Unidade	Adimensional
BAS	Biofiltro Aerado Submerso	0,1
FB	Filtro Biológico (Baixa Carga)	0,1
FB	Filtro Biológico (Alta Carga)	0,1
FBAn	Filtro Biológico Anaeróbio	0,8
TS	Tanque Séptico. Metade da DBO é estabilizada no tanque anaeróbio.	0,5
Laer	Lagoa Aerada (maior que 2 metros)	0,1
LaerF	Lagoa Aerada Facultativa (maior que 2 metros)	0,2
LAn	Lagoa Anaeróbia (maior que 3 metros)	0,6
LFac	Lagoa Facultativa (menor que 2 metros)	0,2
DigAn	Digestor Anaeróbio de lodo. Adotado em LAC.	0,7/0,75
LAC	Lodos Ativados Convencional (Tanque de aeração). Não é bem operada. Sobrecarregada	0,3
LAAP	Lodos Ativados Aeração Prolongada (Tanque de aeração). Não é bem operada. Sobrecarregada	0,3
LAB	Lodos Ativados por Batelada (Fluxo Intermitente) (Tanque de aeração). Não é bem operada. Sobrecarregada	0,3
RAFA**	Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente	0,75
RAC	Reator Anaeróbio Compartimentado	0,7
WL	Wetlands (Terras Úmidas)	0,1
Dis	Disposição em mares, rios e lagos. Rios com alta carga orgânica podem se tornar anaeróbios.	0,1

Fonte - IPCC, 2006b e Salvador, 2010.

*O MCF é equivalente à eficiência de remoção de DBO para os sistemas estritamente anaeróbios. Assim, para FBAn, LAn, RAC e RAFA foram adotados valores mais próximos da realidade nacional, indicados em Salvador (2010). Para os demais processos foram utilizados os *default* IPCC.

** O RAFA foi considerado, neste trabalho, como um reator anaeróbio sem queima de CH₄ e com baixa eficiência ou nula captura de biogás.

Para as situações em que foi aplicado o Cenário de mitigação B, foi subtraído o metano recuperado (representado pelo parâmetro R) do total de emissões conforme recomenda a metodologia. No caso de projetos que utilizem flares abertos deve-se adotar 50% como eficiência de combustão do CH₄. Já em flares fechados, se não houver análise dos gases de exaustão, a eficiência padrão do flare é de 90%. Entretanto, se houver a análise dos gases de exaustão, que envolve a instalação de equipamentos de custos elevados, a eficiência do flare real deve ser determinada continuamente (CGEE, 2010). Por isso, este trabalho, visando

maximizar o número de RCEs geradas, optou pela eficiência de recuperação de gás de 100% e de combustão de 90%.

b) Destinação final ($E_{wwdischarge,y}$)

As emissões de CH₄ provenientes da disposição em rios, mares ou lagos são decorrentes da ineficiência no tratamento, que permite ainda a presença de carbono orgânico degradável nas águas residuárias já tratadas. Estas foram determinadas da seguinte forma:

$$E_{wwdischarge,y} = Pop * D_{dom,discharge,y} * MCF * B_o * UF * GWP_{CH_4}$$

Equação (4)

Onde:

$E_{ww,discharge,y}$ = emissões de metano devido ao lançamento do esgoto em corpos d'água no ano y [tCO₂e/ano].

Pop = população atendida no ano y [1000 habitantes];

$D_{dom,discharge,y}^2$ = componente orgânico degradável do efluente doméstico tratado disposto no mar, rio ou lago no ano y [kgDBO/pessoa/ano];

MCF = fator de correção do metano baseado na forma de disposição (mar, rio ou lago) das águas residuárias (valor do MCF de acordo com a Tabela 6);

B_o = capacidade de produção de metano das águas residuárias (*default* 0,60 kgCH₄/kgDBO);

UF = fator de correção do modelo para contabilizar as incertezas do modelo (0,94 para sistemas anaeróbios e 1,06 para sistemas aeróbios).

4.2.2 Estimativa das emissões de óxido nitroso ($E_{N_2O,y}$)

A metodologia escolhida (IPCC, 2006) inclui o cálculo para estimar o nitrogênio removido com o lodo, o nitrogênio não-consumido do esgoto doméstico, e as emissões de estações com tratamento avançado. Desta maneira, ela baseia-se no consumo anual de proteína por pessoa, um dado característico e específico de cada localidade ou país, seguindo o modelo a seguir:

² Este foi obtido considerando a eficiência de remoção de DBO de cada processo/sistema de tratamento indicadas em Salvador (2010).

$$E_{N_2O,y} = E_{plants,y} + E_{discharge,y} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

$E_{N_2O,y}$ = emissões totais de óxido nitroso no ano y [tCO₂e/ano];

$E_{plants,y}$ = emissões oriundas da planta de tratamento no ano y [tCO₂e/ano];

$E_{discharge,y}$ = emissões provenientes do lançamento em corpos d'água no ano y [tCO₂e/ano].

O IPCC (2006) recomenda que as emissões diretas ($E_{plants,y}$) sejam estimadas apenas para processos de tratamento com etapas de nitrificação e desnitrificação. Assim, foi feito este cálculo para o processo de lodos ativados e filtros biológicos, que podem possuir essa característica.

$$E_{plants,y} = Pop * F_{IND-COM} * EF_{PLANT} * GWP_{N_2O} \quad \text{Equação (6)}$$

Onde:

$E_{plants,y}$ = emissões totais de N₂O de ETEs no ano y [tCO₂e/ano];

Pop = população atendida no ano y [1000 habitantes];

$F_{IND-COM}$ = fração da proteína comercial e industrial co-disposta, adotado *default* = 1.25 [adimensional];

EF_{PLANT} = fator de emissão da estação de tratamento, adotado *default* 0,0032 [kgN₂O/pessoa/ano];

GWP_{N_2O} = potencial de aquecimento global do óxido nitroso (valor de 310).

No que se refere às emissões indiretas de N₂O ($E_{discharge,y}$) do tratamento de águas residuárias que são descarregadas em ambientes aquáticos, a equação geral para o cálculo é a seguinte:

$$E_{discharge,y} = N_{EFFLUENT} * EF_{EFFLUENT} * 44/28 * GWP_{N_2O} \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

$E_{discharge,y}$ = emissões de N₂O oriundas da disposição em rio/mar/lago no ano [tCO₂e/ano];

$N_{EFFLUENT}$ = quantidade de nitrogênio lançada no meio aquático [kgN/ano];

$EF_{EFFLUENT}$ = fator de emissão do esgoto lançado no corpo d'água [kgN₂O-N/kgN].

O fator 44/28 converte de kgN₂O-N para kgN₂O.

$EF_{EFFLUENT}$

O valor default do IPCC para o $EF_{EFFLUENT}$ de efluentes de origem doméstica é 0,005 (0,0005 a 0,25) kgN₂O-N/kgN. Este valor foi obtido com base em dados de campo limitados de estuários e rios e em 2 suposições: a) todo o nitrogênio é lançado no corpo d'água com o esgoto, e b) a produção de óxido nitroso nesses ambientes é de origem exclusiva da ocorrência da nitrificação e desnitrificação (IPCC, 2006b).

 $N_{EFFLUENT}$

A quantidade anual de nitrogênio no esgoto é estimada pela Equação 8.

$$N_{EFFLUENT} = (\text{Pop} * \text{Protein} * F_{NPR} * F_{NON-CON} * F_{IND-COM}) - N_{SLUDGE}$$

Equação (8)

Onde:

$N_{EFFLUENT}$ = total anual de nitrogênio no esgoto por ano [kgN/ano];

Pop = população atendida por ano (1000) [habitantes];

Protein = consumo anual de proteína por pessoa, adotado 84 g/pessoa/dia [kg/pessoa/ano] (FAO, 2004);

F_{NPR} = fração de nitrogênio na proteína, adotado *default* 0,16 [kgN/kg proteína];

$F_{NON-CON}$ = fator para a proteína não-consumida lançada no esgoto [adimensional];

$F_{IND-COM}$ = fator para a proteína de origem industrial e comercial lançada no esgoto [adimensional];

N_{SLUDGE} = nitrogênio removido com o lodo, adotado *default* zero [kgN/ano].

Como as emissões diretas de N₂O ($E_{plants,y}$) foram calculadas, o nitrogênio associado às emissões de ETES (N_{WWT}) foi subtraído da quantia de $N_{EFFLUENT}$. O valor de N_{WWT} foi calculado através da multiplicação de $E_{plants,y}$ por 28/44 (utilizando os pesos moleculares).

A produção per capita de proteína (*Protein*) está relacionada com as características de consumo da população, e este dado é fornecido pela *Food and Agriculture Organization-FAO* (2004).

A respeito das demais variáveis, a proteína “não-consumida” ($F_{NON-CON}$) e a proteína industrial lançada no sistema de esgoto; destaca-se que o alimento (ou resíduo) que não é consumido nas residências pode ser lavado pelo ralo (por exemplo, como resultado do uso de

trituradores de lixo em alguns países desenvolvidos) e também, banho de água e roupas podem contribuir para cargas de nitrogênio. Para os países desenvolvidos utilizando trituradores de lixo, o padrão para a proteína não-consumida descarregados para percursos de águas residuais é de 1,4, enquanto que para os países em desenvolvimento - situação desta pesquisa - esta fração é de 1,1. Já os despejos de fontes industriais ou comerciais lançados no esgoto também podem conter proteínas ($F_{IND-COM}$) (por exemplo, das mercearias). Assim, o default (IPCC, 2006) para essa fração é de 1,25.

4.2.3 Estimativa do consumo energético

A demanda energética do projeto de tratamento de esgoto foi obtida através da multiplicação da potência consumida (kWh/hab.ano) por cada sistema pela população de projeto (1000 habitantes). Os valores de potência utilizados para cálculo foram encontrados em NPIU/USP (2003) citado em Salvador (2010).

4.3 GERAÇÃO DE RCES E SEU RESPECTIVO VALOR MONETÁRIO

Uma vez estimadas as emissões dos cenários de referência e cenários de projeto, foram calculadas as reduções das emissões de GEE através da diferença entre eles. Desta maneira, realizou-se a conversão das toneladas de CO₂e reduzidas pela implantação da medida mitigadora para os créditos de carbono ou RCes (cada tonelada de carbono corresponde a uma RCE). Por fim, as RCes foram valoradas monetariamente através da multiplicação do preço unitário da tonelada de carbono pelo total de emissões de cada processo. Adotou-se a cotação de carbono €4,19/tCO₂e e o valor do Euro de R\$2,35, divulgados respectivamente pela Bolsa do Clima Européia ou *ECX- European Climate Exchange* (<https://www.theice.com/productguide/ProductGroupHierarchy.shtml?groupDetail=&group.groupld=19>) e BM&FBOVESPA - Bolsa de Valores de São Paulo e Bolsa de Mercadorias & Futuros (<http://www.bmfbovespa.com.br>), relativos ao dia 5 de janeiro de 2012.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos cálculos das emissões de GEE obtidos por meio da metodologia descrita anteriormente são: a estimativa das emissões de metano e óxido nitroso de dois cenários, linha de base (LB) e cenário de projeto (CP), para os sistemas de tratamento e formas de disposição de esgotos domésticos mais usuais no Brasil; as RCEs (créditos de carbono) geradas, seu respectivo valor monetário e o consumo de energia em cada caso. Estes são apresentados e discutidos nas próximas seções, e seus cálculos são detalhados nos Apêndices A e B.

5.1 ESTIMATIVA DE EMISSÕES DOS PROCESSOS DE TRATAMENTO

5.1.1 Linha de Base

O total das emissões de GEE (E_y), em tCO₂e, de cada cenário de referência, constituído pelas emissões de metano ($E_{CH_4,y}$ ³) dos processos de tratamento e da disposição em corpos d'água, e pelas emissões de óxido nitroso diretas e indiretas ($E_{N_2O,y}$), bem como a medida de mitigação proposta para atividade de projeto são apresentados na Tabela 7.

³ $E_{CH_4,y}$ representa as emissões diretas e indiretas de metano. Entretanto, a partir daqui (seção de Resultados e Discussão) a variável $E_{CH_4,y}$ será referenciada neste trabalho como sendo as emissões de metano dos processos/sistemas de tratamento. Isto foi feito a fim de facilitar o desenvolvimento da discussão e devido ao fato de $E_{ww,discharge,y}$ ser pouco expressivo em comparação com $E_{ww,treatment,y}$, além de inerente ao manejo de efluentes.

Tabela 7 - Emissões de linha de base e cenários de mitigação adotados (pop=1000 hab).

Linha de base	$E_{CH_4,y}$	$E_{N_2O,y}$	E_y	Cenário de mitigação A ou B*
	tCO ₂ e/ano	tCO ₂ e/ano	tCO ₂ e/ano	
BAS	30,27	16,43	46,70	**
FB (baixa carga)	28,17	17,67	45,83	**
FB (alta carga)	28,96	17,67	46,62	**
FBA_n	170,42	16,43	186,84	A
TS	142,15	16,43	158,58	A
Laer	30,27	16,43	46,70	**
LaerF	56,60	16,43	73,03	A
LAn	149,40	16,43	165,83	A
LFac	56,60	16,43	73,03	A
LAC	80,29	16,43	96,72	**
LAAP	79,50	17,67	97,17	**
LAB	80,29	16,43	96,72	**
RAFA	180,92	16,43	197,35	B
RAC	170,42	16,43	186,84	B
WL	30,27	16,43	46,70	A

Fonte - Elaborado pelo autor.

* O cenário de projeto/mitigação A representa a substituição de um processo anaeróbio por um aeróbio. Já o cenário B representa a introdução de um mecanismo de captura e queima de gás a um sistema anaeróbio.

** Para estes casos (processos estritamente aeróbios) não se propõe uma mudança de tecnologia, mas o aprimoramento e a otimização de processos e procedimentos de operação e manutenção a fim de alcançar máxima eficiência do sistema.

De acordo com a Tabela 7 e no que se refere às emissões de CH₄, os maiores volumes foram produzidos por processos anaeróbios, com destaque para RAFA, RAC e FBA_n, que geraram mais de 170 tCO₂e/ano cada um. Isto ocorre porque o MCF associado a mecanismos anaeróbios tem valor mais alto devido à condição de operação (ausência de oxigênio) que provoca a ocorrência de reações nas quais um dos produtos é o metano. Outro aspecto importante é a eficiência da remoção de DBO, que determina qual processo, dentre os que funcionam em anaerobiose, emitirá mais ou menos CH₄. Por isso, a lagoa anaeróbia, apesar de ter elevado fator de correção de metano, emite menos em relação aos outros do grupo, pois remove menor quantidade de matéria orgânica (eficiência de 60%) que os demais.

Os processos aeróbios apresentaram baixos volumes de emissão de metano (de 28 a 30 tCO₂e/ano), porque seu MCF é baixo, relacionado ao metabolismo microbiano que emite basicamente gás carbônico e água. Já a LaerF e LFac foram responsáveis por valores intermediários de emissão devido ao seu caráter híbrido. Nessa perspectiva, a estimativa da produção de metano no tanque de aeração de lodos ativados considerou um cenário no qual o

sistema é mal operado e/ou a ETE encontra-se sobrecarregada. Desta forma, o oxigênio foi consumido totalmente no processo aeróbio, criando condições anaeróbias no tanque e gerando metano.

A produção de CH_4 no tanque séptico foi um pouco menor que a dos sistemas anaeróbios, cerca de 142 tCO₂e/ano para 1000 pessoas, em decorrência do fenômeno predominante responsável pelo tratamento do efluente no tanque ser a decantação (ação física). Sendo, os tanques sépticos, reatores de fluxo horizontal, e tendo lodo passivo em relação à fase líquida, o processo biológico que ocorre no esgoto é menos significativo, conseqüentemente, a produção desse gás é menor.

As emissões de óxido nitroso ($E_{\text{N}_2\text{O},y}$) para todos os processos de tratamento e disposição foram praticamente as mesmas (16,4 para FBs e LAAP e 17,6 tCO₂e por ano e para mil pessoas para os demais processos). A diferença ocorreu nos casos em que foram consideradas tanto as emissões diretas, do tratamento em si, quanto às indiretas, da disposição direta em cursos d'água. Esta variação (cerca de uma tonelada de CO₂e ao ano) foi considerada pouco relevante diante do volume das emissões indiretas e de $E_{\text{CH}_4,y}$. Entretanto, quando estes volumes ($E_{\text{N}_2\text{O},y}$) são analisados em relação ao total (E_y), a emissão de N₂O se torna expressiva em alguns casos, representando cerca de 37% de E_y para Laer, FB e WL.

Com relação aos cenários de mitigação, as letras “A” e “B” fazem referência às alternativas expostas nos Procedimentos Metodológicos, na seção 4.1, ou seja, eles representam a substituição de um sistema anaeróbio por um aeróbio e a adição de um queimador de gás, respectivamente. Nesse sentido, para as situações que envolveram processos de tratamento aeróbios (BAS, Laer e FB (alta e baixa taxa)), que não produzem biogás se bem operadas, optou-se por permanecer com a tecnologia. Por isso, para este grupo não foram construídos cenários de projeto e não foram contabilizados créditos de carbono. Além disso, os processos facultativos e/ou híbridos foram considerados anaeróbios (cenário pessimista) nessa análise.

5.1.2 Cenário de Projeto

A seguir (Tabela 8) são mostrados os volumes de emissão gerados de metano, de óxido nitroso e sua soma para os cenários de atividade de projeto de MDL, conforme as alternativas de mitigação (A ou B) indicadas anteriormente.

Tabela 8 - Emissões dos cenários de projeto para os processos (pop 1000 hab).

Linha de base com cenário de mitigação (A ou B)	E_{CH₄,y}	E_{N₂O,y}	E_y
	tCO ₂ e/ano	tCO ₂ e/ano	tCO ₂ e/ano
BAS	n.a.	n.a.	n.a.
FB**	n.a.	n.a.	n.a.
FBA_n (A)	30,27	16,43	46,70
TS (A)	30,27	16,43	46,70
Laer	n.a.	n.a.	n.a.
LaerF (A)	30,27	16,43	46,70
LAn (A)	30,27	16,43	46,70
LFac (A)	30,27	16,43	46,70
LAC	n.a.	n.a.	n.a.
LAAP	n.a.	n.a.	n.a.
LAB	n.a.	n.a.	n.a.
RAFA (B)	23,34	16,43	39,77
RAC (B)	23,34	16,43	39,77
WL (A)	30,27	16,43	46,70

Fonte - Elaborado pelo autor.

*n.a.= Não se aplica.

**FB passa a ser usado no trabalho como sigla para filtro biológico de alta e de baixa taxa, pois as emissões em ambos os casos foram praticamente iguais segundo a Tabela 7.

Os valores de E_{CH₄,y} para o cenário de projeto de MDL mudaram a característica da linha de base no que diz respeito aos líderes de emissões. Com a aplicação da medida mitigadora, os reatores anaeróbios (RAFA e RAC) passaram a emitir menos GEE que os aeróbios, em consequência do mecanismo de captura e queima do metano. Além disso, como não há medidas tecnológicas para reduzir a emissão de N₂O, o cenário de projeto não se alterou em relação à linha de base.

É importante destacar que o cenário de projeto A, aplicado a FBA_n, TS, LFac e LaerF foi construído com condições hipotéticas e parâmetros-padrão, simulando o uso de um sistema aeróbio. Por isso, estes processos tiveram o mesmo resultado de emissões totais, 30,27 tCO₂e/ano/1000pessoas. Para a alternativa B, foram mantidas as variáveis da linha de base, visto que tratou-se apenas da adição de um equipamento, no caso o flare.

5.2 ESTIMATIVA DE EMISSÕES DAS ASSOCIAÇÕES

5.2.1 Linha de Base

A Tabela 9 apresenta os resultados da estimativa de emissão de metano e óxido nitroso para os processos, arranjos e a medida adotada para redução de emissão de GEE.

Tabela 9 - Emissões de LB e mitigação adotada para associações (pop=1000 hab).

Linha de base	Processo		Arranjo		Cenário de Mitigação A ou B
	$E_{CH_4,y}$	$E_{CH_4,y}$	$E_{N_2O,y}$	E_y	
	tCO ₂ e/ano	tCO ₂ e/ano	tCO ₂ e/ano	tCO ₂ e/ano	
TS+FBAn	131,62	200,15	16,43	216,58	A
	65,36				
TS+FBAn+WL	131,62	200,62	16,43	217,05	A
	65,36				
	3,16				
TS+WL	131,62	143,73	16,43	160,16	A
	10,53				
RAFA+LAC+DigAn	175,08	236,74	16,43	253,17	B
	19,74				
	41,58				
RAFA+LAB	175,08	195,16	16,43	211,59	B
	19,74				
RAFA+LAAP	175,08	194,96	17,67	212,63	B
	19,74				
RAFA+FB	175,08	182,13	17,67	199,79	B
	6,58				
RAFA+BAS	175,08	182,65	16,43	199,08	B
	6,58				
RAFA+WL	175,08	182,65	16,43	199,08	B
	6,58				
RAC+LAC+DigAn	163,41	234,07	16,43	250,50	B
	23,69				
	46,57				
RAC+LAB	163,41	187,50	16,43	203,93	B
	23,69				
RAC+LAAP	163,41	187,26	17,67	204,93	B
	23,69				
RAC+FB	163,41	171,86	17,67	189,53	B
	7,90				

RAC+BAS	163,41 7,90	172,49	16,43	188,92	B
RAC+WL	163,41 7,90	172,49	16,43	188,92	B
LAn+LFac	140,07 21,06	162,71	16,43	179,14	A
LAn+LaerF	140,07 21,06	162,71	16,43	179,14	A
LAn+WL	140,07 10,53	152,18	16,43	168,61	A
LAn+Lsed	140,07 21,06	162,71	16,43	179,14	A
LAn+Laer	140,07 10,53	152,18	16,43	168,61	A
LAn+Laer+Lsed	140,07 10,53 3,16	153,99	16,43	170,42	A
LAn+FB	140,07 10,53	151,33	17,67	169,00	A

Fonte - Elaborado pelo autor.

* O reator anaeróbico (RAFA ou RAC) foi utilizado como digestor anaeróbico de lodo (DigAn), por isso foram adotados os mesmos parâmetros em cada caso. Na simbologia foi colocado DigAn a fim de facilitar a compreensão de que o lodo é recirculado para o reator.

** Para as situações em que um dos processos do arranjo é aeróbico (exemplo:RAFA+LAB), adotou-se cenário pessimista, no qual o sistema está sobrecarregado.

As emissões da linha de base das associações refletiram a combinação dos processos, ou seja, dos parâmetros e características dos processos individuais de tratamento. Sob essa perspectiva, a carga orgânica afluyente ao processo seguinte da seqüência foi determinada conforme a eficiência de remoção de DBO do sistema anterior.

A partir da Tabela 9, pôde-se então, constatar que os arranjos com maiores emissões de metano já eram líderes quando analisados individualmente em sua linha de base (como processos na Tabela 7). Nesse sentido, as combinações dos reatores anaeróbicos (RAFA e RAC) com LAC alcançaram volumes de CH₄ entre 234 e 236 tCO₂e/ano, devido a existência de digestão anaeróbia do lodo.

Não obstante, o menor valor de emissão de CH₄ encontrado para associações (143,73 tCO₂e/ano de TS+WL) é cinco vezes superior ao valor mais baixo registrado nas estimativas de linha de base dos processos individuais (20,17 tCO₂e/ano de FBs). Trata-se de um aspecto

relevante já que as combinações de processos refletem melhor a prática ou a realidade do setor.

Nota-se que a emissão de óxido nitroso em comparação com o total de GEE variou entre 6 e 10 % de E_y devido ao volume de emissão de associações ser maior que dos processos individuais, o que representa um valor considerável e fonte de investigação para estudos futuros.

Sobre o cenário de mitigação, a escolha foi baseada na produção de GEE individual, ou seja, aqueles com maior volume de emissão foram considerados representativos do arranjo. A partir daí, sobre as características (aeróbio ou anaeróbio e sistema fechado ou aberto) do processo mais emissor da associação, foi determinada a atividade de projeto (A ou B) segundo mesmo critério utilizado para processos. Desta maneira, para 10 situações foi estabelecida a troca do sistema anaeróbio para o aeróbio (cenário A) e para as demais, a recuperação e queima do biogás, cujas emissões são reportadas a seguir.

5.2.2 Cenário de Projeto

A Tabela 10 mostra as emissões de CH_4 e N_2O , em tCO_2e/ano , para os cenários de atividade de projeto determinados estabelecidos anteriormente.

Tabela 10 - Emissões dos cenários de projeto para associações (pop=1000 hab).

Linha de base com cenário de projeto (A ou B)	Processo		Arranjo	
	$E_{CH_4,y}$	$E_{CH_4,y}$	$E_{N_2O,y}$	E_y
	tCO_2e/ano	tCO_2e/ano	tCO_2e/ano	tCO_2e/ano
TS+FBAn (A)	26,32	30,27	16,43	46,70
TS+FBAn+WL (A)	26,32	30,27	16,43	46,70
TS+WL (A)	26,32	30,27	16,43	46,70
RAFA+LAC+DigAn*(B)	17,51			
	19,74	41,74	16,43	58,17
	4,16			
RAFA+LAB (B)	17,51			
	19,74	37,58	16,43	54,01
RAFA+LAAP (B)	17,51			
	19,74	37,38	17,67	55,05
RAFA+FB (B)	17,51			
	6,58	24,55	17,67	42,22
RAFA+BAS (B)	17,51			
	6,58	25,08	16,43	41,51

RAFA+WL (B)	17,51	25,08	16,43	41,51
	6,58			
RAC+LAC+DigAn* (B)	16,34	45,09	16,43	61,51
	23,69			
	4,66			
RAC+LAB (B)	16,34	40,43	16,43	56,86
	23,69			
RAC+LAAP (B)	16,34	40,19	17,67	57,86
	23,69			
RAC+FB (B)	16,34	24,79	17,67	42,46
	7,90			
RAC+BAS (B)	16,34	25,42	16,43	41,85
	7,90			
RAC+WL (B)	16,34	25,42	16,43	41,85
	7,90			
LAn+LFac (A)	26,32	30,27	16,43	46,70
LAn+LaerF (A)	26,32	30,27	16,43	46,70
LAn+WL (A)	26,32	30,27	16,43	46,70
LAn+Lsed (A)	26,32	30,27	16,43	46,70
LAn+Laer (A)	26,32	30,27	16,43	46,70
LAn+Laer+Lsed (A)	26,32	30,27	16,43	46,70
LAn+FB (A)	26,32	30,27	16,43	46,70

Fonte - Elaborado pelo autor.

*A atividade de projeto considerou que no reator anaeróbio há recuperação e queima do biogás, gerado tanto pela degradação da matéria orgânica do próprio reator quanto do lodo recirculado (na função de digestor).

**Para o cenário de projeto em que um dos processos do arranjo é aeróbio (exemplo:RAFA+LAB), adotou-se cenário pessimista, no qual o sistema que funciona em aerobiose está sobrecarregado.

Segundo a Tabela 10, a quantidade de metano emitida pelos cenários de projeto variou entre 24 e 45 tCO₂e/ano. Os maiores volumes de CH₄ foram gerados pelas combinações entre os reatores anaeróbios e lodos ativados e, mesmo com a recuperação e queima do biogás, RAFA/RAC+LAC+DigAn emitiram mais dentre todos os arranjos. E ainda neles, os volumes do gás produzido pelos tanques de aeração (de lodos ativados) foram sempre superiores aos dos reatores anaeróbios devido ao mecanismo adicional de captura de metano e a condição inicial na qual o tanque funciona em sobrecarga. Nesse sentido, boa operação e manutenção do equipamento garantiriam uma situação inversa, pois reduziriam as emissões de TA a zero (ou desprezível).

Um dado interessante encontrado foi sobre as emissões de metano das associações entre reatores anaeróbios e BAS, FB e/ou WL. Estes volumes foram os mais baixos (25 tCO₂e/ano), menores inclusive que o cenário hipotético aeróbio A (responsável por cerca de

30 tCO₂e por ano para 1000 pessoas). Isto devido a recuperação do gás no reator anaeróbio e também a sua eficiência (70-75 %), que ocasiona baixa carga orgânica do efluente do reator (afluente em BAS, FB e/ou WL).

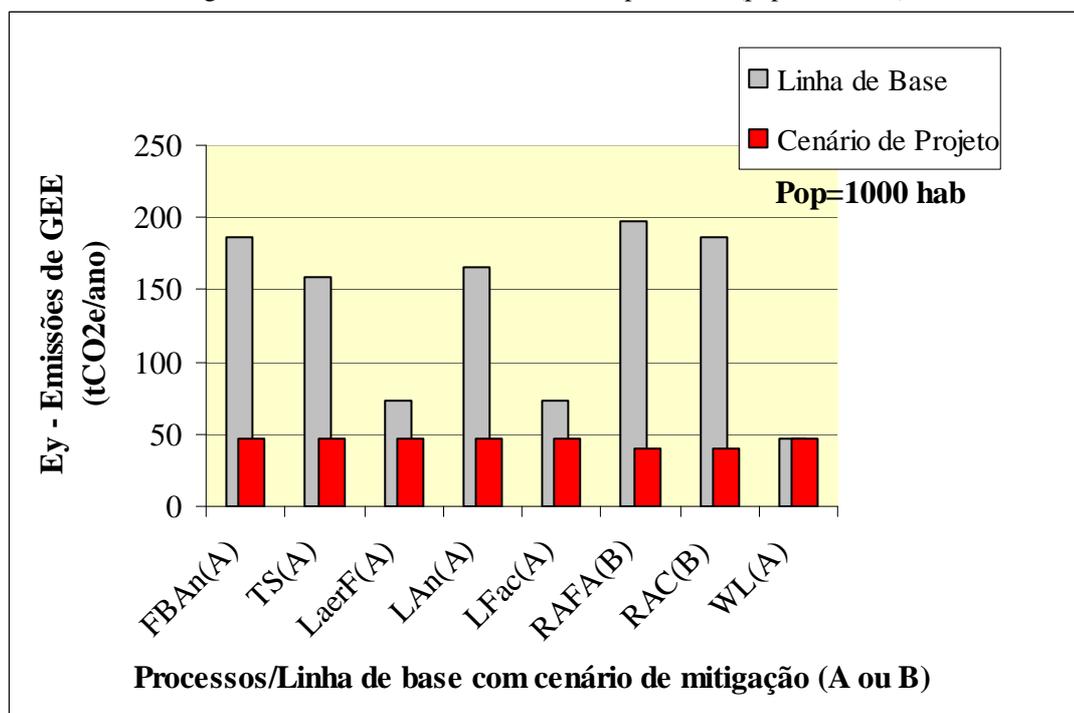
Não existem medidas mitigadoras aprovadas por metodologias de linha de base e monitoramento da UNFCCC para redução de óxido nitroso, provavelmente devido a E_{N₂O,y} apresentarem valores pouco expressivos, mesmo diante do seu alto potencial de aquecimento global. Conseqüentemente, os cálculos e resultados do cenário de projeto permaneceram iguais aos do cenário de referência e os resultados para E_y mantiveram as características de E_{CH₄,y} no que se refere aos emissores de volumes maiores, menores e intermediários.

5.3 POTENCIAL DE GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

5.3.1 Processos

A Figura 21 ilustra as emissões dos cenários de referência e de atividade de projeto de MDL para os processos de tratamento de esgoto doméstico (já excluídos BAS, FBs, LAC, LAAP, LAB e Laer, aos quais foram recomendadas apenas medidas de boas práticas).

Figura 21 - Emissões de LB e do CP dos processos (pop=1000 hab).



Fonte - Elaborado pelo autor.

A Figura 21 mostra as emissões antes e após a implantação do projeto de MDL, cuja análise visual já permite apontar as reduções potenciais de lançamento de GEE na atmosfera. As situações nas quais foi adicionado o flare apresentaram volumes mais altos de redução em relação às demais. Isto está associado à eficiência de captura (100%) e à eficiência de combustão (90%) do queimador. As eficiências elevadas de operação do equipamento, portanto, devem garantir o sucesso da medida para mitigação.

Também foram alcançados bons níveis de diminuição de emissão para as linhas de base de FBAn, TS e LAn para as quais foi estabelecida a alternativa A. Estes resultados podem ser melhorados, na medida em que é possível diminuir as emissões do projeto por meio da definição de um cenário específico mais favorável; no qual o fator de correção de metano do processo aeróbio seja desprezível por exemplo.

As reduções foram consideradas baixas para linha de base de LaerF e LFac, ambas substituídas por um sistema aeróbio. A opção pelo uso de um processos de tratamento aeróbio também gera GEE (em baixos volumes) mesmo em boas condições de funcionamento. Por isso, como os volumes de gás emitido antes da implantação do projeto de MDL já eram baixos e o cenário hipotético aeróbio não anula (na prática) o valor de E_y , as possibilidades de gerar uma quantia expressiva de RCEs são baixas em relação aos anaeróbios.

A proposta para a substituição da wetland não gerou mudanças em termos de emissão de GEE. Isto porque, o MCF da wetland é exatamente o mesmo adotado para o cenário de mitigação (0,1); outros sistemas com rendimentos diferentes poderiam resultar em reduções líquidas mais atrativas e em RCEs.

A Tabela 11 a seguir mostra estes resultados em termos de RCE, seu respectivo valor monetário e a demanda energética em cada caso.

Tabela 11 - Reduções de emissão de GEE, valores monetários e consumo de energia dos processos (1000 hab).

LB com CP (A ou B)	Redução de emissões	RCEs	Valor monetário	Consumo energ. LB	Consumo energ. CP
Processo	tCO ₂ e/ano	Unidade/ano	R\$/ano*	kWh/ano	kWh/ano
BAS	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
FB**	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
FBA n (A)	140,14	140	1378,51	0	21330
TS (A)	111,88	111	1092,96	0	21330
Laer	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
LaerF (A)	26,32	26	256,01	14500	21330
LAn (A)	119,13	119	1171,73	0	21330
LFac (A)	26,32	26	256,01	0	21330
LAC	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
LAAP	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
LAB	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
RAFA (B)	157,58	157	1545,90	0	0
RAC (B)	147,07	147	1447,44	0	0
WL (A)	zero	zero	zero	0	21330

Fonte - Elaborado pelo autor.

*1tCO₂e=4,19€ e 1€ =R\$2,35.

** A sigla FB é usada no trabalho para representar o filtro biológico de alta e de baixa carga, pois as emissões em ambos os casos foram as mesmas segundo a Tabela 7.

O número de RCEs obtidas com a aplicação do projeto de MDL é consequência da redução líquida de emissão de gases estufa (em tCO₂e/ano/1000pessoas) comparada com o cenário de referência. Os líderes em RCEs, de acordo com a Tabela 11, foram FBA n, LAn, RAFA e RAC, que podem produzir em média 140 certificados ao ano cada um. O tanque séptico substituído por tratamento aeróbio também teve destaque e conseguiu 111 RCEs/ano. Já a lagoa aerada facultativa e a lagoa facultativa (substituídos por processo aeróbio) apresentaram potencial de gerar 26 RCEs/ano, apontando um potencial bem menos expressivo que os demais cenários.

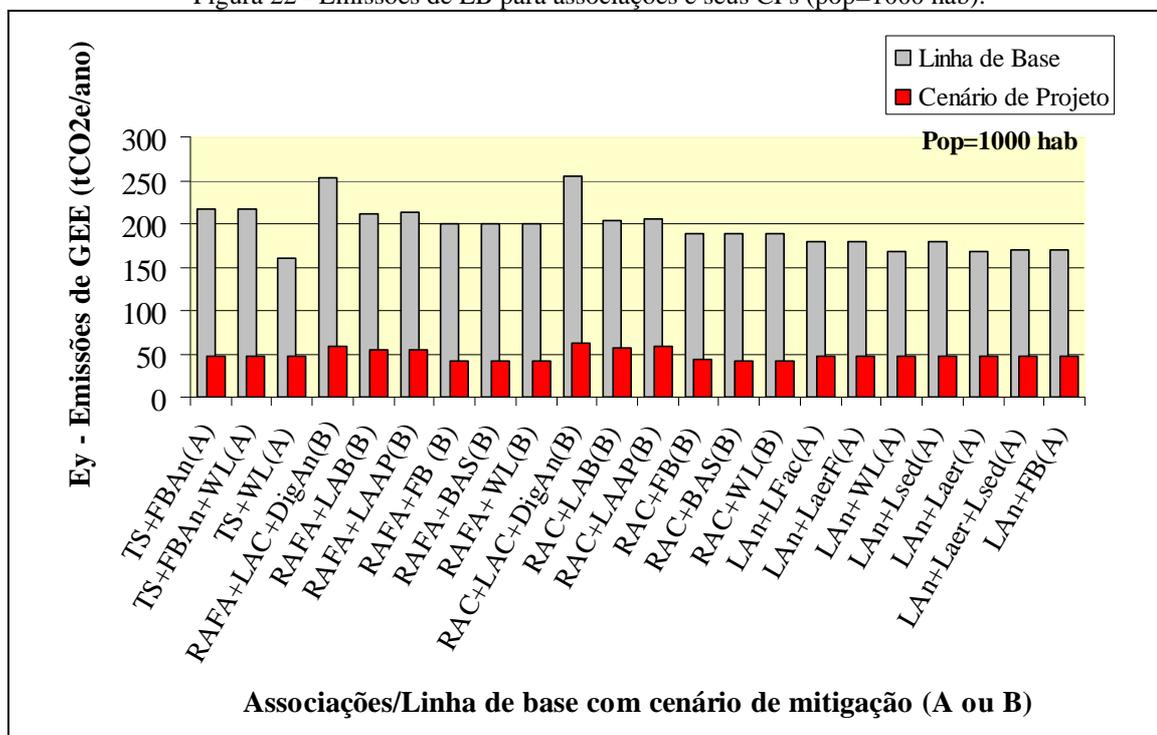
Sobre o aspecto valorativo, os termos monetários são determinados pelo montante de unidades de certificados e pelo preço de mercado do carbono, que tem caído nos últimos anos. Assim, dado o preço da tonelada de carbono de 4,19 euros ou 9,85 reais, a recuperação e queima do metano gerado em reatores anaeróbios de tratamento de esgoto pode representar R\$ 1545/ano, dependendo da cotação das moedas. Considerando que estas estimativas foram feitas para uma população de um mil habitantes atendidos, a universalização do acesso ao serviço de tratamento de esgotos deve melhorar as expectativas nesse sentido.

No que se refere a energia, para todos os casos em que foi proposto o cenário A houve aumento relevante no gasto. Na situação de linha de base LaerF, o consumo energético com a implantação do projeto de MDL subiu quase 50 % (de 14500 para 21330 kWh/ano), o que representa custo adicional (para aeração) de R\$1980/ano⁴. Para as demais situações desse grupo (cenário de mitigação A) a diferença foi ainda maior, pois na linha de base não existia demanda energética, que passou a ser de 21330 kWh/ano no CP, ou seja, custo adicional de R\$6185,70/ano⁴. Em nenhuma dessas situações a entrada financeira obtida pelos créditos de carbono igualou ou superou os gastos para aeração. Já quando ocorreu a implantação do flare nos reatores anaeróbios, o gasto energético continuou sendo zero, sem custo adicional. Em decorrência disso, o potencial de gerar créditos de carbono do setor de tratamento de esgoto doméstico para os processos se encontra na introdução de equipamentos de recuperação e combustão do biogás gerado por sistemas anaeróbios.

5.3.2 Associações

As emissões da linha de base e da atividade de projeto de cada um dos arranjos estão representadas na Figura 22.

Figura 22 - Emissões de LB para associações e seus CPs (pop=1000 hab).



Fonte - Elaborado pelo autor.

⁴ Considerou-se R\$0,29/kWh, dado da CPFL/SP de maio/2012 referentes ao consumo fora do horário de ponta e à potência instalada mais a potência consumida.

A partir do gráfico da Figura 22 verificou-se que as emissões dos 22 cenários de atividade de projeto foram bastante reduzidas em relação às suas respectivas linhas de base. De maneira geral, então, a redução das emissões para as associações é mais expressiva que a dos processos isolados. Sob essa perspectiva, constatou-se também que os resultados de E_y dos cenários de projeto não tiveram grande variação (em torno de 50 tCO₂e/ano), de maneira que o fator mais influente para as reduções líquidas foi a linha de base.

Os resultados em termos numéricos sobre as reduções de emissão, a quantia de RCEs geradas, sua valoração monetária e demanda energética são mostrados na Tabela 12.

Tabela 12 - Reduções de emissão de GEE, valores monetários e consumo de energia das associações (1000 hab).

LB com CP (A ou B)	Redução de emissões	RCEs	Valor monetário	Consumo energ. LB	Consumo energ. CP
Unidade	tCO ₂ e/ano	Uni/ano	R\$/ano	kWh/ano	kWh/ano
TS+FBAn (A)	169,87	169	1664,06	0	21330
TS+FBAn+WL (A)	170,35	170	1673,91	0	21330
TS+WL (A)	113,46	113	1112,65	0	21330
RAFA+LAC+DigAn*(B)	195,00	195	1920,07	17000	17000
RAFA+LAB (B)	157,58	157	1545,90	22500	22500
RAFA+LAAP (B)	157,58	157	1545,90	22500	22500
RAFA+FB (B)	157,58	157	1545,90	0	0
RAFA+BAS (B)	157,58	157	1545,90	17000	17000
RAFA+WL (B)	157,58	157	1545,90	0	0
RAC+LAC+DigAn*(B)	191,98	191	1880,68	17000	17000
RAC+LAB (B)	147,07	147	1447,44	22500	22500
RAC+LAAP (B)	147,07	147	1447,44	22500	22500
RAC+FB (B)	147,07	147	1447,44	0	0
RAC+BAS (B)	147,07	147	1447,44	17000	17000
RAC+WL (B)	147,07	147	1447,44	0	0
LAn+LFac (A)	132,43	132	1299,74	0	21330
LAn+LaerF (A)	132,43	132	1299,74	0	21330
LAn+WL (A)	121,90	121	1191,43	0	21330
LAn+Lsed (A)	132,43	132	1299,74	0	21330
LAn+Laer (A)	121,90	121	1191,43	12000	21330
LAn+Laer+Lsed (A)	123,72	123	1211,12	12000	21330
LAn+FB (A)	122,30	122	1201,27	0	21330

Fonte - Elaborado pelo autor.

*A atividade de projeto considerou que o próprio reator anaeróbico atua como digestor de lodo.

As associações de sistemas anaeróbios com LAC (RAC/RAFA+LAC+DigAn), nas quais foi instalado mecanismo de recuperação e queima de biogás, proporcionaram as maiores

quantias de RCEs, atingindo cerca de 190 unidades/ano, o que representa mais de R\$1900,00/ano em termos monetários.

O menor potencial de geração de créditos de carbono encontrado dentre os casos investigados neste trabalho foi na substituição de TS+WL por um sistema aeróbio, que gerou 113 RCEs (R\$1112,00/ano). Os demais arranjos alcançaram níveis próximos de 140 certificados produzidos ao ano, ou seja, em torno de R\$1300,00/ano. Neste grupo estão contidos cenários de projeto com ambas as medidas mitigadoras (A e B), o que significa que a diferença nas reduções líquidas quando se instalou um queimador e na situação em que se implantou um sistema aeróbio, foi muito próxima.

Sob o aspecto de redução de emissões a aplicação de ambos os cenários (A/B) teve resultados semelhantes e satisfatórios. Entretanto, a implantação do projeto A (troca por processo aeróbio) aumentou o consumo energético, que muitas vezes passou de zero para 21330 kWh/ano, ou seja, um custo adicional de R\$6185,70/ano (considerando R\$0,29/kWh). As respectivas entradas financeiras referentes aos créditos (que variaram de R\$1112,65 a R\$1299,74), foram menores, portanto não liquidaram estes custos com aeração. Já a aplicação do cenário B manteve o gasto com energia em LB e CP. Desta maneira e semelhante à consideração sobre os processos, apesar de viável sob o ponto de vista de emissões, a demanda energética para aeração dos processos aeróbios deve dificultar a aplicação do MDL. Portanto, verificou-se que as associações nas quais foram instalados queimadores tem maior potencial para gerar RCEs no setor de tratamento de esgoto.

Os projetos de MDL do setor de tratamento de esgoto são considerados como de pequena escala e pertencem ao Tipo 3, ou seja, seu volume de redução de emissões devem ser de no máximo 60 mil toneladas de CO₂ equivalente por ano (ou 60 mil RCEs/ano). Assim, outro aspecto importante analisado é o cumprimento desta exigência. Nesse sentido, observou-se que nenhuma das simulações (processos e/ou associações) ultrapassou esse limite: a maior produção de créditos para os processos foi de 157 tCO₂e/ano (RAFA com cenário B) e para os arranjos foi de 195 tCO₂e/ano (RAFA+LAC+DigAn com cenário B).

Nesse sentido, é importante destacar que os resultados deste trabalho foram baseados numa população de um mil habitantes. Portanto, a quantia de créditos de carbono gerada a partir do tratamento de esgoto, pouco mais de uma centena por ano, é pouco expressiva diante do total permitido pela classe SSC (da ordem de milhares de toneladas). Entretanto, se os cálculos forem extrapolados para centros urbanos mais populosos, este potencial será maior. Se, por exemplo, a estimativa for para uma cidade de porte médio (200 mil habitantes com

estação de tratamento constituída de RAFA+LAC+DigAn→Cenário B), a quantia de RCEs pode alcançar 39000 unidades/ano, o que representa cerca de R\$383000,00/ano no mercado de carbono. É possível apontar ainda que um município com 307 mil habitantes, cuja ETE tenha o mesmo cenário de linha de base e de projeto; já tem por si só, potencial para gerar 60 mil RCEs/ano e faturar mais de R\$590 mil por ano com a aplicação do MDL.

5.4 CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

Constatou-se, a partir da aplicação dos cenários de mitigação A e B, que a redução das emissões de metano do tratamento de esgoto doméstico pode ser feita pelo(a): (i) uso de sistemas aeróbios; (ii) substituição de tanques sépticos e a disposição direta de efluentes pelas plantas de tratamento; e (iii) no caso de processos anaeróbios, recuperação e queima do CH₄ produzido. Entretanto, nos sistemas híbridos, as medidas escolhidas tiveram pouco sucesso; assim, devem ser estudados novos cenários.

Sob essa perspectiva, o Brasil, como a maioria dos países em desenvolvimento, tem poucas plantas de tratamento instaladas, uso elevado de sistemas sépticos e disposição direta. As ETEs tratam o efluente e produzem CH₄; entretanto, o fazem de maneira a permitir sua recuperação e emitir menor volume de GEE. No Brasil, a CETESB (SÃO PAULO,2010) indica que os sistemas de recuperação de biogás têm sido utilizados, mas estes operam em taxas de eficiência limitadas. Isto porque, a instalação de estações tem sido feita com fins apenas sanitários e de saúde pública (LUCAS et al., 2007); não contemplando o aspecto da mitigação das emissões antrópicas de GEE. É primordial para diminuir o impacto das mudanças climáticas e para a obtenção dos créditos de carbono que se garanta o funcionamento dos sistemas de tratamento com altos níveis de eficiência; sejam eles sistemas aeróbios (para impedir a criação de condição anaeróbia), reatores e digestores de lodo anaeróbios (com altas capacidades de produção de biogás) ou ainda queimadores (com elevadas taxas de combustão). Há inclusive, como consta na Revisão da bibliografia, procedimentos de monitoramento dos volumes de GEE necessários para a obtenção do certificado.

No que se refere à emissão do óxido nitroso, poucas referências foram encontradas e até o momento, este gás não tem sido contemplado nas estimativas do tratamento de esgoto pela maioria dos inventários e relatórios de emissões de GEE no Brasil e no mundo. Devido à inexistência de metodologia para cálculo de linha de base e monitoramento para projetos de

MDL para N_2O , as emissões de cenário de projeto foram idênticas às do cenário de referência, e, portanto, não foi aplicada nenhuma proposta tecnológica de mitigação. Todavia, esta pesquisa insistiu em manter o estudo sobre o N_2O para, além de analisar a grandeza de sua contribuição para o efeito estufa, também evidenciar a lacuna que existe nessa área. Não obstante, um dos autores estudados sobre o assunto (GERBENS; ZEEMAN, 2000 apud LUCAS et al., 2007) aponta que as emissões de óxido nitroso do tratamento de esgoto doméstico podem ser reduzidas por meio do controle da remoção de nitrogênio nas estações de tratamento com auxílio de técnicas de medição e monitoramento de parâmetros operacionais. Isto porque, a otimização do processo de remoção de nitrogênio possibilita a ocorrência de reduções completas que produzem N_2 em vez de N_2O . Sob essa perspectiva, sugerem-se mais estudos sobre a bioquímica da condição anóxica, bem como a elaboração de metodologias de projeto de MDL para redução da emissão de N_2O do tratamento de esgoto, dado que em relação ao total de emissões (E_y) a emissão de N_2O foi expressiva em alguns casos.

Na análise da geração de créditos de carbono, LaerF, LFac e wetland mostraram o menor potencial com valores inferiores a 30 RCEs/ano para o projeto proposto. Os demais processos e associações revelaram capacidade para produzir 100 RCEs/ano ou mais. Foi verificado também que apesar de existir a possibilidade de processos aeróbios serem adotados em lugar de anaeróbios, a aeração exige consumo elevado de energia, cujo custo é maior do que o montante financeiro oferecido pelos projetos de MDL, fato que pode inviabilizar essa opção na maioria das situações. Por isso, o potencial de obtenção de créditos do setor de tratamento de esgotos está na adição de flares em plantas com tecnologia anaeróbia. É importante destacar que outras informações devem ser analisadas conjuntamente com os resultados deste trabalho, como por exemplo, a predominância de reatores anaeróbios instalados no Brasil (descrita na seção 3.7), que favorece a instalação de flares. Há casos em que para atingir os padrões ambientais legais é necessário implantar associações anaeróbio-aeróbio, para as quais o MDL pode ser interessante, pois a utilização de queimadores possibilita o uso da energia resultante do tratamento anaeróbio (proveniente da queima do biogás introduzida pelo projeto de MDL) para suprir a demanda energética do metabolismo aeróbio.

O potencial de geração de créditos de carbono deve ser ainda maior que os resultados desta pesquisa. Isto porque, além da estimativa considerar uma comunidade pequena (um mil habitantes), há de se avaliar ainda as projeções para o crescimento urbano populacional nos

anos futuros. É importante destacar que a duração dos projetos pode variar entre sete anos (passível de renovação por três vezes) e dez anos (não renovável). Assim, os valores de redução encontrados neste trabalho, considerando uma média de 120tCO₂e/ano, um projeto de MDL do setor de tratamento de esgoto pode chegar a um montante de redução de 840tCO₂e (R\$8260,55 na cotação adotada neste trabalho) ou 1200tCO₂e (R\$11800,00), respectivamente.

O valor monetário dos créditos de carbono é determinado, como dito anteriormente, diretamente pelo preço do carbono no mercado. Em decorrência disso, acredita-se que a desvalorização da tonelada de CO₂e seja, atualmente, um dos fatores principais que impedem o avanço do MDL. Neste trabalho, foi feita apenas a conversão do número de RCEs para moeda Real, o que representa apenas o montante a ser comercializado. Recomenda-se o desenvolvimento de estudos de valoração (custos e receitas) da implantação dessas tecnologias, a fim de verificar a viabilidade financeira, contemplando todos os fluxos de caixa envolvidos. Em projetos de pequena escala, por exemplo, para comunidades de baixa renda e dado o seu volume de recursos disponíveis, este aspecto têm mais importância ainda. Nesse sentido, financiamentos ou fundos de fomento devem contribuir para que todo o processo seja realizado.

Sob essa perspectiva, a substituição do uso de tanques sépticos pelo tratamento em larga escala (por meio de plantas), pode ser inviável em áreas rurais em relação a outros critérios. Por isso, é importante salientar que a proposição das alternativas de mitigação deste trabalho, bem como a discussão e análise dos resultados foram feitas com base na emissão de GEE e no consumo de energia requerido. Existem outros critérios como área e custo que influenciam na tomada de decisão sobre a instalação do processo de tratamento de esgoto a ser implantado em cada caso.

Por fim, este trabalho busca despertar estudiosos, especialistas e os interessados de maneira geral para esta área de oportunidades. Desta maneira, foi feita uma quantificação teórica das emissões de GEE com grau de precisão intermediário, pois a prioridade foi contemplar vários sistemas de tratamento de esgoto. Para tanto, foi preciso adotar muitos valores médios e *default*. Por isso, recomenda-se o desenvolvimento de novas pesquisas, nas quais cada tipo de tratamento apontado, entre outros, seja investigado individualmente com mais detalhe e rigor, por meio de balanços de massa, análises experimentais, parâmetros específicos reais de equipamentos e medições *in loco*; principalmente, para fins de comparação com os resultados desta estimativa. Sugere-se também, um estudo sobre as emissões de GEE oriundas do esgoto não-tratado disposto em corpos d'água no Brasil a fim

de se verificar a sua contribuição para o efeito estufa. Essa parcela lançada in natura é relevante no cenário nacional e este resultado pode motivar a instalação de plantas de tratamento, diminuindo a poluição hídrica e avançando rumo a universalização do abastecimento.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho criou cenários de emissões de GEE, contemplando também a demanda por energia, para o setor de tratamento de esgoto sanitário, utilizando os tipos de tratamento mais comuns no Brasil e as principais alternativas de redução de gases consolidadas atualmente. Desta maneira, os objetivos propostos inicialmente nesta pesquisa foram alcançados e foi desenvolvida uma estimativa pré e pós a implantação de projetos de MDL a fim de verificar o potencial de geração de créditos de carbono. Nesse sentido, as tabelas finais resultantes são referência para próximos estudos.

Diante da problemática das questões ambientais, fica claro que o mundo deve mudar o modelo de desenvolvimento e incluir o viés ecológico nos processos de tomadas de decisão. Por isso, independente da consolidação dos procedimentos para projetos de MDL, do funcionamento do mercado de carbono e da viabilidade financeira das RCEs, este instrumento surgiu para motivar e facilitar a mitigação do dano ambiental, uma necessidade que já existe. Portanto, os projetistas devem fazer opções mais sustentáveis desde as fases de planejamento, concebendo e desenvolvendo projetos que emitam menos gases estufa.

Assim, as emissões de GEE devem se tornar um fator determinante para a seleção do sistema de tratamento de esgoto e do desenho da ETE em resposta não apenas a medidas regulatórias e acordos internacionais como o Protocolo de Quioto, mas também a um novo padrão cultural.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO 14064**: Gases de efeito estufa. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/normagrid.aspx>>. Acesso em 05 nov. 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12209/92**: Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário. Rio de Janeiro, 1992.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Protocolo de Quioto**. Tradução: Ministério da Ciência e Tecnologia. Brasília, 1997.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Guia Simplificado para utilização das metodologias do MDL** – Versão preliminar. Brasília, 2006a. Disponível em: <www.mct.gov.br>. Acesso em: 12 jul. 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa**: relatórios de referência. Brasília, 2006b.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Plano Nacional de Mudança Climática, Sumário Executivo, 2008**. Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/>>. Acesso: 19 jul. 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **O mecanismo de desenvolvimento limpo**: guia de orientação 2009. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2009a.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **MDL Ilustrado**. Yuji Mizuno, 2009b. Disponível em: <www.mct.gov.br>. Acesso em: 21 jul. 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Inventário brasileiro de emissões e remoções antrópicas de gases de efeito estufa**: informações gerais e valores preliminares. 2009c. Disponível em: <www.mct.gov.br>. Acesso em: 10 ago. 2010.

BRASIL. MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**: diagnóstico dos serviços de água e esgoto – 2008. Brasília: MCIDADES. SNSA, 2010a. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/>>. Acesso: 19 ago. 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no mundo**: 31 de maio de 2010. 2010b. Disponível em <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso: 21 jul. 2010.

CONSELHO EMPRESARIAL BRASILEIRO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (CEBDS). **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. Rio de Janeiro, 2004.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). **Manual de capacitação sobre Mudança climática e projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL)**. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1997. (Princípios do Tratamento de Biológico de Águas Residuárias, v. 05).

CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (CQNUMC). **Metodologias de linha de base e monitoramento indicativas simplificadas para categorias selecionadas de atividades de projeto de pequena escala no âmbito do MDL: AIII.H. Recuperação de Metano no Tratamento de Águas Residuárias**. Versão 10. 2006a.

CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE MUDANÇA DO CLIMA (CQNUMC). **Metodologias de linha de base e monitoramento indicativas simplificadas para categorias selecionadas de atividades de projeto de pequena escala no âmbito do MDL: III.I. Produção de metano, no tratamento de águas residuárias, evitada por meio da substituição de sistemas anaeróbicos por sistemas aeróbicos**. Versão 7. 2006b.

EL-FADEL, M. ; MASSOUD, M. Methane emissions from wastewater management. **Environment Pollution**, Beirute, v. 114, p. 177-185, 2001. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 01 jul. 2010.

ELGOOD, Z. et al. Nitrate removal and greenhouse gas production in a stream-bed denitrifying bioreactor. **Ecological Engineering**, Kitchener, v. xxx., p. xxx–xxx, 2010.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **FAOSTAT - Statistical Database, United Nations Food and Agriculture Organization**. 2004. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 22 jan. 2011.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS (FGV). **O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL: guia de orientação**. Rio de Janeiro: Fundação Getulio Vargas, 2002.

GERBENS, S., ZEEMAN, G.. Cost-effective Emission Control Technologies of the Greenhouse Gases Methane and Nitrous Oxide from Wastewater. **Wageningen University Research Center**, Department of Agricultural, Environmental and Systems Technology, Wageningen, The Netherlands, v. xxx., p. xxx–xxx, 2000.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **The Science of Climate Change - Summary for Policymakers**, Office Graphics Studio, Madrid, 1995.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **The revised guidelines for national Greenhouse Gas Inventories: Reference manual**. New York, 1996. v. 1, v. 3.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Good practice guidance and uncertainty management in national greenhouse gas inventories**. Japan, 2000.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2001: The Scientific Basis**. Cambridge University Press, 2001. Ed. Houghton, J.T., Y. et al.. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **The Science of Climate Change - Summary for Policymakers**, Office Graphics Studio, Madrid., 1995.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Published: IGES, Japan, 2006a. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). (General Guidance and Reporting v.1).

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Published: IGES, Japan, 2006b. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). (Waste, v.5).

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report**. IPCC, Geneva, Switzerland, 2007. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the IPCC [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)].

KAMPSCHREUR, M. J. et al. Nitrous oxide emission during wastewater treatment. **Water Research**, Delft, v. 43, p. 4093–4103, 2009. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 01 jul. 2010.

LUCAS, P. L. et al. Long-term reduction potential of non-CO₂ greenhouse gases. **Environmental science & policy**, Bilthoven, v. 10, p. 85–103, 2007. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 01 jul. 2010.

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4 ed. McGraw-Hill Book Co., 2003.

MORAES, L. A. G. **Contribuição ao estudo de valor, das perspectivas e da efetividade do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Protocolo de Kyoto**. 2008. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear – Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

NPIU/USP. **Limites técnicos e econômicos de alternativas de tratamento de esgoto – manual de orientação aos municípios e outros agentes**. 47 p. São Paulo, Núcleo de Pesquisa em Informações Urbanas, Universidade de São Paulo, 2003.

PAIVA, G. B. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, tratamento de esgoto e desenvolvimento sustentável: um estudo econômico**. 2008. 144 p.. Dissertação (Mestrado em Economia) - Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2008.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O MEIO AMBIENTE (PNUMA). **Protocolo de Montreal**. PNUMA, 2000.

REIS, T. V. M.. **Metodologia para estimar o fator de substituição de projeto MDL conectado a sistema elétrico: uma abordagem prospectiva**. 2009. 258 p.. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ROSSO, D.; STENSTROM, M. K. The carbon-sequestration potential of municipal wastewater treatment. **Chemosphere**, Los Angeles, v. 70, p. 1468 –1475, 2008. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 01 jul. 2010.

SALVADOR, N. N. B. **Alternativas de Tratamento de Esgoto Sanitário**. São Carlos: DECiv/UFSCar, 2010.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Sistemas de esgoto sanitário**. São Paulo, 1977. 467p.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário brasileiro de gás metano gerado por resíduos: relatório dos bancos de dados de resíduos sólidos e efluentes líquidos**. 2 ed. São Paulo, 2001.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário de referência dos gases de efeito estufa no setor de resíduos e efluentes do estado de São Paulo - Versão para consulta pública out/2010**. São Paulo, 2010.

SÃO PAULO (Estado). Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Inventário de emissões antrópicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do estado de São Paulo**. São Paulo: CETESB, 2011.

TONELLO, V. M. M. **Principais aspectos do ciclo biogeoquímico do elemento carbono e seu contexto na atualidade**. 2007. 138 p..Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2007.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990 – 2008**. U.S. Environmental Protection Agency, N.W. Washington, 2010. Disponível em: <<http://www.epa.gov/climatechange/emissions/usinventoryreport.html>>. Acesso em: 05 fev. 2011.

VON SPERLING, M. **Lagoas de Estabilização**. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1986. (Princípios do Tratamento de Biológico de Águas Residuárias, v. 03).

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgoto**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 1996. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 02).

VON SPERLING, M. **Lodos ativados**. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2002. (Princípios do Tratamento de Biológico de Águas Residuárias, v. 04).

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgoto**. 3 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2005. (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 01).

APÊNDICES

APÊNDICE A

PROCESSOS

1. Linha de Base

1.1. Emissões de metano e consumo energético

Tabela 1 - Estimativa das emissões de metano de linha de base para os processos de tratamento e disposição de esgoto.

PROCESSOS	EMISSIONES DIRETAS					EMISSIONES INDIRETAS		TOTAL	Potência consumida	Consumo energético
	$D_{dom,y}$	MCF adotado	UF	GWP_{CH_4}	$E_{ww,treatment,y}$	$D_{dom,discharge,y}$	$E_{ww,discharge,y}$	$E_{CH_4,y}$		
	kgDBO/ pessoas/ano	Adimen	Adim	Adimen	tCO ₂ e/ano	kgDBO/ pessoas/ano	tCO ₂ e/ano	tCO ₂ e/ano	kWh/ hab.ano	kWh/ano
BAS	19,71	0,1	1,06	21	26,32	2,96	3,95	30,27	22	22000
FB (baixa taxa)	19,71	0,1	1,06	21	26,32	1,38	1,84	28,17	0	0
FB (alta taxa)	19,71	0,1	1,06	21	26,32	1,97	2,63	28,96	0	0
FBAn	19,71	0,7	0,94	21	163,41	5,91	7,00	170,42	0	0
TS	19,71	0,5	1,06	21	131,62	7,88	10,53	142,15	0	0
Laer	19,71	0,1	1,06	21	26,32	2,96	3,95	30,27	14,5	14500
LaerF	19,71	0,2	1,06	21	52,65	2,96	3,95	56,60	14,5	14500
LAn	19,71	0,6	0,94	21	140,07	7,88	9,34	149,40	0	0
LFac	19,71	0,2	1,06	21	52,65	2,96	3,95	56,60	0	0
LAC	19,71	0,3	1,06	21	78,97	0,99	1,32	80,29	22	22000
LAAP	19,71	0,3	1,06	21	78,97	0,39	0,53	79,50	27,5	27500
LAB	19,71	0,3	1,06	21	78,97	0,99	1,32	80,29	27,5	27500
RAFA	19,71	0,75	0,94	21	175,08	4,93	5,84	180,92	0	0
RAC	19,71	0,7	0,94	21	163,41	5,91	7,00	170,42	0	0
WL	19,71	0,1	1,06	21	26,32	2,96	3,95	30,27	0	0

Pop=população atendida pelo tratamento= 1000 habitantes

$D_{dom,y}$ = fração do componente orgânico degradável do efluente doméstico anual = 19,71 kgDBO/pessoa/ano (ABNT, 1992)

MCF = fator de correção de metano para os sistemas de tratamento de águas residuárias (valores de acordo com a Tabela 6)

B_o = capacidade de produção de metano das águas residuárias = 0,6 kgCH₄/kgDBO (default IPCC)

GWP_{CH_4} = potencial de aquecimento global do metano = 21

UF = fator de correção para contabilizar as incertezas do modelo (0,94 para sistemas anaeróbios e para sistemas aeróbios 1,06)

$E_{ww,treatment,y}$ = emissões de metano do sistema de tratamento anaeróbio ou aeróbio de esgoto no ano y [tCO₂e/ano]

$D_{dom,discharge,y}$ = fração do componente orgânico degradável do efluente doméstico tratado disposto no mar, rio ou lago no ano y (toneladas/m³) [kgDBO/pessoa/ano]

$E_{ww,discharge,y}$ = emissões de metano devido ao lançamento do esgoto em corpos d'água no ano y [tCO₂e/ano]

$E_{CH_4,y}$ = emissões totais de metano no ano y [tCO₂e/ano]

Potência consumida = valores indicados por NPIU/USP (2003) citado por Salvador (2010) [kWh/hab.ano]

Dis: MCF=0,1

1.2. Emissões de óxido nitroso

Duas situações foram definidas neste trabalho com relação à emissão de N₂O: foram determinadas as emissões diretas para LAAP e FB (alta e baixa carga) e somente as emissões indiretas para os demais processos.

LAAP e FBs

Emissões Diretas

Tabela 2 - Estimativa das emissões de óxido nitroso em plantas de tratamento de esgoto.

Plantas/ ETEs	Pop	$F_{IND-COM}$	EF_{PLANT}	GWP_{N_2O}	$E_{plants,y}$
	habitantes	adimensional	kgN ₂ O/pessoa/ano	adimensional	tCO ₂ e/ano
	1000	1,25	0,0032	310	1,24

$F_{IND-COM}$ = fração da proteína comercial e industrial co-disposta, adotado *default* = 1.25 [adimensional]

EF_{PLANT} = fator de emissão da estação de tratamento, adotado *default* 0,0032 [kgN₂O/pessoa/ano]

GWP_{N_2O} = potencial de aquecimento global do óxido nitroso (valor de 310)

$E_{plants,y}$ = emissões oriundas da planta de tratamento no ano y [tCO₂e/ano]

Emissões Indiretas

Tabela 3 - Estimativa de nitrogênio no efluente

Parâmetro	<i>Protein</i>	F_{NPR}	$F_{NON-CON}$	$F_{IND-COM}$	N_{SLUDGE}	$N_{EFFLUENT}$
Unidade	kg/pessoa/ano	kgN/ kg proteína	Adimen	Adimen	kgN/ano	kgN/ano
Valor	30,66	0,16	1,1	1,25	0	6744,41
Fonte	FAO, 2004	<i>default</i>	<i>default</i>	<i>default</i>	<i>default</i>	-

Protein = consumo anual de proteína por pessoa, adotado 84 g/pessoa/dia [kg/pessoa/ano] (FAO, 2004)

F_{NPR} = fração de nitrogênio na proteína, adotado *default* 0,16 [kgN/kg proteína]

$F_{NON-CON}$ = fator para a proteína não-consumida lançada no esgoto [adimensional]

N_{SLUDGE} = nitrogênio removido com o lodo, adotado *default* zero [kgN/ano]

$N_{EFFLUENT}$ = quantidade de nitrogênio lançada no meio aquático [kgN/ano]

Tabela 4 - Estimativa do fator e das emissões indiretas de N_2O do esgoto.

Lançamento em corpos d'água	$N_{EFFLUENT}$	$EF_{EFFLUENT}$	Fator de conversão	GWP_{N_2O}	$E_{discharge,y}$
	kgN/ano	kg N_2O - N/kgN	kg N_2O -N para kg N_2O	Adimensional	t CO_2e /ano
	6744,41	0,005	1,57	310	16,43

$EF_{EFFLUENT}$ = fator de emissão do esgoto lançado no corpo d'água [kg N_2O -N/kgN]

Fator de conversão= converte de kg N_2O -N para kg N_2O =44/28

$E_{discharge,y}$ = emissões de N_2O oriundas da disposição em rio/mar/lago no ano [t CO_2e /ano]

Demais processos**Emissões Indiretas**

Tabela 5 - Estimativa de nitrogênio no efluente sem contabilização de emissões diretas.

Parâmetro	<i>Protein</i>	F_{NPR}	$F_{NON-CON}$	$F_{IND-COM}$	N_{SLUDGE}	$N_{EFFLUENT}$
Unidade	kg/pessoa/ano	kgN/kg proteína	Adimen	Adimen	kgN/ano	kgN/ano
Valor	30,66	0,16	1,1	1,25	0	6745,2
Fonte	FAO, 2004	<i>default</i>	<i>default</i>	<i>default</i>	<i>default</i>	-

Tabela 6 - Estimativa do fator e das emissões indiretas de N₂O do esgoto sem contabilização das emissões diretas.

Lançamento em corpos d'água	$N_{EFFLUENT}$	$EF_{EFFLUENT}$	Fator de conversão	GWP_{N_2O}	$E_{discharge,y}$
	kgN/ano	kgN ₂ O- N/kgN	kgN ₂ O-N para kgN ₂ O	<i>adimensional</i>	tCO ₂ e/ano
	6745,2	0,005	1,57	310	16,43

*Alternativas de Mitigação: Não existem metodologias pra diminuir a emissão de óxido nitroso, sugerem-se estudos para formulação de procedimentos de linha de base e monitoramento.

2. Cenário de Projeto

2.1. Emissões de metano

Tabela 7 - Estimativa das emissões de metano de cenário de projeto para os processos de tratamento e disposição de esgoto.

PROCESSOS (na LB)	CP	EMISSÕES DIRETAS						EMISSÕES INDIRETAS		TOTAL	Potência consumi da	Consumo energ.
		$D_{dom,y}$	MCF adota do	UF	GWP_{CH_4}	R	$E_{ww,treatment,y}$	$D_{dom,discharge,y}$	$E_{ww,discharge,y}$	$E_{CH_4,y}$		
	A/B	kgDBO/ pessoas/ ano	Adim	Adi	Adimen	kgCO ₂ e/ ano	tCO ₂ e/ ano	kgDBO/ pessoa/ ano	tCO ₂ e/ ano	tCO ₂ e/ ano	kWh/hab .ano	kWh/ano
BAS	*	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
FB (baixa taxa)	*	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
FB (alta taxa)	*	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
FBA	A	19,71	0,1	1,06	21	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330
TS	A	19,71	0,1	1,06	21	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330
Laer	*	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
LaerF	A	19,71	0,1	1,06	21	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330
LAn	A	19,71	0,1	1,06	21	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330
LFac	A	19,71	0,1	1,06	21	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330
LAC (TA)	*	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
LAAP (TA)	*	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
LAB (TA)	*	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
RAFA	B	19,71	0,75	0,94	21	157575,54	17,51	4,93	5,84	23,34	0	0
RAC	B	19,71	0,7	0,94	21	147070,50	16,34	5,91	7,00	23,34	0	0
WL	A	19,71	0,1	1,06	21	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330

Dis: MCF=0,1

n.a.= Não aplicado

Pop=1000 habitantes

Bo=0,6 (default IPCC)

R= Metano recuperado e queimado, medido em kgCO₂e/ano

2.2. Emissões de óxido nitroso

As emissões de N₂O tanto diretas quanto indiretas são estimadas da mesma forma e resultam nos mesmos valores, já que não há medida mitigadora, e o método de estimativa baseia-se na degradação do nitrogênio ao longo do tratamento.

APÊNDICE B

ASSOCIAÇÕES

1. Linha de Base

1.1. Emissões de metano

Tabela 8 - Emissões de metano de linha de base para associações de tratamento e disposição de esgoto.

ASSOCIAÇÕES	EMISSÕES DIRETAS				EMISSÕES INDIRETAS		TOTAL	Potência consumida kWh/ hab.ano	Consumo energético kWh/ano
	$D_{dom,y}$	MCF adotado	UF	$E_{ww,treatment,y}$	$D_{dom, discharge,y}$	$E_{ww,discharge,y}$	$E_{CH_4,y}$		
	kgDBO/ pessoa/ano	Adimen	Adimen	tCO ₂ e/ano	kgDBO/ pessoa/ano	tCO ₂ e/ano	tCO ₂ e/ ano		
TS+FBAn	19,71	0,5	1,06	131,62			200,15	0	0
	7,88	0,7	0,94	65,36	2,37	3,16			
TS+FBAn+WL	19,71	0,5	1,06	131,62			200,62	0	0
	7,88	0,7	0,94	65,36					
	2,37	0,1	1,06	3,16	0,35	0,47			
TS+WL	19,71	0,5	1,06	131,62			143,73	0	0
	7,88	0,1	1,06	10,53	1,18	1,58			
RAFA+LAC+DigAn	19,71	0,75	0,94	175,08			236,74	17	17000
	4,93	0,3	1,06	19,74	0,25	0,33			
	4,68	0,75	0,94	41,58					
RAFA+LAB	19,71	0,75	0,94	175,08			195,16	22,5	22500
	4,93	0,3	1,06	19,74	0,25	0,33			
RAFA+LAAP	19,71	0,75	0,94	175,08			194,96	22,5	22500
	4,93	0,3	1,06	19,74	0,10	0,13			

RAFA+FB	19,71	0,75	0,94	175,08			182,13	0	0
	4,93	0,1	1,06	6,58	0,34	0,46			
RAFA+BAS	19,71	0,75	0,94	175,08			182,65	17	17000
	4,93	0,1	1,06	6,58	0,74	0,99			
RAFA+WL	19,71	0,75	0,94	175,08			182,65	0	0
	4,93	0,1	1,06	6,58	0,74	0,99			
RAC+LAC+DigAn	19,71	0,7	0,94	163,41			234,07	17	17000
	5,91	0,3	1,06	23,69	0,30	0,39			
	5,62	0,7	0,94	46,57					
RAC+LAB	19,71	0,7	0,94	163,41			187,50	22,5	22500
	5,91	0,3	1,06	23,69	0,30	0,39			
RAC+LAAP	19,71	0,7	0,94	163,41			187,26	22,5	22500
	5,91	0,3	1,06	23,69	0,12	0,16			
RAC+FB	19,71	0,7	0,94	163,41			171,86	0	0
	5,91	0,1	1,06	7,90	0,41	0,55			
RAC+BAS	19,71	0,7	0,94	163,41			172,49	17	17000
	5,91	0,1	1,06	7,90	0,89	1,18			
RAC+WL	19,71	0,7	0,94	163,41			172,49	0	0
	5,91	0,1	1,06	7,90	0,89	1,18			
LAn+LFac	19,71	0,6	0,94	140,07			162,71	0	0
	7,88	0,2	1,06	21,06	1,18	1,58			
LAn+LaerF	19,71	0,6	0,94	140,07			162,71	0	0
	7,88	0,2	1,06	21,06	1,18	1,58			
LAn+WL	19,71	0,6	0,94	140,07			152,18	0	0
	7,88	0,1	1,06	10,53	1,18	1,58			
LAn+Lsed	19,71	0,6	0,94	140,07			162,71	0	0
	7,88	0,2	1,06	21,06	1,18	1,58			

LAn+Laer	19,71	0,6	0,94	140,07			152,18	12	12000
	7,88	0,1	1,06	10,53	1,18	1,58			
LAn+Laer+Lsed	19,71	0,6	0,94	140,07			153,99	12	12000
	7,88	0,1	1,06	10,53					
	1,18	0,2	1,06	3,16	0,18	0,24			
LAn+FB	19,71	0,6	0,94	140,07			151,33	0	0
	7,88	0,1	1,06	10,53	0,55	0,74			

Pop=1000 habitantes

Bo=0,6

GWP_{CH4} = 21

FB = alta ou baixa taxa

* Para as situações em que um dos processos do arranjo é aeróbio (exemplo:RAFA+LAB), adotou-se cenário pessimista, no qual este sistema está sobrecarregado.

1.2. Emissões de óxido nitroso

As emissões de N₂O tanto diretas quanto indiretas são estimadas da mesma forma que no Item 1.2 do Apêndice A, e resultam nos mesmos valores, já que não há medida mitigadora e o método de estimativa baseia-se na degradação do nitrogênio ao longo do tratamento.

2. Cenário de Projeto

2.1. Emissões de metano

Tabela 9 - Estimativa das emissões de metano para cenários de projeto propostos para as associações de tratamento e disposição de esgoto.

ASSOCIAÇÕES (na LB)	CP	EMISSÕES DIRETAS					EMISSÕES INDIRETAS		TOTAL	Potência consumida	Consumo energético	
		$D_{dom,y}$	MCF adotado	UF	R	$E_{ww,treatment,y}$	$D_{dom,discharge,y}$	$E_{ww,discharge,y}$	$E_{CH_4,y}$			
		A/B	kgDBO/ pessoa/ ano	Adimen	Adimen	kgCO ₂ e/ ano	tCO ₂ e/ ano	kgDBO/ pessoa/ ano	tCO ₂ e/ ano			tCO ₂ e /ano
TS+FBAn	A	19,71	0,1	1,06	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330	
TS+FBAn+WL	A	19,71	0,1	1,06	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330	
TS+WL	A	19,71	0,1	1,06	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330	
RAFA+LAC+DigAn	B	19,71	0,75	0,94	157575,54	17,51				41,74	17	17000
		4,93	0,3	1,06	0	19,74	0,25	0,33				
		4,68	0,75	0,94	37424,19	4,16						
RAFA+LAB	B	19,71	0,75	0,94	157575,54	17,51			37,58	22,5	22500	
		4,93	0,3	1,06	0	19,74	0,25	0,33				
RAFA+LAAP	B	19,71	0,75	0,94	157575,54	17,51			37,38	22,5	22500	
		4,93	0,3	1,06	0	19,74	0,10	0,13				
RAFA+FB	B	19,71	0,75	0,94	157575,54	17,51			24,55	0	0	
		4,93	0,1	1,06	0	6,58	0,34	0,46				
RAFA+BAS	B	19,71	0,75	0,94	157575,54	17,51			25,08	17	17000	
		4,93	0,1	1,06	0	6,58	0,74	0,99				
RAFA+WL	B	19,71	0,75	0,94	157575,54	17,51			25,08	0	0	
		4,93	0,1	1,06	0	6,58	0,74	0,99				

RAC+LAC+DigAn	B	19,71	0,77	0,94	147070,50	16,34			45,09	17	17000
		5,91	0,3	1,06	0	23,69	0,30	0,39			
		5,62	0,7	0,94	41915,09	4,66					
RAC+LAB	B	19,71	0,7	0,94	147070,50	16,34			40,43	22,5	22500
		5,91	0,3	1,06	0	23,69	0,30	0,39			
		5,62	0,7	0,94	41915,09	4,66					
RAC+LAAP	B	19,71	0,7	0,94	147070,50	16,34			40,19	22,5	22500
		5,91	0,3	1,06	0	23,69	0,12	0,16			
		5,62	0,7	0,94	41915,09	4,66					
RAC+FB	B	19,71	0,7	0,94	147070,50	16,34			24,79	0	0
		5,91	0,1	1,06	0	7,90	0,41	0,55			
		5,62	0,7	0,94	41915,09	4,66					
RAC+BAS	B	19,71	0,7	0,94	147070,50	16,34			25,42	17	17000
		5,91	0,1	1,06	0	7,90	0,89	1,18			
		5,62	0,7	0,94	41915,09	4,66					
RAC+WL	B	19,71	0,7	0,94	147070,50	16,34			25,42	0	0
		5,91	0,1	1,06	0	7,90	0,89	1,18			
		5,62	0,7	0,94	41915,09	4,66					
LAn+LFac	A	19,71	0,1	1,06	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330
Lan+LaerF	A	19,71	0,1	1,06	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330
Lan+WL	A	19,71	0,1	1,06	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330
Lan+Lsed	A	19,71	0,1	1,06	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330
Lan+Laer	A	19,71	0,1	1,06	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330
Lan+Laer+Lsed	A	19,71	0,1	1,06	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330
Lan+FB	A	19,71	0,1	1,06	0	26,32	2,96	3,95	30,27	21,33	21330

Dis: MCF=0,1

UF=1,06

Pop=1000 habitantes

Bo=0,6

Potência consumida=valores extraídos de NPIU/USP (2003) citado em Salvador (2010) [kWh/hab.ano]

* Para o cenário de projeto em que um dos processos do arranjo é aeróbio (exemplo:RAFA+LAB), adotou-se cenário pessimista, no qual este sistema está sobrecarregado.

2.2. Emissões de óxido nitroso

As emissões de N_2O tanto diretas quanto indiretas são estimadas da mesma forma que no Item 1.2 do Apêndice A, e resultam nos mesmos valores, já que não há medida mitigadora, e o método de estimativa baseia-se na degradação do nitrogênio ao longo do tratamento.