

DAVID FELIPE HOYOS GARCÍA

**MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO NO
MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA**

FLORIANÓPOLIS

2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO NO
MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica

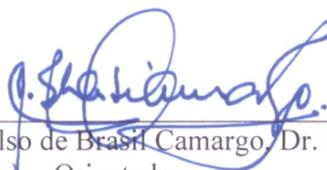
DAVID FELIPE HOYOS GARCÍA

Florianópolis, Março de 2006.

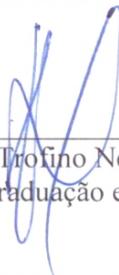
MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO NO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA

David Felipe Hoyos García.

“Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração *em Sistemas de Energia Elétrica*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina”.

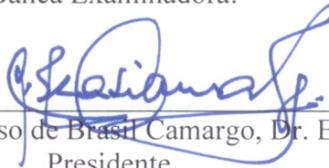


Prof. C. Celso de Brasil Camargo, Dr. Eng.
Orientador.

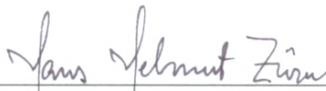


Prof. Alexandre Trofino Neto, Dr. Eng.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – UFSC.

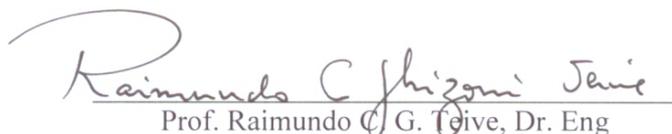
Banca Examinadora:



Prof. C. Celso de Brasil Camargo, Dr. Eng.
Presidente.



Prof. Hans Helmut Zürn, Ph. D.



Prof. Raimundo C. G. Teive, Dr. Eng.

*Aos meus amados pais: “Ana e Libardo”;
aos meus irmãos Marcela e Andrés;
à Maria Del Pilar;
pelo apoio incondicional, a alegria, e motivação.*

AGRADECIMENTOS.

Este trabalho foi uma verdadeira obra conjunta, da qual muitos fizeram parte e aos quais espero merecidamente me lembrar de citar.

Gostaria primeiramente de agradecer ao meu orientador **Celso de Brasil Camargo**, que soube me conduzir sempre que preciso e teve papel fundamental na viabilização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, **Hans Helmut Zürn** e **Raimundo Teive** pelas observações para a melhora da versão final do trabalho.

Igualmente a **Everthon Taghori Sica**, que entregou o melhor e também soube me conduzir para a realização desta dissertação.

A **Leandro Aguiar, Daniel do Vale, Renzo Figueroa** e **Luis Evelio García**, pela disposição incondicional e ajuda nesta dissertação.

Aos meus colegas de mestrado do LABSPOT e do LABPLAN: **Armando Ortiz, Assis Rogeiro, Carlos Eduardo Monteiro, Rodrigo Rodrigues, Diego Roberto Morais, Joni Coser, Juliano Silva, Fernando Buzzulini Prioste, Richard Reitner, Flávia Thómaz, Carlos Moyano, Márcio Lachmann, Darlessandro Ribeiro, Juliano Scher, Luciano Coelho, Fernanda Senna, David Takemura, Sandra Hitomi, Mariana Carneiro, Samantha, Edison Aranha, Eduardo Gaulke, Fabrício Takigawa, Raquel Rocha, Otávio Vaz e Maurício Sperandio, César Portoland**, pelas alegrias, sorrisos, companhia, bom senso, amizade e felicidade.

Aos professores da área de concentração de Sistemas de Energia Elétrica do programa de pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina.

À delegação colombiana no Brasil: **Rodrigo Velázquez, Yesid Assaf, Cindy Ibarra, Mario Robayo, Liliana Rios, Omar Suescún, Jairo Quintero, Felix Yáñez, Guber Guerero, José Burgos**,

Wilson Tafur, Willian Ibáñez, Patrícia Ortega, Leonel Rincón, Leonardo López pela irmandade e os momentos de descontração.

À delegação colombiana que visitou o Brasil: **Mauricio Giraldo, Dione Valencia, Sergio Molina, Alejandro Vélez, Jéssica Franco, Maria Del Mar González y Juan Felipe**; que alegraram com suas presencias e sorrisos muitos dias no Brasil, longe da nossa Colômbia.

À delegação estrangeira no Brasil: **Paola Quain, Mateo Landais, Fany Montenegro, Anneke Wagner, Susanne Wolhrab, Cora Borensztejn, Gustavo Cravero, David Oliveira, Sindy Hussner, Gerrit Hille, Antje Sonnenschein, Oliver Knörle, Marie-Chistrine Dion, Paulina, César Abarca, Benoit Garcia, Christelle Horte, Vanessa Picout, Ana Cardozo, Zacarias Navarro, Monserrat Álvarez, Cláudio Arenas, Catherine Espinoza, Cristian Arismendi, Alejandra Arce, Alhasan Haidar, Carmen Castillo, Siuket, Laura, Cristina Simon, Santiago Duque, Bárbara, Armelle, Sergio, Candy Martinez.**

Aos meus brasileiros: **Júlia Parreira, Cristina Foroni, Cristiane Rodrigues, Cristiane Foroni, Sergio Fregolon, Márcia Fregolon, Valmor Fregolon, Sebelen Mantovani, Flavinha e André, William Badoró e Jean Carlos Medeiros.**

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

MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO NO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA

David Felipe Hoyos García.

Março / 2006

Orientador: C. Celso de Brasil Camargo, D. Eng.

Área de Concentração: Sistemas de Energia Elétrica

Palavras-chave: *Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, Protocolo de Kyoto, Certificados de Emissões Reduzidas, Mercado de Energia Elétrica, Desenvolvimento Sustentável, Geração Distribuída.*

Número de Páginas: 99 (Noventa e nove)

Este trabalho baseia-se na realização de uma pesquisa documental dos aspectos relacionados com o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, com uma aplicação do caso particular para cálculo de emissões reduzidas e geração de energia elétrica a partir de biogás como fonte renovável.

São particularmente analisadas as possibilidades de redução de gases de efeito estufa a partir da geração de energia de fontes alternativas limpas. Foi estudada a aplicabilidade e viabilidade da realização de um projeto de desenvolvimento limpo no Brasil, mediante uma proposta científica.

Apresenta-se uma análise dos aspectos técnicos da produção de energia elétrica com biogás, e são considerados aspectos sócio-econômicos que podem viabilizar ou não o projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

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

CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM IN THE ELECTRIC MARKET.

David Felipe Hoyos García.

March / 2006

Advisor: C. Celso de Brasil Camargo, D. Eng.

Concentration Area: Electrical Energy Systems

Keywords: *Clean Development Mechanism, Kyoto Protocol, Certified Emission Reduction, Electric Market, Distributed Generation.*

Number of Pages: 99 (Ninety nine)

This work is based on the development of a documental research on Clean Development Mechanism, supported by the application of a case study of the calculation of emission reductions and power generation considering biogas as an energy source.

Possibilities of reduction of greenhouse gases are analyzed by generating power as an alternative clean source. The realization of a clean development project in Brazil is also studied through a scientific proposal with the calculation of emissions reductions coming from biogas. A technical analysis and socioeconomic aspects are presented that could support a Clean Development Mechanism project.

Resumen de la Disertación presentada a la UFSC como requisito parcial
para la obtención del título de Magíster en Ingeniería Eléctrica

MECANISMO DE DESENVOLVIMIENTO LIMPIO EN EL MERCADO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

David Felipe Hoyos García.

Marzo / 2006

Tutor: C. Celso de Brasil Camargo, D. Ing.

Área de Concentración: Sistemas de Energía Eléctrica

Palabras clave: *Mecanismo de Desarrollo Limpio, Protocolo de Kyoto, Certificados de Emisiones Reducidas, Mercado de Energía Eléctrica, Desarrollo Sustentable, Generación Distribuída.*

Número de Páginas: 99 (Noventa y nueve)

Este trabajo está basado en la realización de una investigación documental de los aspectos relacionados con el Mecanismo de Desarrollo Limpio con una aplicación práctica de un caso particular para el cálculo de emisiones reducidas y la generación de energía eléctrica a partir de biogás como fuente renovable.

Son analizadas particularmente las posibilidades de reducción de gases de efecto invernadero a partir de la generación energética con fuentes limpias. Fueron estudiadas la aplicación y la viabilidad de realizar un proyecto de desarrollo limpio en Brasil a través de una propuesta científica.

Es realizado un cálculo de la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, y generación de metano proveniente do biogás.

Se presenta un análisis de los aspectos técnicos de la producción energética con biogás, y son considerados aspectos socio-económicos que pueden viabilizar o no un proyecto de Mecanismo de Desarrollo Limpio.

SUMÁRIO

SUMÁRIO.....	xvii
LISTA DE FIGURAS.....	xx
LISTA DE TABELAS.....	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	xxii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. MOTIVAÇÃO	2
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.3. <i>Geral</i>	3
1.2.4. <i>Específicos</i>	3
1.3. METODOLOGIA UTILIZADA	4
1.4. RELEVÂNCIA DO TRABALHO	4
1.5. LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	5
1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO	5
2. MECANISMOS DE DESENVOLVIMENTO LIMPO E MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA	7
2.1 INTRODUÇÃO	7
2.2 ANTECEDENTES À EVOLUÇÃO DO MERCADO	7
2.3 PROTOCOLO DE KYOTO	9
2.4 FUNCIONAMENTO DOS MERCADOS DE CARBONO	11
2.5 DADOS DO MERCADO DE CARBONO	13
2.6 OBTENÇÃO DOS CRÉDITOS.....	16
2.7 LINHA DE BASE E ADICIONALIDADE	19
2.8 BARREIRAS AO MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO.....	21
2.9 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO.....	22
2.10. CONTRIBUIÇÃO DO SETOR ELÉTRICO PARA A GERAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA	23
2.11. MERCADOS DE CARBONO E MERCADOS DE ENERGIA ELÉTRICA.....	24
2.12. COMENTÁRIOS FINAIS	26
3. REDUÇÕES CERTIFICADAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. CASO PARTICULAR DA QUEIMA DO BIOGÁS	27
3.1 INTRODUÇÃO	27
3.2 ASPECTOS PRELIMINARES PARA A MODELAGEM DE GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO	28
3.2.1 - <i>Linha de base</i>	28
3.2.2 – <i>Cenários</i>	28
3.2.3 - <i>Suposições para a elaboração do modelo de cálculo</i>	29

3.3 ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE BIOGÁS.....	31
3.4. IMPLEMENTAÇÃO COMPUTACIONAL.....	34
3.5. RESULTADOS.....	35
3.6. COMENTÁRIOS FINAIS.....	41
4. TERMELÉTRICAS A BIOGÁS.....	43
4.1. INTRODUÇÃO.....	43
4.2. ASPECTOS TÉCNICOS.....	43
4.3. DESCRIÇÃO TÉCNICA E CONFIGURAÇÕES DE PLANTAS.....	45
4.4. CARACTERÍSTICAS OPERACIONAIS DOS EQUIPAMENTOS AO BIOGÁS.....	46
4.5. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO.....	46
4.6. VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA.....	47
4.7. COMENTÁRIOS FINAIS.....	48
5. ANÁLISE SÓCIO-ECONÔMICA.....	49
5.1. INTRODUÇÃO.....	49
5.2. FATORES DA ANÁLISE DE CUSTOS E BENEFÍCIOS.....	49
5.2.1. <i>Investimento</i>	49
5.2.2. <i>Direito aos Créditos</i>	50
5.2.3. <i>Preço do Carbono</i>	50
5.2.4. <i>Benefícios Sociais</i>	51
5.2.5. <i>Benefícios Ambientais</i>	51
5.2.6. <i>Benefícios de Oportunidade</i>	52
5.2.7. <i>Benefícios Econômicos</i>	52
5.2.8. <i>O Setor Privado</i>	52
5.2.9. <i>Coleta Seletiva</i>	52
5.3. ELEMENTOS DE CUSTOS DE INVESTIMENTOS.....	53
5.3.1. <i>Tipo de equipamento</i>	53
5.3.2. <i>Elementos de custos de captação de biogás</i>	54
5.3.3. <i>Custos de geração de energia</i>	55
5.3.4. <i>Custos de Certificação de Créditos de Carbono</i>	55
5.3.5. <i>Custos de benefícios sociais</i>	56
5.3.6. <i>Custos de operação</i>	56
5.3.7. <i>Custos de manutenção</i>	56
5.3.8. <i>Custos de energia de back-up</i>	56
5.3.9. <i>Royalties</i>	57
5.3.10. <i>Custos de impostos, taxas e transporte/distribuição</i>	57
5.3.11. <i>Custos de auditoria dos créditos de carbono</i>	57
5.3.12. <i>Tarifas</i>	57
5.3.13. <i>Custos evitados na geração, transmissão e distribuição</i>	58
5.4. COMENTÁRIOS FINAIS.....	58
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	61

6.1. CONCLUSÕES SOBRE OS MECANISMOS DE DESENVOLVIMENTO LIMPO.....	61
6.2. CONCLUSÕES SOBRE A GERAÇÃO DE ENERGIA E DOS CRÉDITOS DE CARBONO.....	64
6.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</u>	69
<u>APÊNDICE A - RESUMO DAS CONFERENCIAS DAS PARTES.....</u>	73
<u>APÊNDICE B - DADOS DO MERCADO.....</u>	75
<u>APÊNDICE C - NOTAS SOBRE PRODUÇÃO INDEPENDENTE DE ENERGIA.....</u>	78
1 - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA.....	78
2. - PRODUTORES DE ENERGIA ELÉTRICA	78
3. - PRODUTOR INDEPENDENTE DE ENERGIA	78
4. - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS)	79
5. - PROCEDIMENTO PARA CONEXÃO À REDE BÁSICA DO SISTEMA INTERLIGADO.....	79
6. - PROCEDIMENTO PARA CONEXÃO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO DO SISTEMA INTERLIGADO..	80
7. - MERCADO ATACADISTA DE ENERGIA ELÉTRICA (MAE).....	80
8. - CONTRATO DE COMPRA E VENDA DE ENERGIA ELÉTRICA.....	81
<u>APÊNDICE D- CONSIDERAÇÕES SOBRE ATERROS SANITÁRIOS.....</u>	82
1. CONTEXTUALIZAÇÃO E ASPECTOS PRELIMINARES	82
2. RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	83
3. GERAÇÃO E CAPTURA DE BIOGÁS.....	83
4. ATERROS SANITÁRIOS	85
<u>APÊNDICE E- CÓDIGO FONTE.....</u>	88
<u>APÊNDICE F- RESULTADOS COMPUTACIONAIS.....</u>	95

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. Esquema Simplificado de Negociações do IET	10
FIGURA 2. Interação dos Mecanismos Flexíveis e as Unidades de Emissão	13
FIGURA 3. Formulação dos Projetos de MDL	18
FIGURA 4. Adicionalidade e Linha de Base	19
FIGURA 5. Exemplo de linha de base e adicionalidade	20
FIGURA 6. Tela inicial do programa de cálculo	35
FIGURA 7. Metano produzido na linha de base e no projeto para 21 anos	39
FIGURA 8. Metano produzido na linha de base e no projeto para 21 anos (Variação)	41
FIGURA 9. Esquema da composição dos custos do aterro	55

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. EMISSÕES DE CO ₂ - COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS: BRASIL E ALGUNS PAÍSES EMERGENTES E DA OCDE, 1995	8
TABELA 2. TAXA INTERNA DE RETORNO FINANCEIRO DOS TIPOS DE PROJETO (Δ IRR).....	14
TABELA 3. PREVISÃO DE VOLUMES E PREÇOS DE CARBONO PARA 2005.....	15
TABELA 4. CICLO DO PROJETO DO MDL.	18
TABELA 5. CONSIDERAÇÕES DO PROJETO DE MDL TRABALHADO NESTA DISSERTAÇÃO.	30
TABELA 6. RESULTADO DA SIMULAÇÃO PARA POTENCIAL DE GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CO ₂ ^{EQUIV.} (TONELADAS DE CO ₂ EQUIVALENTES) PARA UM PERÍODO DE 21 ANOS (200 MIL HABITANTES).....	36
TABELA 7. RESULTADO DA SIMULAÇÃO PARA POTENCIAL DE GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CO ₂ ^{EQUIV.} (TONELADAS DE CO ₂ EQUIVALENTES) PARA UM PERÍODO DE 21 ANOS (500 MIL HABITANTES).....	37
TABELA 8. RESULTADO DA SIMULAÇÃO PARA POTENCIAL DE GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CO ₂ ^{EQUIV.} (TONELADAS DE CO ₂ EQUIVALENTES) PARA UM PERÍODO DE 21 ANOS (1 MILHÃO DE HABITANTES).....	38
TABELA 9. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO OBTIDOS PARA DIFERENTES VALORES DE POPULAÇÃO.	38
TABELA 10. VARIAÇÃO DA POPULAÇÃO – ESTUDO DE CASO.	39
TABELA 11. RESULTADOS DAS EMISSÕES ANTE A VARIAÇÃO DA POPULAÇÃO – ESTUDO DE CASO.....	40
TABELA 12. TECNOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS.....	44
TABELA 13. TAXA INTERNA DE RETORNO FINANCEIRO INCREMENTAL DO PROJETO (Δ IRR) EM %, TIPOS DE PROJETO SELECIONADOS, PREÇO CER US\$ 3/TCO ₂ ^{EQUIV.}	50
TABELA 14. NÍVEIS DE PREÇO PARA CERTIFICADOS DE REDUÇÕES DE EMISSÕES (CER).....	51
TABELA 15. CUSTOS E INVESTIMENTOS.....	65
TABELA 16. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO OBTIDOS PARA DIFERENTES VALORES DE POPULAÇÃO.	65
TABELA 17. CUSTOS E INVESTIMENTOS CONSIDERADOS NO <i>PAY-BACK</i>	66

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

- Δ IRR - Taxa interna de retorno financeiro incremental do projeto.
- AAU - Unidades de Quantidades Atribuídas.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ACM - Metodologia Consolidada Aprovada.
- AIJ - *Activities Implemented Jointly* - Atividades Implementadas Conjuntamente.
- AM - Metodologia Aprovada.
- atm – Atmosferas (No Sistema Internacional de Unidades e Medidas)
- MAS - Metodologia Aprovada para pequena escala.
- AND (DNA) - Autoridade Nacional Designada.
- ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica.
- BM&F – Bolsa de Mercados e Futuros.
- BTU - *British Thermals Unit*.
- C-B - Análise de custos-benefícios.
- CCAM – Comisión para la cooperación ambiental mexicana.
- CCD - Contrato de Conexão ao Sistema de Distribuição.
- CCT - Contrato de Conexão ao Sistema de Transmissão.
- CDCF - "*Community Development Carbon Fund*" do Banco Mundial
- CDM - *Clean Development Mechanism*.
- CDM EB - *Clean Development Mechanism – Executive Board*.
- CE MDL (CDM EB) - Conselho Executivo do MDL
- CER - Certificados de Emissões Reduzidas.
- CERUPT - *Certified Emission Reduction Unit Procurement Tender*.
- CH₄ - Metano
- CO₂ - Dióxido de carbono
- CO₂^{equiv.} - Dióxido de carbono equivalente
- COP – Conferência das Partes.
- CQNUMC (UNFCCC) - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima.
- CUSD - Contrato de Uso do Sistema de Distribuição.
- CUST - Contrato de Uso do Sistema de Transmissão.
- DCP (PDD) - Documento de Concepção do Projeto

DNA – (AND) *Designated National Authority*.

DNV - *Det Norske Veritas Certification*,

EB - Conselho Executivo (do MDL)

EC - European Commission - Comissão Europeia

EOD (DOE) - Entidade Operacional Designada (terceiro).

ERPA - *Emission Reduction Purchase Agreement* - Contrato de Compra de Reduções de Emissões

ERU - unidades de redução de emissão.

ET - *Emissions Trading*.

EUA – Estados Unidos da América.

FEC - Fator de Emissão de Carbono

GEE (GHG) - Gases de Efeito Estufa – *Greenhouse Gases*.

GWP - *Global Warming Potential* [ton CO₂^{equiv}/ton CH₄].

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

IC (JI) - Implementação Conjunta.

ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços.

IEA - Agência Internacional de Energia.

IET - Mercado Internacional de Emissões.

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas.

JI - Implementação Conjunta.

kW – Kilowatt.

LFG(E) - Gás de Aterro para Eletricidade.

LULUCF - Uso do solo, modificação no uso do solo, florestamento e reflorestamento.

MAE - Mercado Atacadista de Energia Elétrica.

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia.

MDL (CDM) - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

MDL EB - Escritório Executivo do MDL.

MMA – Ministério de Meio Ambiente.

MOP Meeting of the Parties - Reunião entre as Partes

MSW (RSU) - *Municipal Solid Waste*.

MtCO₂^{equiv} - Milhões de toneladas equivalentes de Dióxido de Carbono.

N₂O - Óxido nitroso.

ONG - Organização Não Governamental.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico Brasileiro.

ONU - Organização das Nações Unidas.

OPEP (OPEC) Organização dos Países Exportadores de Petróleo

PAG - Potencial de Aquecimento Global.

PCF - *Prototype Carbon Fund*.

PFC - Perfluorocarbono.

PDD - (DCP) *Project Design Document* - Documento de Concepção do Projeto.

PK – Protocolo de Kyoto.

PM - Plano de Monitoramento.

PMV - Plano de Monitoramento e Verificação.

PPA - *Power Purchase Agreement*.

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica.

PRODEEM - Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios.

QUELRO - *Quantified Emission Limitations And Reduction Obligations*.

RCE (CER) - Redução Certificada de Emissões (Unidade para transações MDL).

RSU – Resíduos sólidos urbanos.

SIGRS - Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos.

STP - Condições Standard de Pressão e Temperatura.

tCO₂^{equiv} - Tonelada de emissões equivalentes a dióxido de carbono.

ton –Tonelada.

TRM – Taxa Representativa de Mercado.

UQA (AAU) - Unidade de Quantidade Atribuída.

UNFCCC (CQNUMC) - *United Nations Framework Convention on Climate Change*. (Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima).

URE (ERU) Unidade de Redução de Emissões (Unidade para transações IC)

WB – Banco Mundial.

1. INTRODUÇÃO

É necessário tomar medidas contra as emissões descontroladas de gases de efeito estufa à atmosfera. Segundo GOLDENBERG (1998), o problema da relação causa – efeito entre o uso da energia e os danos ao meio ambiente é a base das relações entre energia – desenvolvimento, e assim o impacto ambiental em relação à energia consumida pelos diferentes setores econômicos é diferente. A preocupação está centrada no aumento do consumo energético, a geração de resíduos, e a repercussão destes efeitos na nossa sociedade.

O consumo de energia elétrica deve aumentar nos próximos anos e também os impactos ambientais. De fato, é necessário tomar medidas encaminhadas à conservação de energia e ao desenvolvimento sustentável em relação à geração de resíduos e a problemas como poluição urbana do ar, chuva ácida, aquecimento por efeito estufa, desertificação e desmatamento, degradação da costa marinha e derramamento de combustíveis. Neste sentido vem se desenvolvendo projetos de pesquisa em Universidades e por parte de empresas privadas, visando solucionar os problemas acima mencionados.

Dentre estes ressalta-se o problema de aquecimento global estudado a fundo pela Reunião-Quadro das Nações Unidas para Câmbio Climático (UNFCCC), cujas reuniões anuais têm encadeado uma série de medidas para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa (GEE).

Muitas teses e dissertações estudaram a fundo e recapitularam os fatos históricos destas reuniões denominadas “Conferências das Partes” (COP), em especial as teses de SANTOS (2002), OLIVEIRA (2000) e ROCHA (2003), cujas leituras dão ao interessado muita informação específica sobre os avanços destas, e também de avaliações técnicas e aplicativos de possíveis esquemas de mercados de carbono; no caso específico de MUYLAERT (2000), avaliam-se conceitos sócio-culturais dos avanços ali realizados.

1.1. Motivação

As considerações sobre meio ambiente anteriormente descritas, obrigam a comunidade científica, setores econômicos e governos a buscar soluções para o problema das emissões de gases de efeito estufa.

Existem diversas oportunidades para aprofundar mais sobre o estudo da mitigação de gases de efeito estufa e as conseqüências ambientais que causa a alteração climática. Com a recente implementação dos mecanismos flexíveis propostos no Protocolo de Kyoto, vislumbram-se novos cenários de oportunidades para a implementação de projetos de geração energética através de fontes limpas, as quais demandarão trabalho para pesquisadores e engenheiros. Estas oportunidades englobam também os setores econômicos, a sociedade e o meio ambiente.

As principais dificuldades destes mecanismos que visam controlar a deterioração ambiental centram-se na falta de políticas governamentais nos países industrializados e em desenvolvimento para implementação destes projetos, principalmente na falta de conhecimento e capacitação de profissionais e autoridades.

Um dos fatores que poderia contribuir para a superação desta dificuldade, seria uma participação efetiva dos agentes de setores governamentais e produtivos do País, incluindo as empresas energéticas, pois o potencial de benefícios obtidos nos aspectos sócio-econômicos é muito alto.

No caso específico dos projetos de geração de créditos de carbono, existem potencialidades a serem implementadas em fontes alternativas de energia como biomassa, eólica, co-geração e coleta de gases de efeito estufa a partir de resíduos orgânicos; uma vez que estas fontes estejam perto dos grandes centros de carga.

Contudo, existe uma grande relação entre projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e projetos de geração distribuída, uma vez que a descentralização da geração promove a diminuição de perdas na transmissão, uma vez que a geração está próxima do centro de carga.

A energia obtida a partir dos projetos de MDL é ecológica, sustentável, renovável, viável e competitiva. Com base nestas indicações, a inegável aplicabilidade dos projetos que envolvem geração

de créditos de carbono assim como o aporte ao desenvolvimento sócio-econômico do Brasil e a proteção do meio ambiente, surge a motivação para esta dissertação de mestrado.

O interesse desta dissertação está em estudar os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo como proposta presente no Protocolo de Kyoto (reunião focalizada na mudança climática sobre as medidas a serem tomadas para redução das emissões de gases efeito estufa realizada - GEE - em 1997), para ilustrar através de um exemplo aplicativo e prático, as vantagens ecológicas, sociais e econômicas que traz o desenvolvimento de um projeto de geração de créditos de carbono.

Diante de tal cenário, apesar de haver uma necessidade indiscutível de disseminação de estudos de projetos de MDL, evidenciam-se dificuldades tais como uma base regulatória ainda muito recente e deficiências advindas da pouca maturidade tecnológica. A questão do MDL é multidisciplinar e envolve problemas técnicos, ambientais, econômicos, políticos e sociais.

1.2. Objetivos

1.2.3. Geral

O presente trabalho tem como objetivo principal realizar um estudo apurado dos aspectos relacionados com o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), mediante a realização da prospecção bibliográfica, e a aplicação a um caso particular do cálculo de emissões reduzidas e geração de energia elétrica a partir de biogás.

1.2.4. Específicos

Como objetivos específicos e decorrentes do cumprimento do objetivo geral, podem-se citar:

- Realizar uma revisão da literatura sobre os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo e sua inter-relação com o marco regulatório de geração de energia elétrica.
- Analisar a aplicabilidade e viabilidade da realização de um projeto de desenvolvimento limpo no Brasil, mediante uma proposta científica, considerando o Protocolo de Kyoto.

- Realizar o cálculo de redução de emissões de gases de efeitos estufa e geração de energia a partir de metano proveniente do biogás.
- Efetuar uma análise dos aspectos técnicos da produção de energia elétrica a partir do biogás.
- Analisar os aspectos sócio-econômicos que podem viabilizar ou não o projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

1.3. Metodologia Utilizada

De modo a se alcançarem os objetivos propostos neste trabalho, foi utilizada uma metodologia baseada em dois tipos de pesquisa: uma pesquisa bibliográfica com contribuições de diversos autores sobre o assunto em livros, dissertações de mestrado, teses de doutorado e artigos de jornais científicos; e uma pesquisa documental que consiste no levantamento de dados a partir de materiais que não receberam tratamento analítico tais como, relatórios de pesquisa, relatórios de empresas e tabelas estatísticas, documentação de órgãos públicos e instituições privadas em páginas de internet especializadas acerca da utilização do Protocolo de Kyoto e em particular do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

Escolheu-se principalmente o tipo de pesquisa documental, pois conforme GIL (1991), os documentos pesquisados constituem-se fonte rica e estável de dados; apresenta baixos custos, pois exige apenas a disponibilidade de tempo do pesquisador; e não exige contato com os sujeitos da pesquisa.

1.4. Relevância do Trabalho

Em relação à relevância do tema pesquisado e da contribuição ao campo de estudo, pode-se dizer que o presente trabalho apresenta grande importância, uma vez que na literatura científica e, sobretudo em trabalhos de pesquisa, existem poucas referências sobre os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo no Brasil. Quando disponíveis raramente estão classificadas por tecnologia, natureza e seguidas de estratégias de transposição. Busca-se mostrar a viabilidade do emprego de

aterros sanitários em cidades de porte médio para gerar energia, o que é de grande relevância para o controle da poluição do meio ambiente urbano.

1.5. Limitações do Trabalho

Esta dissertação de mestrado não desenvolve um estudo sobre marcos legais referentes ao MDL, também não se aprofunda no desenho técnico dos aterros sanitários como biodigestores, equipamentos de bombeamento, tubulações para o vazamento do biogás, etc. Também não inclui considerações operativas e funcionais dos aterros. Não é feita uma análise sócio-econômica das populações envolvidas no projeto. Por último, não são consideradas disposições legais sobre aterros.

1.6. Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi estruturado em seis capítulos de modo a propiciar maior entendimento do tema e seqüência lógica.

No Capítulo 1 apresenta-se uma contextualização desta pesquisa, ressaltando as motivações que levaram à realização da mesma. São mostrados também os objetivos do trabalho, os alcances, as limitações e a metodologia utilizada.

O Capítulo 2 descreve os antecedentes históricos das Convenções do Clima referentes à criação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o Mercado de Carbono, ressaltando sua importância e avanços durante os últimos anos. Incluem-se ainda tópicos referentes ao funcionamento do mercado, a consolidação da demanda de créditos e às barreiras do mercado.

Posteriormente, é descrito o procedimento para a obtenção dos créditos de carbono a partir de um projeto de MDL considerando a avaliação das potencialidades de redução das emissões do gás de efeito estufa (GEE). É dada especial ênfase aos conceitos de linha de base e a adicionalidade. Finalmente é feita uma inter-relação entre mercados de energia elétrica e mercados de carbono.

No Capítulo 3, são apresentados os aspectos preliminares para a modelagem de geração de créditos de carbono, dentro dos quais diferenciam-se a linha de base e os cenários de referência que

visam a redução das emissões. Dentre as considerações principais para os projetos de redução de gases de efeito estufa (GEE) existem a voluntariedade, a adicionalidade, a sustentabilidade ambiental, as fugas e os direitos aos créditos de carbono. É apresentado o modelo de cálculo para a estimativa de geração de biogás de aterros sanitários, e posteriormente, explica-se a implementação computacional do mesmo. Ilustram-se os resultados obtidos para uma simulação de cálculo de redução de emissões e energia gerada.

O Capítulo 4 trata dos aspectos técnicos da produção de energia. É também efetuada uma descrição técnica da configuração da planta de geração, com as características operacionais dos equipamentos a biogás, assim como também aspectos de operação e manutenção.

O Capítulo 5 apresenta uma análise dos aspectos econômicos, que poderão viabilizar ou não o projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Neste caso, consideram-se aspectos sócio-econômicos que podem repercutir dentro da denominada atividade de projeto tanto na geração de energia renovável quanto na geração de unidades de redução de emissões.

Finalmente, no Capítulo 6, estão sintetizadas as conclusões desta pesquisa seguidas de recomendações para trabalhos futuros.

2. MECANISMOS DE DESENVOLVIMENTO LIMPO E MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA

2.1 Introdução

Este capítulo descreve os antecedentes históricos das Convenções do Clima que levaram à criação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o Mercado de Carbono, ressaltando sua importância e avanços durante os últimos anos. Incluem-se ainda alguns aportes referentes ao funcionamento do mercado, a consolidação da demanda de créditos e as barreiras à sua aceitação e implantação.

Posteriormente, é descrito o procedimento para a obtenção dos créditos de carbono segundo o MDL, considerando a avaliação das potencialidades de redução das emissões do gás de efeito estufa (GEE). É dada especial ênfase nos conceitos de linha de base e adicionalidade. Finalmente é feita uma inter-relação entre mercados de energia elétrica e mercados de carbono.

2.2 Antecedentes à evolução do Mercado

A Convenção Referencial das Nações Unidas para Câmbio Climático (UNFCCC), é um organismo cujo objetivo é promover a participação dos países em medidas ambientais, tais como a mitigação de emissões de Gases de Efeito Estufa¹ (GEE) e a recuperação dos solos e florestas. Este organismo promove reuniões anuais com o fim de informar os avanços nestas medidas.

No ano de 1992, foi feita no Rio de Janeiro a primeira reunião (Conferência das Partes – COP) que desencadeou um acordo voluntário dos países industrializados para a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa aos níveis do ano de 1990.

¹ Gás Carbônico (CO₂), Metano (CH₄), Óxido Nitroso (N₂O), Hidroclorofluorcarbono (HFC), Perfluorcarbono (PFC) e Hexafluoreto de Enxofre (SF₆).

Esta reunião marcou o princípio da tomada real de medidas para a redução das emissões de GEE por parte dos países desenvolvidos, porém, foi o começo também de discrepâncias entre tais países, devido à consideração de incluir nestas metas de redução níveis históricos de emissão de gases à atmosfera.

No entanto, investidores mundiais desses países, através de organizações privadas ou públicas, perceberam que estas metas de redução obrigatórias poderiam ser uma boa oportunidade de negócios, pois as metas poderiam ser vendidas como créditos². Desta maneira governos de países industrializados começaram a fazer investimentos nas áreas de mitigação de GEE e conservação de meio ambiente (MOURA-COSTA, 2002).

Foram realizadas várias reuniões em que os objetivos citados foram discutidos e debatidos. Um resumo das Conferências das Partes (COP), é apresentado no APÊNDICE A. Dentre estas Conferências das Partes, a que adquiriu real importância pelas propostas foi a Reunião de Kyoto – Japão no ano de 1997, na qual foi emitido o Protocolo de Kyoto.

Para ter uma idéia dos níveis de emissão de CO₂ do Brasil em relação ao transporte, apresenta-se a TABELA 1.

TABELA 1. Emissões de CO₂ - Combustíveis Fósseis: Brasil e Alguns Países Emergentes e da OCDE, 1995. (Fonte: POOLE, 1998)

	Brasil	Japão	EU	EUA	México	Índia	China	Rússia
CO ₂ e economia (kg CO ₂ /US\$ ₉₀ PIB _{PPP})	0,33	0,46	0,51	0,85	0,51	0,73	0,92	2,24
CO ₂ per capita (t CO ₂ /hab)	1,81	9,17	8,55	19,88	3,46	0,86	2,51	10,44
Total CO ₂ (milhões de t CO ₂)	287	1151	3180	5229	328	803	3007	1548
Emissões nos Transportes (milhões de t CO ₂)	119	252	828	1580	101	112	167	108
Participação dos Transportes (%)	41,5	21,9	26,0	30,2	30,8	13,9	5,6	7,0

² Os créditos foram considerados como o equivalente à redução ou seqüestro de carbono a ser utilizados para atingir direitos de poluição nos seus respectivos países.

2.3 Protocolo de Kyoto

O Protocolo de Kyoto surgiu como o compromisso legal assumido por 39 países desenvolvidos³ no sentido de reduzir suas emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE) em 5% para retornar aos níveis de emissões de 1990, visando resolver os problemas anteriormente descritos sobre emissões de GEE.

Estes limites de emissões devem ser alcançados dentro do “primeiro período do compromisso” entre os anos de 2008 a 2012. Os países desenvolvidos que possuem metas de redução de emissão são chamados de países do “Anexo 1” do texto do Protocolo de Kyoto, e os que não têm metas são os países “Não-Anexo 1”.

Como forma de atingir as metas de redução estabelecidas no Protocolo, foram criados três “mecanismos de flexibilização”: a Implementação Conjunta (*Joint Implementation – JI*), o Comércio de Emissões (*Emissions Trading – IET*) e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (*Clean Development Mechanism – CDM*, em português conhecido como MDL).

A Implementação Conjunta (JI) refere-se a projetos de mitigação implementados entre dois países do Anexo 1. Esta forma de projeto considera a criação, aquisição e transferência de “unidades de redução de emissão” (ERU), que podem ser debitadas das metas de redução quantificadas e inventariadas (QUELRO por suas siglas em inglês, *Quantified emission limitations and reduction obligations*) destes países.

³ Os países do Anexo I são em ordem alfabética: Alemanha, Austrália, Áustria, Bélgica, Bulgária, Canadá, Croácia, Dinamarca, Eslovênia, Espanha, Estados Unidos da América, Estônia, Federação Russa, Finlândia, França, Grécia, Hungria, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Letônia, Liechtenstein, Lituânia, Luxemburgo, Mônaco, Noruega, Nova Zelândia, Holanda, Polônia, Portugal, Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte, República Tcheca, República Eslovaca, Romênia, Suécia, Suíça, Turquia e Ucrânia.

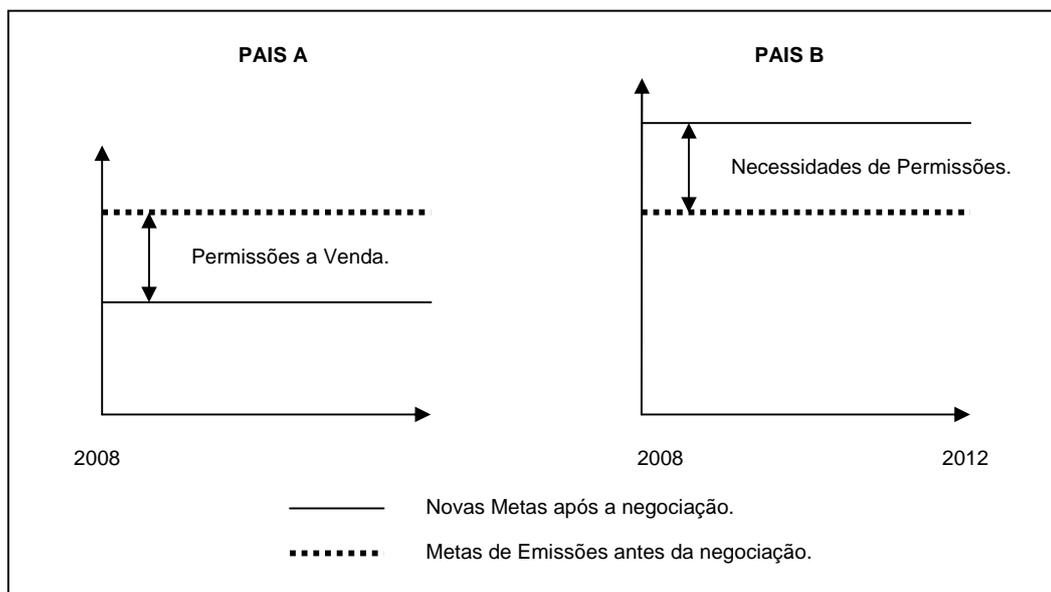


FIGURA 1. Esquema Simplificado de Negociações do IET.

(Fonte: Elaboração própria a partir de ACZEL, 2004)

Na FIGURA 1, ilustra-se como os países podem variar as respectivas metas de redução (QUELRO) após as negociações propostas no Protocolo de Kyoto para o primeiro período de compromisso (2008-2012). O país **A** tem um excedente de QUELRO a ser negociado no mercado de emissões (IET), e o país **B** tem a necessidade de comprar permissões, pois suas obrigações são maiores no primeiro período de compromisso.

Para FAUCHEUX (1998), os projetos de JI devem ser aprovados pelas partes envolvidas e promover uma mitigação adicional à que ocorreria em sua ausência. Além disso, a aquisição de ERU deve ser "suplementar"⁴ às ações domésticas realizadas.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) foi estabelecido pelo Artigo 12 do Protocolo de Kyoto e refere-se aos projetos de mitigação das mudanças climáticas realizados entre países do Anexo 1 e os países "Não Anexo 1".

Segundo JOUVET (2003), o MDL, embora se assemelhe ao JI, possui diferenças importantes em alguns pontos, como a consideração de que os investimentos em projetos, particularmente,

⁴ Atividade suplementar refere-se a uma atividade que não é comum e não faz parte da economia do país em questão.

devem contribuir para o desenvolvimento sustentável de países hospedeiros que não façam parte do Anexo 1, além de precisarem ser certificados por um órgão independente. Este último requisito originou o termo “Certificados de Emissões Reduzidas”, ou CER, que descreve o resultado dos projetos MDL.

No texto do Protocolo o Comércio de Emissões, é definido pelo Artigo 17 e determina que os países do Anexo 1⁵ podem transferir entre si partes de suas obrigações de redução de emissões de GEE. Desta maneira, os países que emitirem menos do que o autorizado pelo Protocolo, poderão vender suas permissões excedentes aos países que ultrapassaram suas cotas (FIGURA 1).

Os mecanismos flexíveis impõem um esquema de transações que consiste em que as companhias investidoras dos países do Anexo 1 pagam todos os custos dos projetos, assumindo os riscos, e se beneficiando das totalidades da quantidade de créditos de carbono obtido ao longo da vida útil do projeto.

2.4 Funcionamento dos Mercados de Carbono

As estratégias contempladas dentro do Protocolo de Kyoto consideram dois amplos campos de trabalho: Mitigação e Adaptação (JACQUES, 1999).

Para atingir estas metas, a reunião de Kyoto propôs uma variedade de políticas e medidas como o aumento da eficiência energética (co-geração, otimização de plantas industriais e de linhas de transmissão, entre outras), a promoção de energias alternativas (eólica, solar e biomassa), limitação das emissões de carbono, mudanças de combustível e mudanças no uso da terra (MUYLAERT, 2000).

Para expor adequadamente a evolução do mercado de carbono, é importante fazer uma descrição dos tipos de transações que têm lugar. As transações são contratos de compra-venda, através

⁵ Os 39 países industrializados e com economias em transição têm taxas de emissão já definidas no Protocolo de Kyoto. As obrigações de redução de emissões juridicamente vinculadas para os países do Anexo 1 variam de 8 % (Comunidade Européia) a 10 % (Islândia), aos níveis de 1990, até o primeiro período de compromisso do Protocolo (2008–2012) (WB, 2005).

dos quais uma parte paga à outra por uma determinada quantidade de “créditos” de emissões de GEE, que o comprador pode utilizar para cumprir suas obrigações de mitigação.

Os pagamentos podem ser efetuados através de capital social, dinheiro, dívida ou contribuições como tecnologia. Segundo INGARAMO e SIERRA (2005), as transações de carbono podem ser agrupadas em duas categorias:

- Transações baseadas em direitos de emissão: o comprador adquire os direitos de emissão criados pelos organismos reguladores dentro do marco de mercado de carbono de acordo com oferta e demanda. Os créditos de carbono negociados provêm seja de projetos de entidades que atingiram seus direitos de emissão ou de fundos de investimentos, e;
- Transações baseadas nos projetos: o comprador adquire os créditos de emissão de tais projetos, de modo, que as emissões de GEE são menores que as geradas na sua ausência. Este tipo de transações permite a criação de ativos ambientais que podem ser utilizados para cumprir obrigações de mitigação ou para serem vendidas em esquemas de mercado.

Todas as políticas de redução de GEE adquirem real importância com os Mecanismos Flexíveis, cujas abordagens de mercado visam aumentar a relação custo-benefício para os países que intervenham no desenvolvimento de políticas climáticas internas e que procuram reduzir os custos das suas reduções de emissões: Comércio Internacional de Emissões (IET), Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) e Implementação Conjunta (JI).

No capítulo terceiro, se aprofundarão mais os conceitos inerentes ao MDL, e às características propostas no texto do Protocolo como adicionalidade e linha de base, aplicadas ao caso particular de geração de créditos de carbono com geração de energia a partir do metano⁶. Assim mesmo, se abordarão os conceitos de voluntariedade, sustentabilidade ambiental e fugas.

Na FIGURA 2 ilustra-se a interação dos Mecanismos Flexíveis e as unidades de emissão. Como é mostrado acima, entre os países do Anexo 1 do Protocolo de Kyoto têm-se os projetos de Implementação Conjunta que originam as Unidades de Redução de Emissões. As Unidades de

⁶ Dentro dos projetos redução de emissões que tem adquirindo maior importância para a geração de unidades de redução de gases de efeito estufa (GEE), está a geração de energia a partir do biogás (composto principalmente por metano - CH₄) proveniente da decomposição do lixo orgânico dos aterros sanitários e os rejeitos suínos.

Quantidades Atribuídas (AAU) derivam do Mercado Internacional de Emissões (IET) dos países industrializados. Já com os países Não-Anexo 1, podem-se implementar o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), tratado nesta dissertação e detalhado nas próximas sessões.

As Unidades de Quantidades Atribuídas (AAU), as Unidades de Redução de Emissões (ERU) e os Certificados de Emissões Reduzidas (CER), são denominadas Unidades Equivalentes, válidas dentro dos períodos de compromisso estipulado no Protocolo de Kyoto.

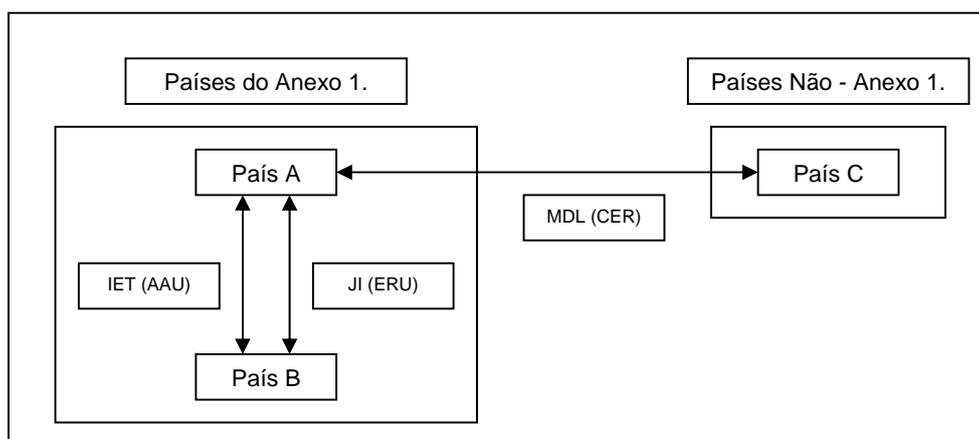


FIGURA 2. Interação dos Mecanismos Flexíveis e as Unidades de Emissão.

(Fonte: Elaboração própria a partir de ACZEL, 2004)

2.5 Dados do Mercado de Carbono

A oferta de redução de emissões tem sido concentrada em um número reduzido de países. Índia, Brasil e China são os maiores abastecedores de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (Ver FIGURA B3 do APÊNDICE B). Segundo JINGRU (2002), o incremento da industrialização na China há obrigado ao desenvolvimento de novas fontes energéticas visando o MDL, a tal ponto de atingir uma redução de 86.900 ton CO₂^{equiv}. A destruição de Hidroclorfluorcarbono⁷ (HFC), tem se convertido na atividade mais atrativa para investidores para redução de emissões. Neste cenário, os projetos de captura de metano (CH₄) e óxidos nitrosos (NO_x) procedentes da decomposição de resíduos orgânicos apresentam atratividade financeira, bem como projetos de micro-centrais hidrelétricas e biomassa (WB, 2005).

⁷ É utilizado como refrigerante e como matéria prima para a produção de resinas fluoradas. A liberação de uma tonelada de HFC na atmosfera equivale a liberar 11.700 toneladas de CO₂.

Segundo POOLE (1998) em 1995, o Brasil emitiu 0,33 kgCO₂/US\$₉₀ e 1,81 tCO₂/habitante contra 0,85 e 19,88 dos Estados Unidos, 0,92 e 2,51 da China e 0,51 e 8,55 da União Européia.

Os projetos de mitigação de emissões de gases de efeito estufa representam a maioria dos projetos apresentados no Comitê Executivo do MDL, enquanto os projetos como eficiência energética e substituição de combustível só equivalem ao 5% (INGARAMO e SIERRA, 2005).

Existem muitas publicações acadêmicas descrevendo modelos de cálculo dos preços das respectivas unidades do mercado de créditos de carbono de acordo com fatores econômicos dos países envolvidos nos projetos, como as expostas por KAYA (2003), sobre abatimento de GEE e modelagem econômico de emissões. MOURA COSTA (2000), esclarece que as especulações do mercado fazem variar os preços desde US\$ 0,16/t CO₂^{equiv} ⁸ (Honduras - Projeto de eletrificação rural financiado pelos EUA) até US\$ 241,14/t CO₂^{equiv} (Costa Rica - Projeto de Aeroenergia financiado também pelos EUA) (MOURA-COSTA, 2000). Os preços variam em relação à taxa interna de retorno financeiro de cada projeto e a relação oferta demanda de unidades de redução do país com obrigação no mercado.

O Banco Mundial (WB, 2005) fez uma análise dos diferentes tipos de empreendimentos de desenvolvimento limpo quanto ao tipo de tecnologia de geração de energia e de acordo com a taxa interna de retorno financeiro com base em preço de por CER de 3US\$/t CO₂^{equiv}, TABELA 2 (Veja-se também a FIGURA B4 do APÊNDICE B).

TABELA 2. Taxa interna de retorno financeiro dos tipos de projeto (Δ IRR).

(Fonte: WB, 2005).

Tipo de Projeto de MDL	ΔIRR (%)
Eficiência de energia - aquecimento da região	2,0-3,0
Vento	0,9-1,3
Hidrelétrica	1,2-2,6
Bagaço	0,5-3,5
Biomassa com energia de metano	<5,0
Resíduo sólido municipal com energia de metano	5,0>

⁸ t CO₂^{equiv} (Tonelada de Dióxido de Carbono equivalente) é a unidade de quantificação das emissões de GEE. O termo “equivalente” faz referência a que as emissões de outros GEE diferentes ao CO₂, são levadas a uma unidade de referência em termos de CO₂, junto com o GWP (*Global Warming Potential* [ton CO₂^{equiv} /ton GEE]).

As principais restrições do mercado têm a ver com a relação oferta-demanda. O preço real das transações do mercado depende principalmente do custo da implementação, do nível de avanço do projeto na hora das negociações, do tipo de pagamento projetado e do tipo de comprador. As transações mais comuns são baseadas na promessa de geração e emissão dos fluxos anuais de CER com pagamentos anuais. Isto produz um preço menor devido aos riscos que afetam a probabilidade de entrega dos certificados de emissões reduzidas (CER) emitidos (GREENHOUSE ISSUES, 1997).

O CER emitido num projeto de desenvolvimento limpo tem um valor alto, pois é válido em todos os países assinantes do Protocolo de Kyoto. É um certificado homogêneo e transferível livremente. Não tem riscos de regulamentação nem financeiros. Pode ser utilizado no futuro, inclusive dentro do segundo período de cumprimento (2013-2017) (BLACK-ARBELAEZ, 2005).

Embora existam estudos sobre preços de reduções de emissões, há também muita especulação para previsões de comportamento do mercado. Sobretudo é considerado que a quantidade de CER disponível no mercado é a responsável por estipular o preço das transações. Portanto, espera-se que dentro do primeiro período de compromisso, a quantidade disponível de unidades de redução seja menor e os preços maiores.

O Banco Mundial (WB, 2005), estipulou por exemplo uma previsão de preços das unidades de carbono (tCO_2^{equiv}), que podem dar uma idéia das estimativas dos preços para novos empreendimentos dentro de um esquema de mercado (TABELA 3).

TABELA 3. Previsão de Volumes e Preços de carbono para 2005. (Fonte: WB, 2005).

Mercados Existentes	Reduções Mt CO₂^{equiv}	Preço US\$/tCO₂^{equiv}	Milhões de US\$
Leilões no Reino Unido	9 - 39	6 - 23	215 - 229
Mercado no Reino Unido	2 - 5	4 - 12	7 - 60
<i>Prototype Carbon Fund</i> (PCF)	4,5 - 7,5	3 - 4	13 - 30
Dinamarca	0 - 0,8	2 - 4	0 - 3,2
América do Norte (EUA)	16 - 70	1 - 2	16 - 140
Outros	0,5 - 20	1 - 3	0,5 - 60
Total	44 - 158,3		303 - 602
Valor médio	104		453

Nas FIGURAS B1 e B5 do APÊNDICE B, apresentam-se os volumes anuais em toneladas equivalentes de CO₂^{equiv} negociados junto com os mecanismos propostos no Protocolo de Kyoto, e o volume total de mercado em unidades de redução de emissões por ano em milhões de dólares americanos.

2.6 Obtenção dos Créditos

As metodologias para a obtenção dos créditos de carbono não estão muito formalizadas. No geral são baseadas nas experiências apresentadas no Conselho Executivo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (EB - CDM) por empresas de consultoria e grupos técnicos que submeteram projetos junto aos planos de monitoramento e verificação das quantidades de emissões reduzidas.

A sugestão inicial para a obtenção final dos créditos é partindo do “Gerenciamento Estratégico de Carbono”, o qual é uma proposta administrativa que busca conhecer as emissões de gases de efeito estufa das empresas para gerenciá-las com ações específicas, visando reduções, oportunidades e riscos associados (MAY, 2003).

Dentro das categorias de gerenciamento destacam-se: fazer o inventário das emissões, com discriminação dos tipos, as quantidades e as fontes; conhecer as ações e procedimentos com o fim de controlar as emissões; e fazer inventário de oportunidades e riscos como os possíveis projetos de MDL e o conhecimento da legislação existente.

No Acordo de Marrakesh⁹ (UNFCCC SECRETARIAT, 2005b), propõe-se a metodologia anteriormente descrita para o desenvolvimento do Documento de Concepção do Projeto (PDD). Dentro do acordo detalha-se tecnicamente o projeto de redução de emissões de gases de efeito estufa via MDL (CDM EB, 2005f).

O Documento de Concepção do Projeto deve conter as seguintes informações:

- Descrição geral da atividade do projeto com informações sobre barreiras, tecnologias utilizadas, análise financeira.

⁹ O Acordo de Marrakesh foi a sétima conferência das Partes (COP7), efetuada no ano 2001 (Ver APÊNDICE 1).

- Duração do projeto – período de crédito. Este é o período durante o qual serão gerados os créditos e não é a vida útil do projeto. No Acordo de Marrakesh, aclara-se que estes períodos de créditos podem ser de 10 anos ou 7 anos, este último, renovável até duas vezes para o máximo de 21 anos.
- Metodologia de monitoramento para a redução de emissões, avaliando as incertezas associadas aos respectivos dados.
- O cálculo das emissões é a descrição das fórmulas usadas para estimar as emissões do projeto. (MOURA-COSTA, 2000).
- Análise dos impactos ambientais (biodiversidade, recursos naturais).
- *Stakeholder Comments*: Consultas e comentários das partes interessadas no projeto.
- Argumentação da adicionalidade e demonstração que o projeto não é de uso comum (prática comum) na região em que será implementado.

A validação é o processo de avaliação independente de uma atividade de projeto por uma entidade operacional designada (DOE).

O registro é a aceitação formal, pelo Conselho Executivo, de um projeto validado como atividade de projeto do mecanismo de desenvolvimento limpo. Trata-se do pré-requisito para a verificação, certificação e emissão das reduções certificadas de emissões relativas a essa atividade. Uma vez registrado, o projeto passa para a fase de monitoramento, que ocorrerá seguindo um plano estabelecido pela metodologia e terá como resultados os relatórios que serão submetidos à entidade operacional para a verificação (TOLMASQUIM, 2004).

A verificação é a revisão independente e periódica (feita pela entidade operacional designada) das reduções monitoradas das emissões antrópicas de gases de efeito estufa de tais projetos.

A certificação é a garantia por escrito dessa mesma entidade de que, durante um período especificado, uma atividade de projeto atingiu as reduções das emissões antrópicas de gases de efeito estufa por fontes, conforme verificado. Com a certificação é possível solicitar do Comitê Executivo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo as reduções certificadas de emissões. A emissão dos créditos é feita anualmente de acordo com a redução efetiva de emissões alcançada pelo projeto.

Na

FIGURA 3 e na TABELA 4 se sintetizam as etapas para a obtenção dos Créditos ante o comitê executivo do MDL.

TABELA 4. Ciclo do Projeto do MDL. (Fonte: BLACK-ARBELAEZ, 2005)

Etapa	Função	Responsável
Desenho do Projeto	Formulação do Projeto	Proponente
Aprovação	Avaliação nacional do projeto	Autoridade Nacional Designada – DNA.
Validação	Avaliação independente do projeto	Entidade Operacional Designada – DOE.
Registro	Registro oficial como projeto do MDL	EB (Comitê Executivo do MDL)
Monitoração	Medição do desempenho do projeto	Proponente
Verificação	Avaliação independente do desempenho	Entidade Operacional Designada – DOE.
Certificação	Constância escrita da redução das emissões.	Entidade Operacional Designada – DOE.
Expedição	Expedição e Distribuição das CER.	EB (Comitê Executivo do MDL)

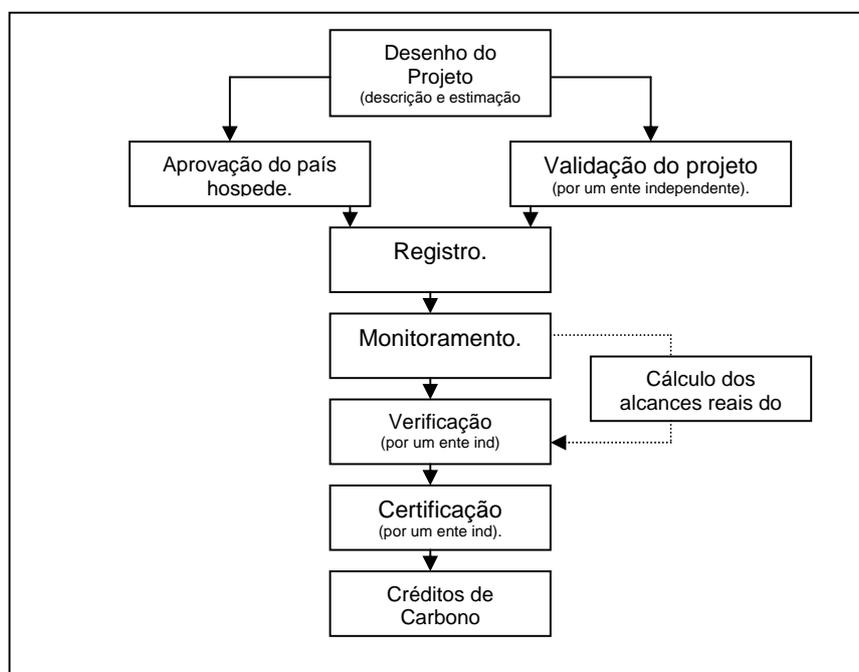


FIGURA 3. Formulação dos Projetos de MDL. (Fonte: BLACK-ARBELAEZ, 2005).

2.7 Linha de base e adicionalidade

No contexto do MDL, os Certificados de Emissões Reduzidas (Créditos de Carbono) baseiam-se na diferença em emissões de GEE entre práticas projetadas ou usuais (cenário de referência ou linha de base) e práticas que ocorrerem devido às atividades do projeto (cenário do projeto).

A diferença em emissões de gases de efeito estufa (segregação de CO₂) é definida como “adicionalidade”, e é o critério mais importante na prescrição da qualificação das atividades de mitigação no contexto do Protocolo de Kyoto.

Nas FIGURA 4 e 5, esquematizam-se de maneira simplificada os cenários: a linha de base, considerada como o cenário sem projeto e com uma quantidade específica de toneladas de dióxido de carbono equivalente; e o cenário na atividade do projeto com a quantidade de toneladas de dióxido de carbono menor que o do cenário anterior. Assim, a diferença entre a quantidade produzida na linha de base e a atividade do projeto é a quantidade de toneladas de dióxido de carbono equivalente deixada de ser emitida na atmosfera¹⁰.

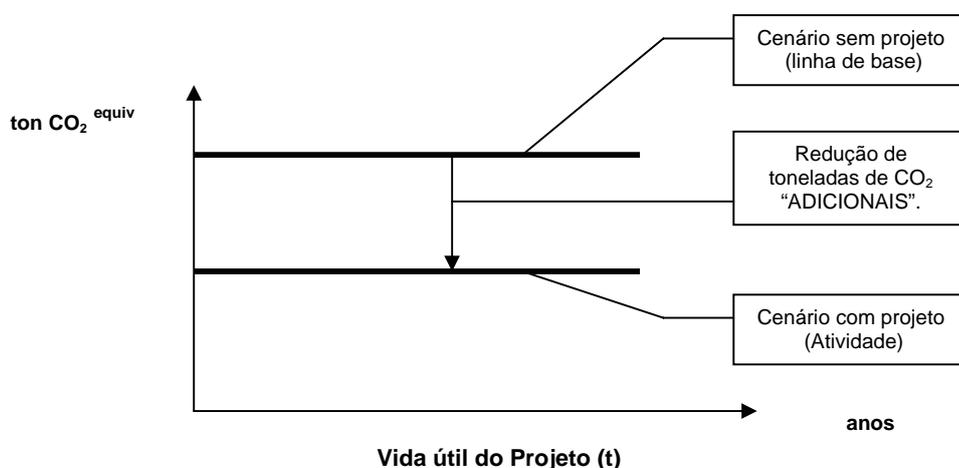


FIGURA 4. Adicionalidade e Linha de Base. (Fonte: Elaboração própria a partir de ACZEL, 2004)

Os projetos para redução de emissões devem considerar as metodologias de linha de base e de monitoramento pertinentes às suas atividades. Atualmente já existem metodologias aprovadas para

¹⁰ Um projeto de linha de base pode ser considerado, por exemplo, como um aterro sanitário que emite o biogás à atmosfera; enquanto o cenário do projeto nesse caso particular pode ser o aproveitamento energético desse biogás para a geração de energia elétrica.

diversos tipos de projetos¹¹. A metodologia de linha de base deve ser escolhida pelas emissões atuais ou históricas existentes.

A linha de base é definida pela Convenção-Quadro das Nações Unidas para Mudança Climática (UNFCCC SECRETARIAT, 1997) como o “cenário que representa, de forma razoável, as emissões antrópicas de gases de efeito estufa por fontes que ocorreriam na ausência da atividade de projeto proposto”.

A formulação da linha de base requer conhecimento das tendências no longo prazo no uso de energia na área do projeto, do contexto sócio-econômico local e das tendências macro-econômicas que possam afetar os resultados convencionais de um projeto.

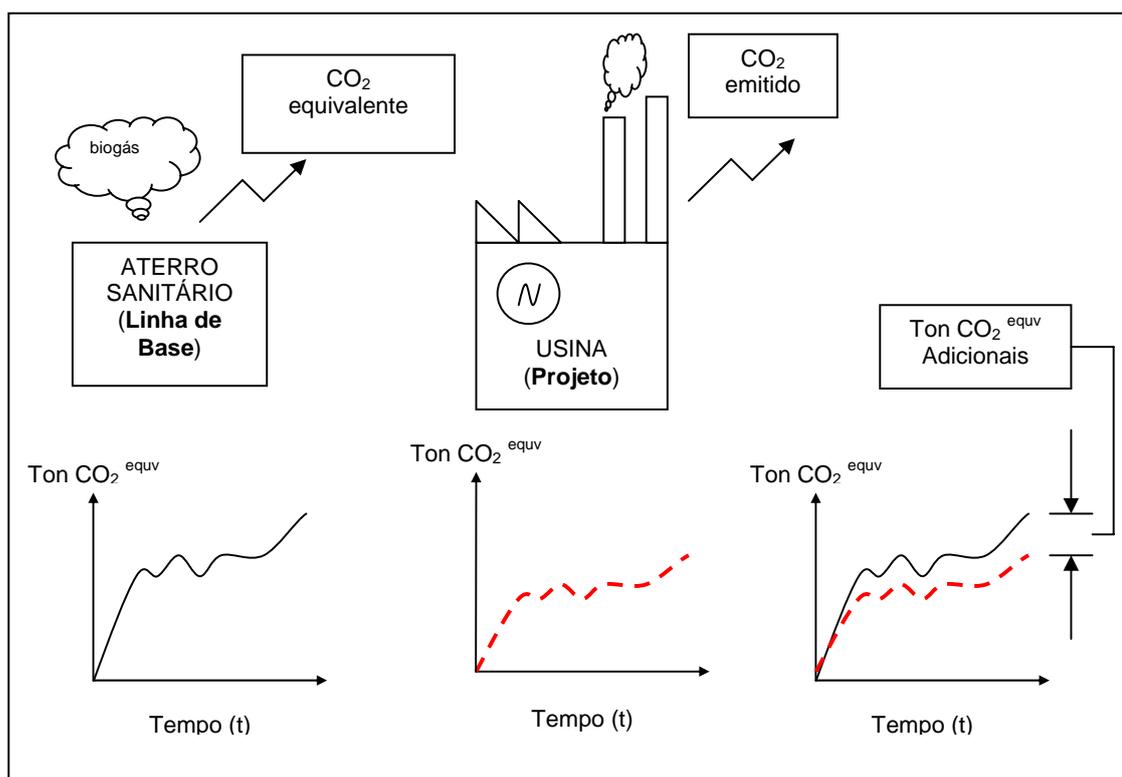


FIGURA 5. Exemplo de linha de base e adicionalidade.

Sobre a linha de base e a adicionalidade é necessário fazer os seguintes comentários:

¹¹ Nosso interesse são as metodologias enfocadas no aproveitamento energético do biogás.

1. A adicionalidade é definida como a quantidade de gases de efeito estufa deixada de emitir à atmosfera com a atividade do projeto. É considerada se o projeto contemplar as seguintes características: representa uma atividade não comum na região de abrangência, contribui com a sustentabilidade ambiental local, promove o desenvolvimento das condições de trabalho e a geração líquida de empregos, a distribuição de renda, a capacitação e desenvolvimento tecnológico, a integração regional e a articulação com outros setores.
2. A partir da formulação do projeto com a quantificação das reduções de carbono, e a definição do cenário de referência com as quantidades de gases de efeito estufa determinadas, os formuladores do projeto o submetem ante a Autoridade Nacional Designada (AND - No caso brasileiro é o Ministério de Meio Ambiente) para a avaliação. Depois da aprovação nacional, o projeto pode ter negociados seus créditos no mercado de Créditos de Carbono no Rio de Janeiro (Bolsa de Mercados e Futuros - BM&F) e procurar financiamento para a implementação do mesmo, enquanto é avaliado ante o Comitê Executivo do mecanismo de desenvolvimento limpo.
3. É importante considerar o caso no qual a quantidade real de créditos procedente do plano de monitoramento é inferior ou superior ao esperado: se o projeto já implementado gera reduções certificadas de emissões (CER) inferiores à quantidade estipulada no documento de concepção do projeto (PDD), avaliadas pelo plano de monitoramento, o investidor, responsável pelos créditos advindos da atividade do projeto, terá que comprar no mercado de créditos de carbono a quantidade necessária para igualar suas metas de redução de emissões. Do contrário, o projeto que gera um excedente de créditos de carbono, terá a possibilidade de negociar no mercado esta quantidade. Por esta razão, é recomendável fazer um cenário da atividade do projeto conservador.

2.8 Barreiras ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

TOLMASQUIM (2004) afirma que existe a preocupação de que o processo de aprovação dos projetos de MDL acarrete altos custos de transação. Estes custos podem representar barreiras para alguns projetos, particularmente os de pequena escala, que são alternativas promissoras para servir à demanda de energia em pequena escala com geração distribuída, em áreas onde há baixa densidade de consumidores e a demanda está dispersa. Portanto, tais sistemas são extremamente relevantes para a geração de energia descentralizada, porém representam taxas menores de retorno de investimento (ROMAGNOLI, 2005).

Ainda TOLMASQUIM (2004) esclarece que “a minimização dos custos de transação do MDL torna-se importante uma vez que os custos de redução dos gases de efeito estufa são geralmente, menores nos países em desenvolvimento”.

Se não existir essa diferença, será improvável que o mecanismo de desenvolvimento limpo continue de maneira satisfatória. A diferença entre os custos de redução doméstica de gases de efeito estufa dos países desenvolvidos e os custos de redução dos países em desenvolvimento deve ser elevada, de tal forma que possa cobrir todos os custos de transação. Assim, quanto mais altos forem os custos de transação, o mecanismo de desenvolvimento limpo perde atratividade. Portanto, os custos de transação podem decidir se o projeto é economicamente viável ou não.

Outra barreira é a falta de informação sobre as características e os benefícios das opções dos sistemas de energia renovável que visam uma redução de emissões de gases de efeito estufa, além dos custos. Isto inibe investidores e consumidores a aceitarem tais tecnologias. Os investidores consideram estas barreiras como fatores de alto risco.

A escassez de capital e conhecimento é freqüentemente citada como a razão para a falta de sucesso na implantação e na transferência de tecnologia. Como o mecanismo de desenvolvimento limpo provê tecnologia, capital e conhecimento, existe potencial, tanto para transpor algumas das barreiras existentes nestas transferências.

O mecanismo de desenvolvimento limpo deve permitir a instalação de uma base industrial tecnológica sólida, principalmente de energia renovável. No caso do Brasil, deve-se aproveitar as grandes potencialidades para o aproveitamento de recursos renováveis, fazendo que o País seja um fornecedor de tecnologia, aproveitando a base científica que já dispõe.

2.9 Considerações finais sobre o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

Para que os projetos se qualifiquem como atividades de mitigação válidas no contexto do Protocolo de Kyoto, devem satisfazer uma série de critérios de contribuição enumerados a seguir:

1. Adicionalidade.
2. Sustentabilidade ambiental local.

3. Desenvolvimento das condições de trabalho e a geração líquida de empregos.
4. Distribuição de renda.
5. Capacitação e desenvolvimento tecnológico.
6. Integração regional e a articulação com outros setores sócio-econômicos.

Finalmente, de acordo com as regras estabelecidas nas Conferências de Partes (COP) da Organização das Nações Unidas (UNFCCC SECRETARIAT, 2005a), a participação em um projeto de desenvolvimento limpo deve ser voluntária.

É necessário estabelecer a **adicionalidade** e a **linha de base**, além da metodologia de monitoramento que será utilizada para verificar o cumprimento das metas de redução de emissões de CO₂ equivalente. As atividades de um projeto de desenvolvimento limpo são adicionais se as emissões antropogênicas de CO₂ equivalentes forem menores do que as que ocorreriam na ausência do projeto.

Finalmente é necessário esclarecer nesta dissertação a contribuição do setor elétrico para a geração de gases de efeito estufa.

2.10. Contribuição do setor elétrico para a geração de gases de efeito estufa

O consumo de energia elétrica está associado diretamente à necessidade de procurar o bem estar das populações, embora a produção da energia exerça impactos sobre o meio ambiente como a influência na mudança climática, deterioração dos ecossistemas e geração de resíduos sólidos. Segundo GOLDENBERG (1998) a produção de energia elétrica é a principal fonte de emissões de gases de efeito estufa, constituindo cerca do 57% do total das emissões, acima das produzidas pelo setor industrial (23%), o desmatamento e a agricultura (4%) e transportes (16%).

A produção de eletricidade a partir dos combustíveis fósseis é a principal fonte de óxidos de enxofre, óxidos de nitrogênio, dióxido de carbono, metano e monóxido de carbono; todos eles considerados gases de efeito estufa. As causas principais do aumento do consumo de energia em virtude da deterioração ambiental são o crescimento populacional, crescimento econômico (maior nível *per capita* da população: maior utilização de aparelhos elétricos), crescimento industrial, preços baixos dos combustíveis (o que aumenta a demanda destes), e a redução dos preços da energia (reduz a economia de energia e incentiva o consumo).

No entanto o aumento do consumo energético está justificado do ponto de vista econômico e social de acordo com aumento da qualidade de vida, a segurança e a qualidade no fornecimento elétrico, a competitividade no setor e a proteção ao meio ambiente.

Cada uma delas pode-se aprofundar separadamente, embora têm muita correlação entre si: por exemplo, as melhoras na eficiência energética beneficiam a segurança no fornecimento elétrico e reduzem as emissões de gases de efeito estufa (reduzindo o consumo de combustíveis); mas a liberalização dos mercados energéticos propicia a concorrência e a redução dos custos de geração, o qual pode constituir um incentivo negativo na implantação de fontes limpas de energia e fomentar ainda o consumo energético (AGÊNCIA EUROPEIA DE MEIO AMBIENTE, 2002). Contudo é difícil encontrar um ponto de equilíbrio no qual se desenvolva uma produção sustentável de energia elétrica considerando também o aumento dos índices de consumo de energia *per capita* sem repercussões significativas sobre o meio ambiente.

As conseqüências do aumento do consumo de energia têm maior repercussão sobre o meio ambiente e as populações envolvidas. Quanto maior seja o consumo energético, será maior também a necessidade de geração de energia, o que se não é feito através de fontes limpas e tecnologias de alta eficiência, inevitavelmente produzirá emissões de gases de efeito estufa à atmosfera, além das repercussões sobre o hábitat.

Como ações urgentes para a sustentabilidade energética estão os programas de uso racional de energia, os incentivos às fontes renováveis, o aumento nos custos dos combustíveis e a substituição de combustíveis.

2.11. Mercados de carbono e mercados de energia elétrica

A inter-relação que existe entre mercado de energia elétrica e mercado de créditos de carbono, é devida às reduções certificadas de emissões (obtidas de acordo com os critérios expostos no Acordo de Marrakesh sobre voluntariedade, sustentabilidade ambiental, etc), que têm lugar só se realizada com geração de energia elétrica por fontes renováveis.

De acordo com INGRAMO e SIERRA (2005), os projetos desenvolvidos sob os requisitos do Protocolo de Kyoto, geram energia que pode ser negociada com dois parâmetros: o primeiro deles é a

venda dessa energia no “mercado spot” de energia elétrica, de acordo com a relação entre oferta e demanda; e também, pode ser negociada através de um contrato de abastecimento energético.

No entanto, deve-se considerar que os projetos de geração energética a serem desenvolvidos dentro do esquema de mercado, não geram por si mesmos muita atratividade financeira, pois estão enquadrados em ambientes concorrentes e competitivos. Por isso, é necessário trabalhar a implementação de mecanismos de mercado e de políticas governamentais que promovam as iniciativas do setor privado a favor de projetos de integração elétrica, como os de geração distribuída.

Entre outras as razões inerentes à possível falta de investimento em projetos de geração seriam (CCAM, 2001):

- Grandes custos de transação.
- Baixas tarifas da energia.
- Altos custos da receita para tecnologia importada.
- Baixas taxas de retorno do investimento.

Com os projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, além dos benefícios advindos da venda da energia gerada, estes projetos possuem os benefícios adquiridos da venda dos CER.

Com o incremento nos ingressos gerados pelos CER, os projetos de geração energética teriam um período de recuperação menor quando comparados aqueles sem o mecanismo flexível, atraindo investidores para novos projetos.

Com a criação de iniciativas na política energética e uso de tecnologias de energia renovável, o setor privado poderia desempenhar um papel importante para a implementação de novos projetos do MDL para satisfazer a demanda crescente de energia elétrica. Assim, por exemplo, os projetos de interligação podem se qualificar como MDL, gerando uma nova fonte de recursos que poderia contribuir ao financiamento de tais projetos.

É necessário complementar esta informação com as políticas e disposições do setor elétrico no âmbito federal e os aspectos relacionados à produção independente de energia elétricos, apresentados no APÊNDICE C.

2.12. Comentários Finais

Este capítulo descreveu os antecedentes históricos das Convenções do Clima que levaram à criação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o Mercado de Carbono. Discutiram-se idéias referentes ao funcionamento do mercado de créditos de carbono, a consolidação da demanda destes créditos junto como as barreiras do mercado.

Posteriormente, foi descrito o procedimento para a obtenção dos créditos a partir de um projeto de MDL considerando a avaliação das potencialidades de redução das emissões do gás de efeito estufa (GEE). Foi feita especial ênfase nos conceitos de linha de base e adicionalidade, e uma inter-relação entre mercados de energia elétrica e mercados de carbono.

3. REDUÇÕES CERTIFICADAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. CASO PARTICULAR DA QUEIMA DO BIOGÁS

3.1 Introdução

No capítulo anterior apresentou-se uma revisão bibliográfica sobre os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo, visando contextualizar o estudo de viabilidade da obtenção de benefícios tais como a geração de energia elétrica e a geração de créditos de carbono. Este capítulo vale-se das idéias anteriormente descritas e das teorias sobre disposição de resíduos sólidos apresentadas no APÊNDICE D para o cálculo genérico de emissões reduzidas.

Existem estudos segundo os quais afirma-se que os projetos de MDL oferecem taxas de retorno de investimentos muito altas. O Banco Mundial (WB, 2005), afirma que entre as diversas oportunidades do mercado de carbono, as reduções de emissões de metano de aterros sanitários são as que apresentam melhores taxas de retorno.

Esta é a razão pela qual para países em via de desenvolvimento, como o Brasil, o mecanismo de desenvolvimento limpo é uma oportunidade única, pelos benefícios de sustentabilidade ambiental e social. Considerando-se o potencial de geração de energia em aterros sanitários, este fato torna-se fundamental na viabilização desses empreendimentos (PRODEEM, 2005).

Neste capítulo considera-se, além da geração de créditos de carbono originada pelas emissões evitadas da combustão do biogás¹², a geração e abastecimento de eletricidade para uma possível distribuição regional, deslocando, uma determinada quantidade de combustíveis fósseis utilizados para a geração de energia elétrica.

São apresentados os aspectos preliminares para a modelagem de geração de créditos de carbono, dentro dos quais diferenciam-se a linha de base e os cenários de referência que visam a redução das emissões. Dentre as considerações principais para os projetos de redução de gases de

¹² Convertendo assim seu teor de CH₄ metano em CO₂

efeito estufa existem a voluntariedade, a adicionalidade, a sustentabilidade ambiental, as fugas e os direitos aos créditos de carbono.

É apresentado o modelo de cálculo para a estimativa de geração de biogás em aterros sanitários, e posteriormente, explica-se a implementação computacional do mesmo, ilustram-se os resultados obtidos para uma simulação de cálculo de redução de emissões e energia gerada para um projeto de 21 anos.

3.2 Aspectos preliminares para a modelagem de geração de créditos de carbono

Dentro do texto completo do Protocolo de Kyoto (UNFCCC SECRETARIAT, 1997), estão as considerações básicas para que os projetos de redução de emissões sejam factíveis dentro do MDL. Dentro destas, destacam-se dois conceitos fundamentais como visto no capítulo anterior: A Linha de Base e a Adicionalidade.

3.2.1 - Linha de base

O Conselho Executivo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo¹³ propõe que o cenário de linha de base seja feito a partir das emissões históricas (UNFCCC SECRETARIAT, 2001). Neste sentido, considera-se para a elaboração desta dissertação o cenário de linha de base como aquele no qual não é realizada nenhuma redução de emissões mediante a queima do CH₄ e considera a liberação total do biogás à atmosfera.

3.2.2 – Cenários

O cenário de referência é baseado no que aconteceria na ausência das atividades do projeto, ou seja, a liberação descontrolada e contínua de gás de aterro sanitário para a atmosfera (fato que acontece atualmente na maioria dos aterros sanitários no Brasil).

¹³ Órgão da Comissão Quadro das Nações Unidas para Mudança Climática (UNFCCC) para avaliação de projetos de MDL.

O cenário do projeto baseia-se na coleta e utilização de gás de aterro sanitário para a geração de eletricidade. Este uso converterá o teor de metano em dióxido de carbono. O volume real de gás coletado depende do desempenho do sistema de extração de gás e líquidos presentes no lixo.

Na TABELA 5, expõem-se as considerações do projeto de MDL trabalhado nesta dissertação, partindo do texto do Protocolo de Kyoto (UNFCCC SECRETARIAT, 1997) e do Acordo de Marrakesh (UNFCCC SECRETARIAT, 2001). Ali se encontram os conceitos fundamentais de voluntariedade, adicionalidade, sustentabilidade ambiental, fugas e direito aos créditos de carbono; indispensáveis para o entendimento deste trabalho.

3.2.3 - Suposições para a elaboração do modelo de cálculo

- Os aterros sanitários possuem drenos de gás por demanda de segurança e não por controle ambiental. No Brasil não existe uma regulamentação sobre a sucção forçada do biogás nem sobre os tipos de queimadores a serem utilizados na queima de metano. Este fato exemplifica uma oportunidade de mercado com a elegibilidade para venda de créditos de carbono, pois não se trata de uma prática comum e gera adicionalidade;
- Os cálculos estão realizados em Condições Normais de Pressão e Temperatura (CNPT), ou seja, 1 atmosfera de pressão e 25°C de temperatura;
- Considera-se o tempo de queima do gás como 100% (via micro-turbina e, na ausência destes, por meio do queimador);
- A capacidade de captação de gás é de 90% para um aterro sanitário a condições CNPT;
- O projeto gerará eletricidade a partir do aterro sanitário e para o sistema de distribuição;
- As emissões associadas ao consumo de eletricidade no sistema de distribuição existente são muito baixas, pois a eletricidade é fornecida predominantemente por fontes hidrelétricas no Brasil;
- Os anos seguintes à atividade do projeto poderão considerar-se como tempo propício para um novo projeto se a vida útil do aterro o permite (até 40 anos aproximadamente);
- Para a viabilização da geração de energia elétrica a partir do biogás, será estipulada uma população mínima de 200 mil habitantes. No Brasil, a geração diária de lixo *per capita* varia de 0,7 a de 1,3 kg/dia/habitante (MMA, 2005) com uma média de 1,0 kg/dia/habitante;

TABELA 5. Considerações do Projeto de MDL trabalhado nesta Dissertação. (Fonte: elaboração própria a partir de MMA, 2005 e WB, 1999).

Considerações do Projeto de MDL trabalhadas nesta Dissertação.	
<i>Voluntariedade</i>	<p>A participação das partes envolvidas neste tipo de projetos deve ser voluntária. Um projeto de desenho de aterro sanitário atende este critério uma vez que os órgãos governamentais brasileiros de planejamento urbano e meio ambiente viabilizem a expedição de licenças de instalação do aterro e não impossibilitem a recuperação, tratamento e queima das emissões do biogás.</p> <p>A voluntariedade é um requisito inerente que deve ser monitorado durante a vida útil do projeto. Para efeitos deste trabalho, considera-se a voluntariedade como fator implícito às partes envolvidas neste projeto.</p>
<i>Adicionalidade</i>	<p>Como bem se mencionou no segundo capítulo, a atividade de um projeto MDL, segundo o Acordo de Marrakesh (UNFCCC SECRETARIAT, 2001), é considerada adicional se as emissões antropogênicas de gases de efeito estufa são reduzidas abaixo do que ocorreria na ausência das atividades do projeto. A adicionalidade será demonstrada a partir do modelo de cálculo implementado em referência à linha de base.</p>
<i>Sustentabilidade Ambiental</i>	<p>O projeto de MDL deve contribuir para o desenvolvimento sustentável. Os efeitos do projeto sobre as populações de baixa renda acarretarão benefícios socioeconômicos, energéticos e melhorias na qualidade de vida, por meio da geração de renda das prefeituras e pela cobrança de taxas adicionais como <i>royalties</i>.</p> <p>As atividades do projeto conduzem à transferência de tecnologia e <i>know-how</i>.</p>
<i>Fugas</i>	<p>As fugas correspondem ao vazamento e a variação das emissões de GEE ocorrida fora dos limites do projeto. No caso deste trabalho não se consideraram fugas.</p>
<i>Direito aos créditos (Ownership)</i>	<p>Os créditos provenientes deste projeto, pertencerão ao investidor do projeto de geração de energia e/ou da queima do biogás, cabendo a este compensar na forma de <i>royalties</i> à prefeitura envolvida, quando não for o caso de aterros privados.</p>

- Os cálculos do potencial de geração de crédito de carbono de metano devem considerar o *Global Warming Potential*¹⁴ (GWP) para achar os créditos de carbono em toneladas de dióxido de carbono

¹⁴ [ton CO₂^{equiv}/ton CH₄]

equivalente (tonCO₂^{equiv}). O Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC) sugere um valor de 21 [tonCO₂^{equiv}/tonCH₄] para o metano. Qualquer cálculo realizado com um GWP superior representa um resultado conservador (CDM – EB, 2005a).

3.3 Estimativa de geração de biogás.

A seguir é realizada uma estimativa hipotética da quantidade de créditos de carbono gerados a partir da queima de biogás para geração de energia elétrica; dentro de um cenário também hipotético delimitado sob as considerações acima mencionadas. Para tal fim, é necessário realizar um algoritmo computacional que possa simular o comportamento a partir de um modelo de cálculo estipulado.

O modelo de cálculo seguido foi o proposto na metodologia AM0002 do Comitê Executivo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (CDM – EB, 2005a).

Os dados iniciais do modelo são: a população local em milhares de habitantes, a taxa de geração de lixo [kg/pessoa/dia], e a taxa de crescimento populacional por ano [%]. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2005), podem-se considerar uma taxa de crescimento populacional aproximada de 15% ao ano e uma geração de lixo de 1,0 kg/pessoa/dia, embora estes dados possam ser alterados segundo critério do calculista.

Com esses dados iniciais, procede-se ao cálculo da quantidade de metano projetado a ser gerado durante o ano t em metros cúbicos (m³) ($CH_4_projetado$).

$$CH_4_projetado(t) = k * L_o * \sum_{i=1}^t Lixo_produzido(i+1) * e^{-k*(i-ano(t))} \quad (1)$$

(CDM – EB, 2005a) Onde:

L_o = Geração de Metano pelo aterro com 60% material orgânico. [180 m³/ton Lixo].

k = Velocidade de degradação da matéria orgânica com 60% material orgânico [0,12 ton CH₄/ton Lixo].

$Lixo_produzido(t)$ = É a quantidade de lixo a ser produzida. [ton Lixo].

Existem dois conjuntos de parâmetros recomendados para o cálculo da geração de metano em aterros sanitários:

- Parâmetros de $L_0 = 100 \text{ m}^3/\text{ton}$ de lixo e de $k = 0,04 \text{ ton CH}_4/\text{ton Lixo}$, que é considerado, uma condição **conservadora** quanto à produção de metano.
- Parâmetros de $L_0 = 170 \text{ m}^3/\text{ton}$ de lixo e de $k = 0,05 \text{ ton CH}_4/\text{ton Lixo}$, que é considerado, uma condição **realista** quanto à produção de metano.
- Os parâmetros L_0 e k são os mais importantes da fórmula, pois refletem variações de acordo com o local, clima, tipo de lixo, etc. Teoricamente, o fator k varia de 0,003 a 0,21 ton $\text{CH}_4/\text{ton Lixo}$. Nas condições brasileiras o fator pode ser aplicado com magnitudes de 0,05 até 0,15. Já o fator L_0 é proporcional à porcentagem de matéria orgânica presente no lixo e pode variar de zero (no caso de ausência de material degradável) até $300 \text{ m}^3/\text{ton}$. Como no Brasil a matéria orgânica é cerca de metade dos resíduos sólidos urbanos, o L_0 varia de 140 até $190 \text{ m}^3/\text{ton}$ (CDM – EB, 2005a).

Com a quantidade de metano projetado ($CH_4_projetado$), calcula-se a quantidade de biogás projetado a ser gerada no aterro [m^3] ($biogás_projetado$).

$$biogás_projetado(t) = \frac{CH_4_projetado(t)}{CH_4/biogás_produzido(t)} \quad (2)$$

Onde:

$CH_4/biogás_produzido$ = Quantidade de metano estipulado contido no biogás [m^3].

Com a quantidade de biogás projetado a ser gerada no aterro ($biogás_projetado$) pôde-se calcular a quantidade de metano a ser gerada cada ano [m^3] ($CH_4_produzido$).

$$CH_4_produzido(t) = biogás_projetado(t) * FD * CH_4/biogás_produzido \quad (3)$$

Com;

FD = Fração de gases capturados e queimados no aterro durante o ano t [50 %];

A partir do resultado anterior, calcula-se a quantidade de metano queimada durante o ano t na linha de base [m^3] ($CH_4_linhabase$).

$$CH_4_linhabase(t) = CH_4_produzido(t) * \frac{Lixo_atual(t)}{Lixo_produzido(t)} * \frac{CH_4/biogás_projetado}{CH_4/biogás_produzido} \quad (4)$$

Onde:

$Lixo_atual(t)$ = Quantidade de resíduos no ano t [ton].

$CH_4 / biogás_projetado$ = Quantidade de metano projetado no biogás [m^3].

Com a quantidade de metano projetado ($CH_4_projetado$), calculado na fórmula (1), procede-se o cálculo da quantidade de metano queimado durante o ano t [m^3] ($CH_4_queimado$).

$$CH_4_queimado = CH_4_projetado * Efcl_coleta \quad (5)$$

Com;

$Efcl_coleta$ = Eficiência de coleta de lixo [p.u.] (projeto) = 0,80;

Assim, a redução de metano [m^3 (CNPT) CH_4] (ER_CH_4) é calculada como:

$$ER_CH_4 = CH_4_queimado - CH_4_linhabase \quad (6)$$

E finalmente, a Redução de Gás de Efeito Estufa [$ton\ CO_2^{equiv}$] (ER) e o total de Emissões Reduzidas em $ton\ CO_2^{equiv}$, são respectivamente:

$$ER = ER_CH_4 * GWP_CH_4 * CF \quad (7)$$

$$Total_ER = \sum_{i=1}^t ER(t) \quad (8)$$

Onde:

CF = Fator de conversão [$0,000662\ ton\ CH_4 / m^3(CNPT)CH_4$].

GWP_CH_4 = Potencial de aquecimento global (*Global Warming Potential* - converte uma tonelada de CH_4 em tonelada de CO_2^{equiv}) [$21\ ton\ CO_2^{equiv} / ton\ CH_4$].

A energia gerada a partir da quantidade de metano obtido no aterro é:

$$Energia = \frac{ER_4}{Dens_CH_4} * PC_CH_4 \quad (9)$$

$$Energia_Total = \sum_{i=1}^t Energia(t) \quad (10)$$

Energia em kCal ou kWh.

$Total_ER$ = Redução de total de GEE durante os anos do projeto. [ton CO₂^{equiv}].

$Dens_CH_4$ = Densidade do Metano a condições de temperatura e pressão padrão [0,652 kg/m³].

PC_CH_4 = Poder Calorífico do Metano [9341 kCal/ m³ ou 10,86 kWh/ m³].

3.4. Implementação Computacional

A implementação do modelo de cálculo anteriormente descrito foi feita em MATLAB 7.0. Foi realizada uma interface gráfica a partir das ferramentas de GUIDE do próprio MATLAB, da tal modo que se pode abrir com janela de WINDOWS sob o comando de MATLAB com o *mfile* **aterro.m**.

A tela inicial do programa permite ao calculista das emissões interagir em três aspectos:

- Características da população: População em milhares de habitantes, taxa de crescimento populacional por ano e taxa de geração de lixo (kg/pessoa/dia). A interface considera como dados iniciais os propostos pelo IBGE (IBGE, 2005), tais como uma taxa de crescimento populacional de 15% e a taxa de geração de lixo de 1,0 kg/pessoa/dia.
- Características do projeto: Anos do projeto e eficiência de coleta de lixo (%). O dado dos anos não é a vida útil operativa do aterro, mas sim o referente ao Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. O valor da eficiência de coleta de lixo pode ser determinado estatisticamente ou estimado.
- Características da captura do metano a condições normais de pressão e temperatura -CNPT (1atm e 25°C): Geração de Metano pelo aterro (L_0), velocidade de degradação da matéria orgânica (k), fator de conversão (CF); potencial de aquecimento do metano (GWP_CH_4); e a densidade do metano ($Dens_CH_4$). Os valores iniciais do programa são:
 - $L_0=180$ m³/ton Lixo;
 - $k=0,12$ ton CH₄/ton Lixo;
 - $CF=0,000662$ ton CH₄/ m³ CH₄;
 - $GWP_CH_4=21$ ton CO₂^{equiv} / ton CH₄;
 - $Dens_CH_4=0,652$ kg/m³.

O código fonte do programa apresenta-se no APÊNDICE E – CÓDIGO FONTE.

Na FIGURA 6, apresenta-se a aparência da tela inicial do programa na interface gráfica.

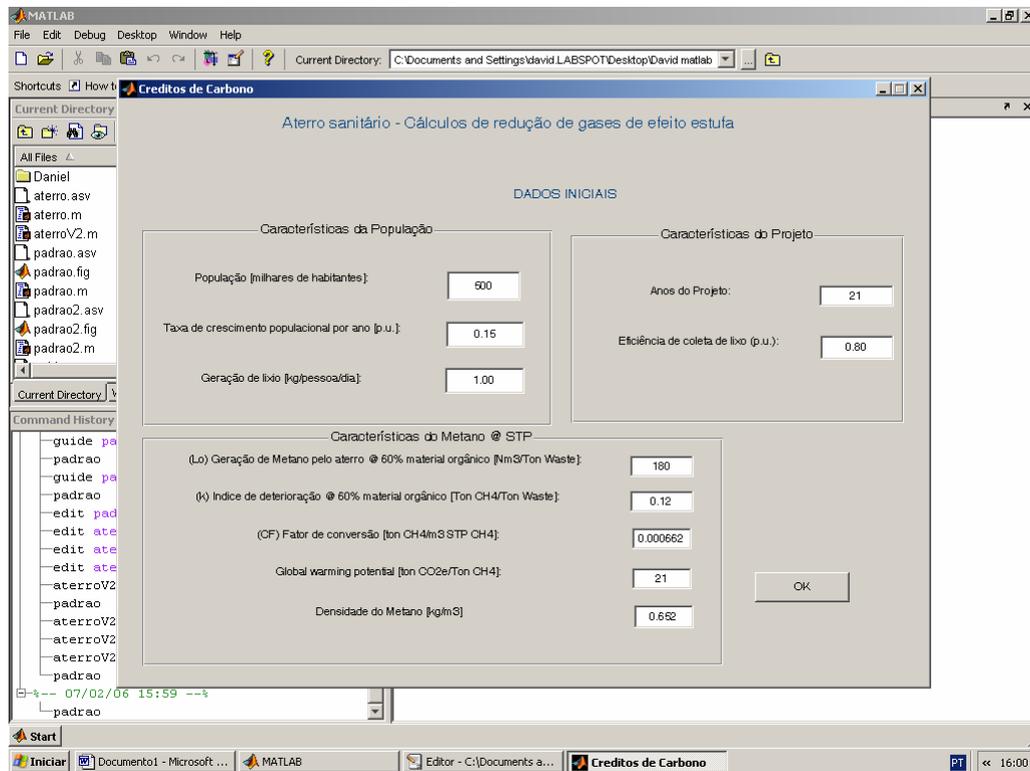


FIGURA 6. Tela inicial do programa de cálculo.

O resultado do programa é um arquivo de texto (*saída.txt*) apresentado no APÊNDICE F - RESULTADOS. Este arquivo referencia duas partes: a primeira possui as características iniciais dadas pelo calculista na tela inicial de população, projeto e características do metano. A segunda parte possui os resultados referentes para cada ano do projeto: população, quantidade de resíduos, quantidade de biogás gerado por esses resíduos; assim como também a quantidade de metano nesse gás gerado, quantidade de metano utilizado para geração de energia, emissões de dióxido de carbono produto da queima do metano, as reduções de metano, as reduções equivalentes de dióxido de carbono, e finalmente a energia gerada a partir do metano.

3.5. Resultados.

As estimativas de créditos de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_2^{\text{equiv}}$) são apresentadas para o caso de estudo de um período de sete anos prorrogáveis para dois novos períodos, ou seja, um total de

21 anos. Estas estimativas foram obtidas a partir dos cálculos do potencial de geração de créditos de carbono e de energia elétrica já apresentados na sessão anterior deste capítulo para quatro casos: População com 200 mil, 500 mil e 1 milhão de habitantes; e população base de 500 mil habitantes com taxa de crescimento variável no tempo.

Nas TABELA 6, 7 e 8 apresentam-se os resultados da simulação para potencial de geração de créditos de CO₂ equivalentes (ton CO₂^{equiv}) para um período de 21 anos para cada quantidade de população descrita acima. Nestas tabelas há para cada ano em questão a quantidade de biogás estimada a ser gerada pelo lixo do aterro (biogás projetado), também a quantidade de metano desse biogás que seria liberado na linha de base (CH₄_{linhaBase}), e a quantidade de metano utilizado para geração de energia (CH₄_{projetado}), as emissões de dióxido de carbono produto da queima do metano, as reduções de metano em unidades equivalentes de dióxido de carbono, e finalmente a energia gerada a partir do metano.

TABELA 6. Resultado da simulação para potencial de geração de créditos de CO₂^{equiv}. (toneladas de CO₂ equivalentes) para um período de 21 anos (200 mil habitantes).

Ano	Biogás Projetado [Nm3/ano]	CALCULOS DAS EMISSOES				Energia total [MWh/ano]
		CH4 Projetado [Nm3/ano]	CH4 linhaBase [Nm3/ano]	Reduções de CH4 [Ton]	Reduções Equiv.CO2 [Ton/ano]	
1	1576800	788400	1261440	473040	6576	3349772
2	1777837	888919	1422270	533351	7415	3776858
3	2004506	1002253	1603605	601352	8360	4258395
4	2260074	1130037	1808059	678022	9426	4801327
5	2548226	1274113	2038581	764468	10628	5413481
6	2873117	1436558	2298494	861935	11983	6103683
7	3239430	1619715	2591544	971829	13510	6881883
8	3652447	1826224	2921958	1095734	15233	7759302
9	4118123	2059061	3294498	1235437	17175	8748588
10	4643171	2321585	3714537	1392951	19365	9864006
11	5235160	2617580	4188128	1570548	21834	11121635
12	5902627	2951313	4722101	1770788	24617	12539609
13	6655193	3327597	5324155	1996558	27756	14138370
14	7503709	3751855	6002967	2251113	31295	15940967
15	8460409	4230204	6768327	2538123	35285	17973390
16	9539084	4769542	7631267	2861725	39784	20264941
17	10755287	5377644	8604230	3226586	44856	22848657
18	12126553	6063276	9701242	3637966	50575	25761789
19	13672650	6836325	10938120	4101795	57023	29046336
20	15415870	7707935	12332696	4624761	64293	32749652
21	17381345	8690672	13905076	5214403	72491	36925130

Emissões Evitadas Totais [Ton CO2e]= 589479
Energia Total Gerada [MWh]= 300267772

Para estes 21 anos e uma população de 200 mil habitantes, tem-se uma quantidade de emissões reduzidas de 590 Mton CO₂^{equiv}, que podem ser negociadas no Mercado de Créditos de Carbono. Também está a energia total gerada no projeto: 300.267 GWh.

Com base nestes resultados pode-se realizar uma estimativa da potência das unidades geradoras a serem instaladas para a produzir energia elétrica. O caso particular dos 21 anos de estudo do projeto considera uma energia final de 36,25 GWh/ano. Para gerar esta energia ao longo deste ano é necessário ter uma potência instalada de 11,54 MW. Para efeitos desta dissertação será considerada uma potência instalada de 12 MW.

Para as populações de 500 mil e 1 milhão de habitantes são apresentadas a seguintes tabelas:

TABELA 7. Resultado da simulação para potencial de geração de créditos de CO₂^{equiv.} (toneladas de CO₂ equivalentes) para um período de 21 anos (500 mil habitantes).

Ano	Biogás Projetado [Nm ³ /ano]	CH ₄ Projetado [Nm ³ /ano]	CALCULOS DAS EMISSOES			Energia total [MWh/ano]
			CH ₄ linhaBase [Nm ³ /ano]	Reduções de CH ₄ [Ton]	Reduções Equiv. CO ₂ [Ton/ano]	
1	3942000	1971000	3153600	1182600	16441	8374431
2	4444593	2222296	3555674	1333378	18537	9442144
3	5011264	2505632	4009011	1503379	20900	10645988
4	5650185	2825092	4520148	1695055	23565	12003318
5	6370565	3185283	5096452	1911170	26569	13533703
6	7182792	3591396	5746234	2154838	29957	15259207
7	8098576	4049288	6478861	2429573	33776	17204708
8	9131119	4565559	7304895	2739336	38082	19398254
9	10295307	5147654	8236246	3088592	42938	21871471
10	11607927	5803963	9286341	3482378	48412	24660014
11	13087901	6543950	10470321	3926370	54584	27804089
12	14756567	7378284	11805254	4426970	61544	31349022
13	16637983	8318991	13310386	4991395	69390	35345924
14	18759273	9379637	15007419	5627782	78237	39852418
15	21151022	10575511	16920817	6345306	88212	44933476
16	23847710	11923855	19078168	7154313	99459	50662352
17	26888218	13444109	21510575	8066465	112140	57121643
18	30316381	15158191	24253105	9094914	126438	64404472
19	34181625	17090812	27345300	10254487	142558	72615840
20	38539674	19269837	30831739	11561902	160734	81874131
21	43453361	21726681	34762689	13036008	181227	92312825

Emissões Evitadas Totais [Ton CO₂e]= 1.473.698
Energia Total Gerada [MWh]= 750.669.429

Se for o caso de ser realizado um estudo de dez anos na população de 500 mil habitantes, seria feita a soma parcial das emissões evitadas e da energia gerada para os dez primeiros anos. Isto é, que para estes dez anos, tem se uma quantidade de emissões reduzidas de 299 Mton CO₂^{equiv.}, e uma energia total gerada no projeto: 152.393 GWh.

TABELA 8. Resultado da simulação para potencial de geração de créditos de CO₂^{equiv.} (toneladas de CO₂ equivalentes) para um período de 21 anos (1 milhão de habitantes).

Ano	CALCULOS DAS EMISSOES					
	Biogás Projetado [Nm3/ano]	CH4 Projetado [Nm3/ano]	CH4 linhaBase [Nm3/ano]	Reduções de CH4 [Ton]	Reduções Equiv. CO2 [Ton/ano]	Energia total [MWh/ano]
1	7884000	3942000	6307200	2365200	32881	16748861
2	8889185	4444593	7111348	2666756	37073	18884288
3	10022528	5011264	8018023	3006758	41800	21291975
4	11300369	5650185	9040295	3390111	47129	24006635
5	12741131	6370565	10192904	3822339	53138	27067406
6	14365585	7182792	11492468	4309675	59913	30518415
7	16197151	8098576	12957721	4859145	67552	34409416
8	18262237	9131119	14609790	5478671	76164	38796509
9	20590615	10295307	16472492	6177184	85875	43742941
10	23215854	11607927	18572683	6964756	96824	49320029
11	26175802	13087901	20940641	7852741	109169	55608177
12	29513134	14756567	23610507	8853940	123087	62698045
13	33275966	16637983	26620773	9982790	138781	70691848
14	37518547	18759273	30014837	11255564	156475	79704836
15	42302043	21151022	33841635	12690613	176425	89866951
16	47695421	23847710	38156336	14308626	198919	101324705
17	53776437	26888218	43021149	16132931	224280	114243286
18	60632763	30316381	48506210	18189829	252875	128808945
19	68363249	34181625	54690599	20508975	285116	145231680
20	77079348	38539674	61663479	23123805	321467	163748262
21	86906723	43453361	69525378	26072017	362453	184625650

Emissões Evitadas Totais [Ton CO2e]= 2.947.397
Energia Total Gerada [MWh]= 1501.338.858

Na TABELA 9 apresenta-se um resumo dos valores obtidos para os três casos da população de acordo com os resultados do programa.

TABELA 9. Resultados da simulação obtidos para diferentes valores de população.

População (mil habitantes).	Emissões Reduzidas (Mton CO ₂ ^{equiv.}).	Energia Gerada (GWh).	Energia Final no ano 21 (GWh/ano).	Potência Instalada (MW)
200	590	300.267	36,25	12
500	1.473	750.669	92,31	30
1000	2.947	1.501.338	184,62	60

Na FIGURA 7, ilustra-se a quantidade de metano produzida na linha de base e no projeto para os 21 anos de estudo e uma população de 500 mil habitantes. As reduções totais que representam a quantidade equivalente de metano são obtidas a partir da adicionalidade. Segundo a figura em questão, a diferença entre a quantidade de metano entre a linha de base e a atividade de projeto é o total de emissão reduzida de metano.

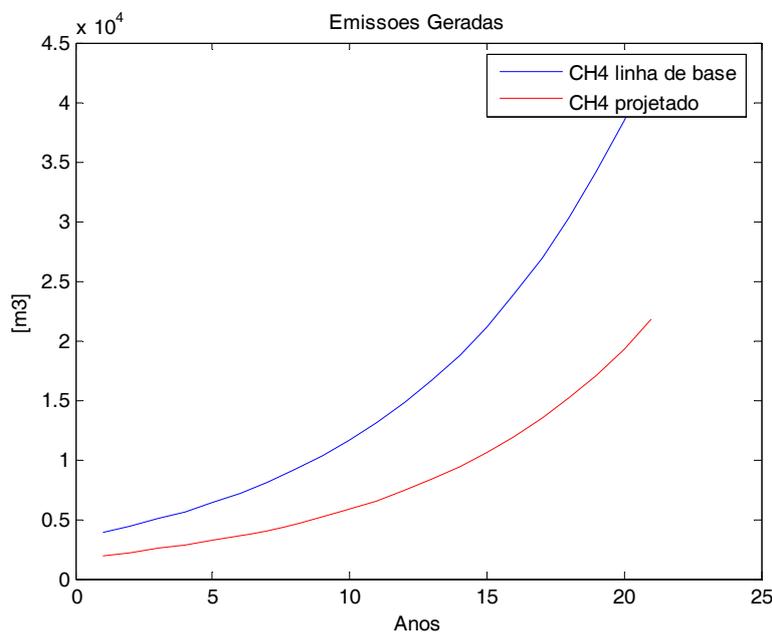


FIGURA 7. Metano produzido na linha de base e no projeto para 21 anos (500 mil habitantes).

Adicionalmente, apresentam-se os resultados realizando uma sensibilidade da população. O caso foi feito de acordo com um valor inicial de população de 500 mil habitantes e uma taxa de crescimento não constante segundo a TABELA 10.

TABELA 10. Variação da População – Estudo de Caso.

Anos	Taxa (%)
01-10	15
11-16	7
17-21	10

Foram considerados estes valores visando avaliar a geração de emissões reduzidas no caso de uma taxa de crescimento variável da população durante um curto período de tempo.

Os resultados apresentam-se na TABELA 11 e na FIGURA 8.

Para estes 21 anos e uma população base 500 mil habitantes, tem-se uma quantidade de emissões reduzidas de 1173 Mton CO₂^{equiv}, que podem ser negociadas no Mercado de Créditos de Carbono. Também está a energia total gerada no projeto: 597.678 GWh.

TABELA 11. Resultados das Emissões ante a variação da população – Estudo de Caso

Ano	CH₄ Projetado [Nm³/ano]	CH₄ Baseline [Nm³/ano]	CH₄ Flared [Nm³/ano]	Reduções de CH₄ [Ton]	Reduções CO₂^{equiv} [Ton]	Energia total [MWh]
1	3942000	1971000	3153600	1182600	16441	8374431
2	4444593	2222296	3555674	1333378	18537	9442144
3	5011264	2505632	4009011	1503379	20900	10645988
4	5650185	2825092	4520148	1695055	23565	12003318
5	6370565	3185283	5096452	1911170	26569	13533703
6	7182792	3591396	5746234	2154838	29957	15259207
7	8098576	4049288	6478861	2429573	33776	17204708
8	9131119	4565559	7304895	2739336	38082	19398254
9	10295307	5147654	8236246	3088592	42938	21871471
10	11607927	5803963	9286341	3482378	48412	24660014
11	12420482	6210240	9936384,9	3726144	51801	26386215
12	13289916	6644957	10631932	3986975	55427	28233250
13	14220210	7110104	11376167	4266063	59307	30209578
14	15215624	7607812	12172499	4564687	63458	32324248
15	16280718	8140358	13024574	4884215	67900	34586945
16	17908790	8954394	14327031	5372637	74690	38045640
17	19699669	9849834	15759734	5909901	82159	41850204
18	21669636	10834817	17335708	6500891	90375	46035224
19	23836599	11918299	19069278	7150980	99413	50638747
20	26220259	13110129	20976206	7866078	109354	55702621
21	28842285	14421141	23073827	8652685	120290	61272883

Com base nestes resultados pode-se realizar uma estimativa da potência das unidades geradoras a serem instaladas para a produzir energia elétrica. O caso particular dos 21 anos de estudo do projeto considera uma energia final de 61,27 GWh/ano. Para gerar esta energia ao longo deste ano é necessário ter uma potência instalada de 19,16 MW. Para efeitos desta dissertação será considerada uma potência instalada de 20 MW.

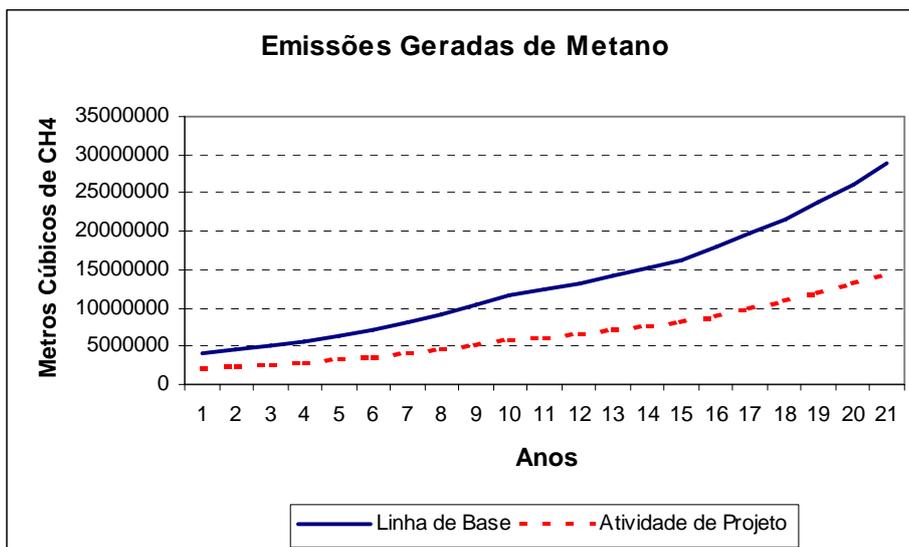


FIGURA 8. Metano produzido na linha de base e no projeto para 21 anos e variação da população (500 mil habitantes).

3.6. Comentários Finais

Neste capítulo apresentou-se o desenvolvimento da teoria básica para geração de créditos de carbono originada pelas emissões evitadas, a coleta e eliminação por meio de chama da combustão do biogás, convertendo assim seu teor de CH₄ em CO₂, reduzindo seu efeito de gás de efeito estufa (GEE); e a geração e abastecimento de eletricidade para uma possível distribuição regional, a partir do biogás gerado nos aterros sanitários.

Foram apresentados os aspectos preliminares para a modelagem de geração de créditos de carbono, dentre os quais diferenciam-se a linha de base e os cenários de referencia que visam a redução das emissões. Dentre as considerações principais para os projetos de redução de gases de efeito estufa (GEE) existem a voluntariedade, a adicionalidade, a sustentabilidade ambiental, as fugas e os direitos a os créditos de carbono.

Foi exposto o modelo de cálculo para a estimativa de geração de biogás de aterros sanitários, e posteriormente, explicou-se a implementação computacional do mesmo com resultados obtidos para uma simulação de cálculo de redução de emissões e energia gerada para um período de 21 anos.

Foram realizadas estimativas do potencial de geração de créditos de carbono e de energia elétrica já para quatro casos: População com 200 mil, 500 mil e 1 milhão de habitantes; e população base de 500 mil habitantes com taxa de crescimento variável no tempo.

Neste sentido, considerou-se para a elaboração desta dissertação o cenário de linha de base como aquele no qual não é realizada nenhuma redução de emissões mediante a queima do CH₄ e considera a liberação total do biogás à atmosfera.

4. TERMELÉTRICAS A BIOGÁS.

4.1. Introdução.

Nos capítulos anteriores foram analisados os aspectos básicos para a geração de créditos de carbono. Como foi mencionado, o objetivo, além da geração destes créditos é também a geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do biogás de aterros sanitários, e portanto, este capítulo trata dos aspectos técnicos da produção de energia que complementam este estudo. É também feita uma descrição técnica da configuração da planta de geração, com as características operacionais dos equipamentos a biogás, assim como aspectos de operação e manutenção.

4.2. Aspectos Técnicos.

O gerenciamento dos aterros sanitários viabiliza diferentes formas de controle de biogás gerado pela decomposição do material orgânico. Como tal, o aproveitamento energético deste é uma das formas existentes de controle de emissões, que podem ser maiores ou menores de acordo com as diferentes tecnologias disponíveis para seu aproveitamento energético.

ÇENGEL (1994), propõe as tecnologias (entendidas como o conjunto de processos operacionais) aplicáveis à extração de energia. Dentro destas, as principais disponíveis para o aproveitamento energético do biogás são:

- Operação de motor de combustão interna;
- Operação de turbina a gás;
- Aquecimento de caldeira na geração de vapor para utilização direta ou geração de energia elétrica;
- Purificação para separação e injeção em rede de distribuição de gás metano para uso domiciliar, industrial, ou veicular, e;
- Micro-turbinas.
- Células a combustível.

Na TABELA 12, expõem-se as vantagens e desvantagens das diferentes tecnologias.

TABELA 12. Tecnologias para geração de energia a partir do biogás. (Fonte: MMA, 2005).

Tecnologia	Vantagens	Desvantagem
Motor de Combustão Interna.	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologia de uso comum; • Rápida instalação; • Modularidade do sistema; • Diversidade de fornecedores de equipamentos; • Eficiência em carga total e parcial. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dimensionamento do compressor de biogás.
Turbina a gás	<ul style="list-style-type: none"> • Sem formação de condensados; • Confiabilidade mecânica; • Combustão completa. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto investimento inicial; • Sensibilidade a partículas e impurezas; • Baixa eficiência dada à energia parasitária de compressor e perda de calor nos gases de exaustão.
Caldeiras	<ul style="list-style-type: none"> • Pequeno tamanho da instalação; • Baixo custo de manutenção. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto investimento inicial; • Biogás a alta pressão; • Geração de condensados; • Baixa eficiência a carga parcial.
Micro-turbinas	<ul style="list-style-type: none"> • Modularidade; • Alta confiabilidade mecânica; • Facilidade de interconexão com redes de distribuição. 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa potência disponibilizada; • Baixo rendimento; • Necessidade de tratamento do biogás; • Alta pressão mínima de entrada do biogás.
Células a combustível	<ul style="list-style-type: none"> • Excelente desempenho ambiental. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibiliza baixa potência; • Tratamento do biogás; • Alto investimento.

Com base nas vantagens e desvantagens anteriormente descritas e na quantidade de energia a gerar, escolheu-se para esta dissertação a tecnologia de geração de energia elétrica baseada em turbinas. A razão pela qual foi tomada esta decisão foi o fato da abundância de provedores destes equipamentos no mercado, além do que a tecnologia associada às turbinas oferece facilidades de instalação e manutenção, sucção e tratamento do biogás, controle através duma interface

computacional de todos os parâmetros termodinâmicos e elétricos, e conexão e sincronização automática com a rede de energia elétrica.

Para o caso da potência considerada de 30 MW, calculada com a quantidade de biogás gerado no aterro sanitário, existem no mercado inúmeras marcas.

4.3. Descrição Técnica e configurações de Plantas

Segundo ÇENGEL (1994), a escolha da tecnologia de aproveitamento do gás na geração de energia depende da quantidade de gás disponível. Existem outros fatores tais como o sistema de coleta do gás, a qualidade, preço da eletricidade, disponibilidade de consumidores e questões de ordem ambiental, que podem também ser relevantes.

Também ÇENGEL (1994) esclarece que independentemente da tecnologia adotada em operações de aproveitamento do gás na geração de energia, as plantas de geração podem apresentar variadas configurações. As condições técnicas, econômicas e ambientais específicas de cada aproveitamento determinam a estrutura física da planta geradora, ou seja, o conjunto de equipamentos e instrumentos de controles que realiza a transformação do gás em energia.

Embora sejam vários os autores que têm estudado as diversas configurações para as plantas de geração de energia elétrica a partir do biogás, a metodologia proposta por BALESTIERE (2002) aponta de maneira clara as diferentes seções, considerando a diversidade de equipamentos, instrumentos de controle e condições operacionais específicas. A configuração completa de plantas pode ser descrita como seções de aspiração, compressão, tratamento, mistura de combustível, combustão, geração de energia elétrica, subestação de interconexão e os equipamentos auxiliares com funções diversas, tais como controle e ajuste da mistura combustível ar-gás e equipamentos de sincronização à rede elétrica, todas elas descritas a seguir.

A seção de aspiração é responsável pela captação do gás em volumes previstos e determinados, enquanto a seção de compressão é requerida para o desempenho da micro-turbina. A seção de mistura de combustível é utilizada em plantas onde a seção de tratamento de gás não é especificada ou, ainda, no aumento do poder calórico do biogás disponível. A seção de combustão é constituída pelo

queimador, é utilizada na queima de biogás em casos de produção excessiva ou desvio da produção durante paradas dos equipamentos.

A seção de geração de energia elétrica é composta pela micro-turbina acoplada a um gerador de energia elétrica. Também a subestação de interconexão tem por finalidade interligar o ponto de geração à rede de distribuição ou ao consumidor final. Os fatores técnicos determinantes das características da subestação são: a distância do ponto de conexão, a tensão da rede de distribuição, potência da unidade geradora e tensão da unidade geradora. As subestações de interconexão contêm os equipamentos de medição e controle para venda de energia e as proteções de linha e transformadores.

4.4. Características operacionais dos equipamentos ao biogás

O tratamento do biogás em projetos de geração de energia elétrica é relevante devido a alterar o seu valor econômico, afetar as condições operacionais dos sistemas de conversão e viabilizar aspectos ambientais da atividade de geração (MMA, 2005). Este tratamento é uma lavagem que separa metano, dióxido de carbono e remove compostos orgânicos e poluentes. Desta maneira possibilita o aumento do valor econômico da operação, pois há uma tendência a diminuir as horas de manutenção devido à combustão de metano livre de poluentes.

As plantas de termelétricas a biogás devem considerar como condição mínima o tratamento do produto quanto à extração de umidade ou condensados presentes em determinados pontos do processo. O aspecto ambiental da operação é melhorado com o tratamento do biogás, uma vez que se evita a emissão secundária de compostos sulfúricos e orgânicos voláteis após sua combustão. Caso não exista o tratamento do biogás anteriormente à combustão, os equipamentos de geração de energia devem destruir no mínimo 98% de compostos orgânicos diferentes ao metano e totalmente outros poluentes, devendo emitir óxidos de nitrogênio e controlarem a emissão de monóxido de carbono.

4.5. Operação e manutenção

Segundo BALESTIERE (2002), os projetos de geração de energia a partir do biogás devem ser planejados para uma operação contínua dada a disponibilidade do produto. A viabilidade econômico-financeira do projeto é afetada pela quantidade de energia gerada e neste caso também viabilizado pela quantidade de Reduções Certificadas de Emissões provenientes do projeto.

Estes empreendimentos devem se estruturar comercial, administrativa e tecnicamente, levando em consideração a operação constante como condição crítica. As relações de comercialização de energia devem ser contratadas de tal forma que se prevejam os custos com a garantia do fornecimento de energia elétrica, devido a paradas de qualquer natureza.

A gestão administrativa da operação precisa considerar a coordenação de turnos contínuos de trabalho, avaliando os diversos custos com pessoal envolvido do sistema, assim como providenciar suporte logístico para solução das diversas situações operacionais. A manutenção preventiva de equipamentos tem de ser organizada em função da possibilidade de desgaste anormal de equipamentos devido à presença de poluentes e condensados em plantas que não adotam a pré-filtragem.

4.6. Viabilidade econômico-financeira

O Ministério de Meio Ambiente Brasileiro (MMA, 2005) considera a avaliação do retorno de investimento na geração de energia elétrica a partir comparação do custo da energia produzida indicado pelo coeficiente $\text{Rs\$/MWh}$ com o preço da energia vendida também fornecida por tal coeficiente.

Além dos itens tipicamente operacionais e comuns à avaliação de retorno de investimento, no caso do biogás deve-se considerar, na precificação do custo da energia produzida, os créditos de emissão de gases efeito estufa e incentivos específicos à atividade.

Quanto ao preço da energia vendida, este deve incorporar possíveis efeitos do processo de reestruturação do setor elétrico brasileiro com o encerramento dos contratos iniciais e a determinação de valor normativo compensatório específico ao biogás. São considerados dois métodos para o cálculo da taxa de retorno esperada do investimento, apresentados a seguir:

- Define-se a potência média a ser disponibilizada ao usuário da energia;
- Multiplica-se a potência média por número de horas do sistema em operação, ao ano, obtendo-se a energia anual disponível;
- Avaliam-se custos operacionais anuais da geração de energia, incluindo-se a remuneração do ativo imobilizado no período;
- Dividem-se os custos acima pela energia anual disponível, definindo-se o custo do MWh;
- Compara-se o custo do MWh ao valor de venda do MWh..

Outro método de cálculo, não-contábil, é desenvolvido a partir da disponibilidade de gás metano e do desempenho térmico do equipamento utilizado:

- Projeta-se o volume de biogás disponível ao ano, transformando-o em volume horário;
- Define-se o valor calórico do metano contido no biogás, por unidade de volume;
- Multiplica-se o volume horário de biogás pelo valor calórico do metano nele contido;
- Divide-se o valor anterior pelo trabalho equivalente à unidade de potência elétrica do equipamento de geração;
- Multiplica-se o valor anterior pelo preço da energia, obtendo-se receitas futuras.

As instalações de captação do biogás poderão gerar custos, caso façam parte do compromisso financeiro do investidor, assim como este poderá ter no fornecimento de gás uma fonte de custos. Logo, os arranjos societários e administrativos são muito relevantes.

4.7. Comentários Finais.

Neste capítulo apresentaram-se os aspectos técnicos que inclui a descrição das tecnologias para geração de energia elétrica proveniente do biogás. Entre estas tecnologias estão os motores de combustão interna, as caldeiras, turbinas, células de combustível, micro-turbinas. Estas últimas representam uma tecnologia interessante sobretudo pelos custos e as diversas vantagens como facilidade de instalação.

Também foi descrita a configuração técnica das plantas de captação do biogás, sendo esta constituída por o conjunto de seções de aspiração, compressão, tratamento, mistura de combustível, combustão, geração de energia elétrica, subestação de interconexão e os equipamentos auxiliares.

As características operacionais dos equipamentos das diferentes seções foram abordadas. Também se comentou sobre aspectos relacionados com a operação e manutenção, e por último, se abordaram os métodos para estimar a viabilidade econômica do sistema de geração.

5. ANÁLISE SÓCIO-ECONÔMICA

5.1. Introdução

A seguir apresenta-se uma análise dos aspectos econômicos que podem viabilizar ou não o projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Consideram-se aqueles que podem repercutir dentro da denominada atividade de projeto tanto na geração de energia renovável quanto à geração de unidades de redução de emissões. A análise fundamenta-se nas considerações propostas no estudo do Ministério de Meio Ambiente Brasileiro (MMA, 2005), e complementado a partir das teorias expostas por GOLDEMBERG (1998) e BÖHRINGER (2003).

A análise de custo e benefício (C-B) é uma maneira útil de fazer a comparação entre os efeitos favoráveis e desfavoráveis do aproveitamento do biogás para gerar energia e reduções de emissões de gases à atmosfera, considerando que com políticas que envolvem meio-ambiente e energia exista um alto grau de incerteza.

Os seguintes critérios gerais devem ser seguidos para a utilização dessa metodologia (MMA, 2005):

- A análise econômica pode ser útil para elaborar estratégias que busquem atingir um determinado objetivo a um menor custo;
- É importante identificar os benefícios e custos incrementais associados aos projetos;
- Os custos e benefícios devem ser dimensionados e quantificados sempre que possível;
- Nem todos os impactos de uma decisão podem ser quantificados em dinheiro;
- Existe um conjunto de variáveis que devem ser usadas para o cálculo dos custos e benefícios, incluindo principalmente a taxa social de desconto e os valores associados com a redução do efeito estufa.

5.2. Fatores da Análise de Custos e Benefícios

5.2.1. Investimento

O cálculo de um empreendimento de aproveitamento de biogás leva em consideração a quantidade final de metano (depois de pelo menos dez anos). Por esse motivo, devem ser levantadas

todas as informações para possíveis ampliações do aterro, pois uma extensão da área e vida útil do mesmo pode elevar significativamente o potencial de geração de energia, e portanto ter maior atratividade financeira.

Os projetos de geração de energia a partir de biogás devem ser planejados para operação contínua, dada a disponibilidade do produto, de tal modo que a viabilidade econômico-financeira do projeto seja afetada pela quantidade de energia gerada.

5.2.2. Direito aos Créditos

Os créditos pertencem ao investidor do projeto de geração de energia e/ou queima do biogás. Este compensa em forma de *royalties* as prefeituras ou entes governamentais envolvidos (WB, 1999).

5.2.3. Preço do Carbono

Na TABELA 13, indica-se a taxa interna de retorno financeiro incremental do projeto em porcentagem (%) para diferentes tipos de empreendimentos energéticos sob o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, com preço CER de US\$ 3/tCO₂^{equiv}. Note-se que a maior taxa de retorno é dos projetos de resíduos sólidos.

TABELA 13. Taxa interna de retorno financeiro incremental do projeto (Δ IRR) em %, tipos de projeto selecionados, Preço CER US\$ 3/tCO₂^{equiv}. (Fonte: WB, 2005)

TECNOLOGIA	Δ IRR
Eficiência energética.	2,0-3,0
Vento.	0,9-1,3
Hidrelétrica.	1,2-2,6
Bagaço.	0,5-3,5
Biomassa com energia de metano.	<5,0
Resíduo sólido municipal com energia de metano.	5,0>

Na TABELA 14 encontram-se os preços que vêm sendo considerados nas transações em andamento.

TABELA 14. Níveis de preço para Certificados de Reduções de Emissões (CER). (Fonte: WB, 2005).

Fonte	US\$/tCO ₂ ^{equiv}
PCF (<i>Prototip Carbon Fund</i>)	3-4
CERUPT (<i>Certified Emission Reduction Unit Procurement Tender</i>)	2,7-4,5
Linha de Crédito Holandesa -IFC CDM	~ 4
Linha de Crédito Holandesa - IBRD CDM	~ 4
<i>Natsource</i>	1,15-3,50

5.2.4. Benefícios Sociais

O impacto social previsto em projetos de geração de energia a partir do biogás repercute diretamente sobre o bem-estar das populações envolvidas. O chorume contaminado pode afetar o solo e a qualidade da água superficial, tendo impactos sobre o meio ambiente e a população.

Esses projetos têm também um impacto sobre a geração de empregos na área local, pois é preciso dispor de funcionários para administrar o empreendimento.

5.2.5. Benefícios Ambientais

Para CHEREMISINOFF (2002), mediante a coleta e combustão do gás de aterro sanitário, o projeto reduz os efeitos ambientais tanto globais quanto locais. Embora a maior parte das emissões de gás de aterro sanitário seja rapidamente diluída na atmosfera, em espaços confinados existe o risco de asfíxia caso este esteja presente em altas concentrações, o que também pode causar outros efeitos ambientais locais e globais como mau cheiro e criação de ozônio no nível do solo.

Com um manejo adequado, o biogás pode ser capturado e queimado. A combustão de gás de aterro sanitário pode também resultar na liberação de compostos orgânicos e traços de materiais tóxicos. O lençol freático e a água da superfície podem ser contaminados por chorume não-tratado. O escoamento da água da superfície de um aterro sanitário causa sedimentos nas águas receptoras, ao passo que sua vazão contínua e descontrolada leva a uma excessiva geração de águas contaminadas para fora do aterro. Outros possíveis riscos e impactos minimizados, incluem as possibilidades de incêndio ou explosão, presença de animais, poeira, mau cheiro, pragas, ruído e tráfego.

5.2.6. Benefícios de Oportunidade

A geração distribuída promove a diminuição de perdas na transmissão, uma vez que a geração está próxima ao centro de carga. A energia gerada pode ser utilizada em indústrias, serviços públicos ou zonas comerciais.

5.2.7. Benefícios Econômicos

Segundo GOLDENBERG (1998), há vários benefícios econômicos potenciais associados a geração de energia a partir dos projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, tais como à atração de investimento estrangeiro adicional para o País, oportunidades de emprego na área local em que o projeto se realiza, aumento da diversidade e da segurança no abastecimento de eletricidade, e contribuição para a redução das importações de combustíveis.

5.2.8. O Setor Privado

A coleta e utilização do biogás podem proporcionar retornos financeiros suficientes para justificar o capital investido. Além disso, o setor privado pode ter um papel importante como investidor na produção de energia. Embora o Estado deva ser o principal animador dos projetos de coleta seletiva e gestão integrada de resíduos sólidos, deve-se estimular a participação de outros atores sociais, como as organizações da sociedade civil e o setor privado.

É necessária a implantação de programas e projetos de educação ambiental, tanto pelo Estado como pela iniciativa privada, visando a sensibilização da população sobre a importância do destino adequado dos resíduos que esta produz.

5.2.9. Coleta Seletiva

Uma das variáveis identificada como decisiva para a implantação de projetos de geração de energia renovável é a coleta seletiva, pois os melhores locais para se implantar esses projetos são aqueles onde existem estes programas para destinação alternativa de resíduos sólidos (MOURA, 2001).

5.3. Elementos de Custos de Investimentos

A maioria das fontes renováveis de geração de energia tem custos muito elevados e acabam demandando incentivos para a viabilização econômica. É necessário fazer uma descrição dos equipamentos do sistema, para posteriormente aclarar seus custos.

5.3.1. Tipo de equipamento

O sistema para geração de energia de biogás de aterros pode ser dividido em três setores específicos (MMA, 2005):

- **Captação de biogás:** Camada de cobertura para isolar o lixo do ar, drenos verticais e horizontais de chorume e biogás, e a rede de coleta formada basicamente por tubos de polietileno de alta densidade. A rede de coleta é uma ramificação de tubos que conduz o biogás de cada dreno até a tubulação principal e o transporta até a estação de sucção, tratamento e queima. Dependendo do tipo de aterro, a rede necessitará de purgadores de condensado que se acumula nas linhas do biogás saturado de água.
- **Sucção, tratamento e queima:** A sucção do biogás é provocada pela pressão negativa de sopradores movidos com motores elétricos. Para garantir uma boa qualidade de queima, o queimador deve ser enclausurado com entrada de ar e temperatura controlada. Para a geração de energia recomenda-se um lavagem do biogás.
- **Geração de energia:** Compõe-se do sistema de geração elétrica, a transformação de tensão e a distribuição até a conexão na rede da concessionária local com disjuntores. A geração representa entre 65% e 75% do investimento total. Os equipamentos normalmente geram energia a uma tensão baixa (440 V), que necessita ser elevada para a tensão de distribuição usual (13,8 kV).

O equipamento de monitoramento da vazão e conseqüente queima de biogás (com controle da temperatura), bem como o cálculo e contabilização de créditos de carbono é o mesmo utilizado pela estação de sucção de biogás e controle da micro-turbina. Na FIGURA 9, esquematiza-se a composição do aterro para maior entendimento do processo.

5.3.2. Elementos de custos de captação de biogás

- **Cobertura do aterro:** Como o sistema de sucção de biogás trabalha com uma pressão negativa, existe a possibilidade de entrada de ar pela superfície do aterro, o que não é desejável para um sistema por questões qualitativas do biogás e de segurança. Recomenda-se, portanto, uma cobertura no mínimo de 1m de espessura para isolar a entrada de ar e permitir que a digestão anaeróbia ocorra com maior eficiência sem a presença de oxigênio na superfície do maciço de lixo.
- **Drenagem vertical e horizontal de biogás:** O maciço de lixo possui, na maioria das vezes, espessuras de 10m a 50 m de lixo, que necessitam de drenos até à superfície do aterro. Esses drenos possuem entre 30cm e 80 cm de diâmetro e profundidades de acordo com a espessura de lixo do aterro. Utiliza-se um tubo perfurado dentro do dreno para auxiliar a drenagem do biogás. A quantidade de drenos que devem ser instalados depende das condições do aterro, mas se pode considerar uma distribuição de um a cada 2.500 m² (aprox. 50m de raio de influência).
- **Drenagem de chorume:** A eficiência de captação de biogás depende do sistema de drenagem de chorume, pois este pode entupir os drenos. Logo, o chorume deve ser drenado para um sistema de tratamento.
- **Sucção, tratamento e queima:** Todos os equipamentos localizam-se na estação de sucção e queima de biogás, que possui condensadores, sopradores (inclusive os de reserva), instrumentos de medição, sistemas de análise e controle (em forma de painéis) e queimadores. Esse sistema deve ser dimensionado para a totalidade da vazão e capacidade do aterro. Ao lado dessa estação deverá ser instalado o sistema de tratamento de biogás, que eliminará as impurezas do produto que deverá ser encaminhado para a micro-turbina.

Os custos de implementação de aterro, segundo o Banco Mundial (WB, 1999) estão entre US\$ 30 mil e US\$ 65 mil por hectare útil.

5.3.3. Custos de geração de energia

O sistema de geração de energia é o conjunto dos equipamentos necessários para gerar energia elétrica. São eles: trem de regulação de biogás, micro-turbina, painéis de proteção e controle (sincronização com a rede), ventilação e exaustão de ar, sistema de refrigeração da água do sistema de geração, sistema de abastecimento e filtragem de óleo, galpões para acondicionamento do grupo gerador, transformadores e disjuntores para a conexão com a rede e eventual linha de transmissão até a rede da distribuidora local. Os custos de geração de energia elétrica estão referenciados a US\$1500 por kW instalado (WB, 1999).

5.3.4. Custos de Certificação de Créditos de Carbono

Os projetos que geram créditos de carbono devem passar por uma definição de linha de base, um procedimento de análise da credibilidade do empreendimento, sua validação e certificação junto dos órgãos nacionais e internacionais. Os procedimentos iniciais têm custos que o Banco Mundial estima em US\$ 200 mil (WB, 2005).

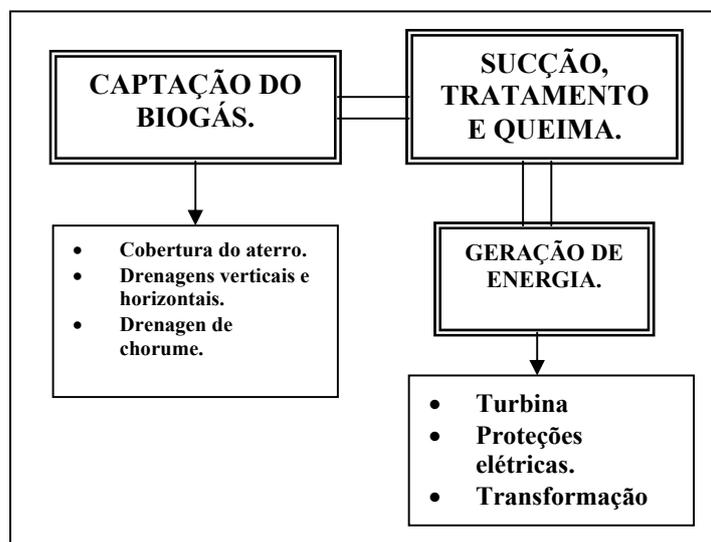


FIGURA 9. Esquema da composição dos custos do aterro.

5.3.5. Custos de benefícios sociais

Um dos custos mais altos é a reorganização dos catadores de recicláveis que trabalham nos lixões. Estes deverão ser retirados desses locais e instalados em galpões onde o lixo poderá ser separado antes de depositado e aterrado. Os custos do empreendimento devem incluir cada um desses processos: instalações de reciclagem, operação de depósito do lixo nos galpões e posterior aterramento, bem como a organização dos catadores em forma de cooperativas.

5.3.6. Custos de operação

O custo de operação do sistema inclui os setores de captação, sucção, tratamento, queima de biogás e geração de energia. Também se incluem a mão-de-obra (impostos de contratação e custos trabalhistas), o gerenciamento administrativo, despesas de escritório e recursos humanos e contábeis.

5.3.7. Custos de manutenção

A manutenção engloba os serviços na rede de captação, na estação de sucção e queima, no sistema de tratamento de biogás e na geração de energia (micro-turbina).

A micro-turbina tem basicamente dois tipos de manutenção: a de equipamentos periféricos/auxiliares, que devem ser mais freqüentes (filtros, acessórios elétricos, etc) e a interna, de alto custo, porém, realizada em períodos longos (cerca de 20 mil horas).

5.3.8. Custos de energia de *back-up*

A Turbina não gera energia em cerca de 10% do tempo, que deverá ser complementada com energia do mercado. Essa energia medida tem um custo para o empreendimento dificilmente estimado, pois o preço da energia depende do período do ano e da política de preços do setor.

5.3.9. Royalties

Tanto a energia dos aterros como os créditos de carbono da queima do metano estão sendo considerados como receitas adicionais pelas prefeituras. Assim, o critério adotado pelas administrações é de receber uma parte dos lucros do aproveitamento por meio de royalties.

5.3.10. Custos de impostos, taxas e transporte/distribuição

Existem três casos a serem avaliados, com diferentes incidências de impostos: auto-produtor, produtor independente ou produtor independente autônomo para o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica).

Para o auto-produtor, caso em que a energia seja consumida por ele mesmo, o custo de ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços) não é considerado, por se tratar da mesma empresa. Já o produtor independente tem o custo desse imposto, porque a transação é considerada uma comercialização normal.

Os outros custos têm incidência normal, como Contribuição Social, taxa da ANEEL, taxa de transporte e distribuição de energia e energia não gerada pelas paradas programadas e não programadas.

5.3.11. Custos de auditoria dos créditos de carbono

Normalmente a verificação e auditoria do empreendimento para confirmação dos créditos de carbono gerados são realizadas por empresas de renome internacional. O Banco Mundial também estima estes custos em cerca de US\$ 50 mil por ano (WB, 2005).

5.3.12. Tarifas

Segundo os dados da ANEEL (2005), a tarifa média nacional vem tendo um reajuste acima da inflação nos últimos anos para adequar o preço da energia nacional à nova energia baseada em

termelétricas, que é mais cara que a originária de hidroelétricas. Pode-se considerar assim uma tarifa estimada de 166,66 R\$/MWh.

As receitas provenientes da venda de créditos de carbono são também estimadas pelo Banco Mundial e podem ser definidas em dois períodos: antes de 2008 (quando entra em vigor a primeira etapa do Protocolo de Kyoto) com preços variando de 1 a 3 US\$/tCO₂^{equiv} e depois de 2008 (ver TABELA 2), quando o protocolo entra em vigor, com penalidades para os países que não atenderem as reduções de emissões pré-estabelecidas.

Essas exigências valorizam o crédito de carbono que pode chegar até 6 US\$/tCO₂^{equiv}. O período de 2012 em diante (quando acaba a primeira etapa do Protocolo de Kyoto) é uma incógnita, pois nesse período o Brasil pode ser obrigado a atender a reduções de emissões dentro de condições totalmente desconhecidas ainda. Por isso, pressupõe-se que o preço do crédito será considerado o mesmo do período anterior.

5.3.13. Custos evitados na geração, transmissão e distribuição

Por se tratar de energia descentralizada, gerada próximo do centro de carga, existe uma economia em custo de transmissão e até distribuição, que deve ser computado na viabilidade econômica. Estima-se que as perdas com transmissão e distribuição de energia gerada no Brasil podem chegar até 15%.

5.4. Comentários Finais

Com um manejo adequado, o gás de aterro sanitário pode ser capturado e queimado, removendo os riscos de efeitos tóxicos sobre a comunidade e o ambiente. Assim, a combustão de gás de aterro sanitário pode também resultar na liberação de compostos orgânicos e traços de materiais tóxicos, incluindo mercúrio e dioxinas, embora tais liberações ocorram em níveis significativamente mais baixos do que se o gás de aterro sanitário fosse eliminado por meio de combustão.

Nos casos em que o metano é usado para geração de eletricidade, as práticas operacionais no aterro sanitário são aperfeiçoadas, contribuindo, assim, para o desenvolvimento sustentável. Esses projetos terão também um impacto positivo, sobre a geração de empregos na área local, pois será

preciso dispor de funcionários para administrar as unidades de gás de aterro sanitário. Outra vantagem do manejo adequado, o que melhora as condições de trabalho para os funcionários.

Há vários benefícios econômicos associados a projetos de geração de energia a partir de gás de aterro, tais como: atração de investimento estrangeiro adicional para o país, com um efeito positivo no balanço de pagamentos; provável efeito multiplicador desse investimento trazendo benefícios adicionais, como mais oportunidades de emprego na área em que o projeto está localizado; aumento da diversidade e da segurança no abastecimento de eletricidade; e contribuição para a redução das importações de combustíveis.

A maioria das fontes de geração de energia renovável tem custos acima da energia comercial, pois parte da matriz hidroelétrica já amortizada tem custos menores e, por isso, as fontes alternativas acabam demandando incentivos para a viabilização econômica. Investir nelas gera benefícios ambientais, sociais e até na área de saúde, onde reforçam a necessidade de políticas para essas fontes.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1. Conclusões sobre os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo

Em relação ao do primeiro objetivo específico desta dissertação, “*Realizar uma revisão da literatura sobre os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo e sua inter-relação com o marco regulatório de geração de energia elétrica*”, pode se dizer que o Protocolo de Kyoto é estudado nesta dissertação com o fim de contextualizar o problema da emissão de gases de efeito estufa, mas também para introduzir os mecanismos flexíveis, dentre os quais está o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

Dentro das grandes dificuldades do Protocolo de Kyoto destaca-se a participação equitativa das denominadas partes na obtenção dos benefícios advindos dos diferentes mecanismos. Não seria, portanto justo, que países em vias de desenvolvimento, afetados pelas conseqüências das mudanças climáticas produzidos pela emissão de GEE dos países industrializados, não se beneficiem de maneira econômica das propostas do Protocolo.

O princípio de equidade nos mecanismos flexíveis, ganha importância (sobretudo no MDL, pois inclui a participação de países em desenvolvimento) para garantir que os benefícios econômicos, sociais e ambientais sejam distribuídos entre os países Não-Anexo 1. Sobre este caso particular sugere-se a leituras dos trabalhos acadêmicos de SANTOS (2002) e MUYLAERT (2000)

Entre os aportes mais valiosos do Protocolo está a permissão de negociar metas de redução de Gases de Efeito Estufa dos respectivos países. Estas negociações são realizadas por meio de transações através de um esquema de mercado. Estas transações são contratos de compra-venda, através dos quais uma parte paga à outra por uma determinada quantidade de “créditos” de emissões de GEE, que o comprador pode utilizar para cumprir suas obrigações de mitigação.

Existem duas categorias de transações: transações baseadas em direitos de emissão, nas quais o comprador adquire os direitos de emissão criados pelos organismos reguladores dentro do marco de

mercado de carbono de acordo com oferta e demanda; e transações baseadas nos projetos, nas quais o comprador adquire os créditos de emissão de tais projetos, de tal modo, que as emissões de GEE são menores das geradas na sua ausência. Estas últimas permitem a criação de ativos ambientais que podem ser utilizados para cumprir obrigações de mitigação ou para ser vendidas em esquemas de mercado.

Além dos requisitos para a elaboração dos documentos preliminares como a descrição geral da atividade do projeto com informações sobre barreiras, tecnologias utilizadas, análise financeira, a metodologia de monitoramento para a redução de emissões, cálculo das emissões e a descrição das fórmulas usadas para estimar as emissões do projeto e a análise dos impactos ambientais (biodiversidade, recursos naturais), está a argumentação da adicionalidade e o projeto de linha de base, conceitos que dentro desta dissertação mereceram especial ênfase.

No contexto do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), os Certificados de Emissões Reduzidas (Créditos de Carbono) baseiam-se na diferença em emissões de GEE entre práticas projetadas ou usuais (cenário de referência ou linha de base) e práticas que ocorrerem devido às atividades do projeto (cenário do projeto).

Dentre as barreiras ao MDL estão os altos custos de transação dos projetos que representam alternativas promissoras para servir à demanda de energia em áreas onde há baixa densidade de consumidores e a demanda está dispersa. Outra barreira é a falta de informação sobre as características e os benefícios das opções dos sistemas de energia renovável visando uma redução de emissões de GEE, além dos custos. Isto inibe investidores e consumidores a aceitarem tais tecnologias

Os critérios para o desenvolvimento de projetos de MDL, considerando as barreiras acima citadas e os efeitos do mercado nas respectivas transações de créditos de carbono com a produção de energias limpas, levam a definir uma inter-relação entre mercado de energia elétrica e mercado de créditos de carbono. Os projetos desenvolvidos sob os requisitos do Protocolo de Kyoto, geram energia que pode ser negociada com dois parâmetros: o primeiro de eles é a venda dessa energia no mercado *spot* de energia elétrica, de acordo com a relação entre oferta e demanda; e também, pode ser negociada através de um contrato de abastecimento energético.

No entanto, se deve considerar que os projetos de geração energética a serem desenvolvidos dentro do esquema de mercado, não geram por si mesmos muita atratividade financeira, pois estão enquadrados em ambientes concorrentes e competitivos. Por isso é necessário trabalhar na implementação de mecanismo de mercado e de políticas governamentais que promovam as iniciativas do setor privado a favor de projetos de integração elétrica, como os de geração distribuída.

Por esta razão, os investimentos em matéria de desenvolvimento energético ficam relegados a outros níveis. Porém, com os projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, além dos benefícios advindos da venda da energia gerada, estes possuem os benefícios adquiridos da venda dos Certificados de Emissões Reduzidas.

Dentro dos objetivos específicos desta dissertação, estão além da revisão bibliográfica do MDL citada acima, ***“Analisar a aplicabilidade e viabilidade da realização de um projeto de desenvolvimento limpo no Brasil, mediante uma proposta científica considerando o Protocolo de Kyoto”, e “Realizar o cálculo de redução de emissões de gases de efeitos estufa e geração de energia a partir de metano proveniente do biogás”.***

Para atingir estes objetivos foi necessário realizar a contextualização do problema, partindo da elaboração de um cenário hipotético sob o qual pôde-se realizar a quantificação de emissões reduzidas.

Nesta dissertação trabalhou-se com o caso de geração de energia limpa proveniente do gás oriundo da decomposição orgânica de resíduos, para o qual partiu-se do modelo proposto nas metodologias do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

Foi exposto o modelo de cálculo para a estimativa de geração de biogás, e posteriormente, explicou-se a implementação computacional do mesmo com resultados obtidos para uma simulação de cálculo de redução de emissões e energia gerada no caso do projeto durar 21 anos para o posterior dimensionamento da usina térmica. Neste sentido, considerou-se para a elaboração desta dissertação o cenário de linha de base como aquele no qual não é realizada nenhuma redução de emissões mediante a queima do CH₄ e considera a liberação total do biogás à atmosfera.

As emissões antropogênicas de gases de efeito estufa aconteceriam quando o metano produzido a partir do lixo orgânico não é queimado. Só é possível, portanto, que a geração de energia

seja factível desde o ponto de vista financeiro a partir de um projeto de MDL, devido à venda dos créditos de carbono, os quais viabilizam este tipo de projetos. O cenário de projeto baseou-se na coleta e utilização de gás de aterro sanitário para a geração de eletricidade. Este uso converterá o teor de metano em dióxido de carbono.

6.2. Conclusões sobre a geração de energia e dos créditos de carbono

O capítulo quarto desenvolve o objetivo de *“Efetuar uma análise dos aspectos técnicos da produção de energia elétrica a partir do gás”*. Foi feita uma descrição técnica das configurações técnicas das plantas de geração de energia elétrica, considerando o tamanho do grupo gerador e a tecnologia de micro-turbinas. Apresentaram-se as características operacionais dos equipamentos a biogás, assim como também aspectos de operação e manutenção.

Com base no quinto objetivo, *“Analisar os aspectos sócio-econômicos que podem viabilizar ou não o projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo”*, foram abordados os diferentes aspectos relacionados com as repercussões do projeto de geração de energia limpa a partir do biogás. Destaca-se que há vários benefícios econômicos potenciais associados a projetos de geração de energia a partir de gás de aterro, tais como: atração de investimento estrangeiro adicional para o país, com um efeito positivo no balanço de pagamentos; provável efeito multiplicador desse investimento trazendo benefícios adicionais, como mais oportunidades de emprego na área em que o projeto está localizado; aumento da diversidade e da segurança no abastecimento de eletricidade; e contribuição para a redução das importações de combustíveis.

A maioria das fontes de geração de energia renovável tem custos acima da energia comercial, pois parte da matriz hidrelétrica já amortizada tem custos menores e, por isto, as fontes alternativas acabam demandando incentivos para a viabilização econômica. Investir nelas gera benefícios ambientais e sociais, que reforçam a necessidade de políticas para essas fontes.

Na

TABELA 15 mostra-se um resumo dos custos e investimentos necessários para um empreendimento de geração de créditos de carbono a partir de biogás (considera uma cotação de 2,3 R\$/US\$):

TABELA 15. Custos e Investimentos

Item de custo/investimento	Valor (US\$)	Valor (R\$)	Unidade
Investimento no Aterro	65.000	149.500,00	\$/Hectare
Investimento Estudo Créditos de Carbono	200.000	460.000,00	\$
Investimento Geração de Energia Elétrica.	1.500	3.450,00	\$/kW
Auditoria aos Créditos de Carbono	50.000	115.000,00	\$/ano
Operação e Manutenção	-	10,00	%/Investimento
Tarifa de Energia Elétrica.	-	166	\$/MWh
<i>Back-up</i> Energia.	-	100	\$/MWh
Juros	-	20,25	%/ano
Contribuição Social.	-	30	%/lucro
Taxa ANEEL.	-	9,15	%/faturamento
Créditos de Carbono até 2008.	3	6,90	\$/tCO ₂ ^{equiv}
Créditos de Carbono 2009 até 2012.	12	27,60	\$/tCO ₂ ^{equiv}
Créditos de Carbono 2012 até 2017.	12	27,60	\$/tCO ₂ ^{equiv}

Existem vários tipos de ganhos associados aos projetos de desenvolvimento limpo como o trabalhado nesta dissertação. Os benefícios econômicos derivados deste tipo de empreendimentos estão em dois tipos de negócios. O primeiro deles consiste na venda da energia obtida da geração com a queima do biogás. Na TABELA 16 mostram-se os casos avaliados nesta dissertação: foram realizadas estimativas do potencial de geração de créditos de carbono e de energia elétrica já para quatro casos: População com 200 mil, 500 mil e 1 milhão de habitantes; e população base de 500 mil habitantes com taxa de crescimento variável no tempo

TABELA 16. Resultados da simulação obtidos para diferentes valores de população.

População (mil habitantes).	Emissões Reduzidas (Mton CO ₂ ^{equiv}).	Energia Gerada (GWh).	Energia Final no ano 21 (GWh/ano).	Potência Instalada (MW)
200	590	300.267	36,25	12
500 (Variação)	1.173	597.678	61,27	20
500	1.473	750.669	92,31	30
1000	2.947	1.501.338	184,62	60

Para o caso particular de projeto com uma população de 500 mil habitantes, e supondo uma taxa de crescimento constante, possui capacidade de gerar até 92 GWh por ano dada a potência instalada de 30 MW. Esta quantidade de energia gerada depende da quantidade de lixo depositada no aterro e da quantidade da população. Por exemplo, no primeiro ano são gerados 8,37 GWh e no décimo ano são gerados 24,66 GWh.

Dado um custo médio da energia de 166 R\$/MWh, pode-se calcular o custo total da energia gerada, que no décimo ano equivale a um total de 24,66 GWh, a qual poderia ser vendida por 4,1 milhões de Reais.

Com a competitividade do mercado de energia elétrica, a redução dos preços desta e os altos custos das transações (considere-se que a implantação dos 30 MW tem um custo aproximado de 45 milhões de dólares), é necessário considerar a venda adicional de ativos ambientais como os certificados de emissões reduzidas oriundos deste projeto. Pela adicionalidade demonstrada através da linha de base com a implantação de uma fonte de geração limpa, é possível fazer este tipo de negociação.

Os créditos de carbono gerados no projeto para os 21 anos de duração atingem no total 1.473 Mton de CO₂^{equiv}. Dado um preço médio de 5 US\$/tCO₂^{equiv}, pode-se obter um ganho adicional de 7,4 milhões de dólares (considerando uma cotação de 2,3 R\$/US\$, equivalem a 16,9 milhões de Reais)

TABELA 17. Custos e Investimentos considerados no *Pay-back*

Item de custo/investimento - Venda	Valor (R\$)
Investimento no Aterro (50 Hectare).	7.475.000,0
Investimento Estudo Créditos de Carbono	460.000,0
Investimento Geração de Energia Elétrica (30MW).	10.350.000,0
Auditoria aos Créditos de Carbono (21 anos)	2.415.000,0
Tarifa de Energia Elétrica.	124.611.054.000,0
Créditos de Carbono até 2008.	40.654.800,0
Taxas - Juros – Subsídios –O & M (40% da venda energia).	49.844.421.600,0

A venda da energia e a venda dos créditos de carbono são atividades que devem se complementar para que um projeto deste tipo seja viável e rentável. Considere-se também que destes benefícios econômicos se deve debitar o concernente aos custos descritos na

TABELA 15, tais como o estudo de campo, o investimento inicial, a operação e a manutenção e taxas e impostos ao governo.

Considerando um cenário hipotético de custo de energia e créditos de carbono não variável no tempo, pode-se fazer uma estimativa do retorno do investimento segundo a TABELA 17. O retorno do investimento de acordo com as suposições propostas na TABELA é de 2,5 anos, o que representa um cenário bastante otimista e atrativo desde o ponto de vista financeiro.

6.3. Sugestões para Trabalhos Futuros

Como possíveis estudos que poderão complementar a teoria sobre o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, tem-se o aprofundamento do conceito de adaptação ao câmbio climático, proposto no Protocolo de Kyoto. Dentro dos possíveis casos estão, por exemplo, o desenvolvimento de teorias à geração de créditos de carbono a partir de auditorias energéticas para o uso eficiente de energia em processos industriais.

Junto com uma revisão teórica e o desenvolvimento de um modelo de cálculo, seria de muito valor o estudo de um caso particular que vise uma modelagem de redução de emissões a partir de energia não consumida no setor industrial.

Existem diversas necessidades de implementação de programas de economia energética, sobretudo aqueles que ofereçam aos planejadores de sistemas energéticos, ferramentas para a análise do comportamento das variáveis do mercado de créditos de carbono e a possibilidade de implementação de projetos de redução de emissões. Uma modelagem multi-critério seria uma ferramenta muito útil para a toma de decisões neste sentido.

Outra contribuição interessante poderia envolver uma análise econômica completa acerca da viabilidade da implementação de programas regulatórios de incentivo ao mecanismo de desenvolvimento limpo no Brasil, estudo dos modelos mais viáveis, impactos tarifários decorrentes e probabilidades de obtenção de sucesso.

Sugere-se a realização de um levantamento de campo, possivelmente em tese de doutorado, dadas as restrições de tempo inerentes, envolvendo amostras probabilísticas de profissionais, para identificar barreiras aos mecanismos de desenvolvimento limpo quanto ao financiamento, implementação, entre outras dificuldades. Para esta proposta pode-se utilizar uma ferramenta de pesquisa técnica tipo *survey*.

É necessária uma inter-relação entre a Autoridade Nacional Designada para aprovação de projetos no Brasil e as Universidades e Centros de Pesquisa Tecnológica, para facilitar a elaboração de

uma base de dados como ferramenta de auxílio a empreendedores e, principalmente a instituições e profissionais visando conciliar e priorizar interesses dos mecanismos de desenvolvimento limpo.

Em outras áreas do conhecimento relacionadas também com a implementação de projetos de MDL no Brasil, é necessário realizar um estudo jurídico de tal maneira que fique claro o roteiro a seguir em matéria legal e econômica para estes mecanismos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ABTN - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT; 1987. *Resíduos Sólidos: Classificação*. NBR 10004. Rio de Janeiro.
- ACZEL, Paula; 2004. *Analizzando le Implicazioni Commerciali dell'EU ETS*. ICF Consulting. Milan, Italia.
- AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE; 2002. *La energía y el medio ambiente en la Unión Europea — Resumen*. Luxemburgo.
- ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. < <http://www.aneel.gov.br/>> *Procedimento para Conexão à Rede Básica do Sistema Interligado*. Acesso em outubro de 2005.
- BAGNOLI, Philip; 2001. *Implementing the Kyoto Agreement Using Tradable Permits: The International Context for Canada*. Toronto: Department of Finance Working Paper 2001.
- BALESTIERE, José Antônio, 2002. *Co-geração: geração combinada de eletricidade e calor*. Editorial da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil.
- BLACK-ARBELAEZ, Thomas; BETTELLI, Paola; CAYCEDO, Juan Carlos; 2005. *Instrumentos Económicos y Medio Ambiente*. CAEMA - Centro Andino para la Economía en el Medio Ambiente. Vol. 5, No. 3. Bogotá.
- BÖHRINGER, Christoph; VOGT, Carsten; 2003. *Economic and environmental impacts of the Kyoto Protocol*. Centre for European Economic Research (ZEW), Mannheim.
- CHEREMISINOFF, Nicholas; 2002. *Handbook of solid waste management and waste minimization technologies*. Ed. Butterworth Heinemann. Nova Iorque.
- CCAM - COMISIÓN PARA LA COOPERACIÓN AMBIENTAL MEXICANA; 2001. *México y el incipiente mercado de emisiones de carbono: Oportunidades de inversión para pequeñas y medianas empresas en la agenda sobre cambio climático mundial*. Cidade do México.
- CDM EB - Clean Development Mechanism - Executive Board. *Greenhouse gas emission through landfill gas capture and flaring were baseline is established by a public concession contract, AM0002*, < <http://unfccc.int>> Acesso em maio de 2005a.
- _____ *Simplified financial analysis for landfill gas capture projects, AM0003* < <http://unfccc.int>> Acesso em maio de 2005b.

- _____ *Landfill gas capture and electricity generation projects where landfill gas captures is not mandated by law*, AM0010 < <http://unfccc.int>> Acesso em maio de 2005c.
- _____ *Landfill gas recovery with electricity generation and no capture or destruction of methane in the baseline scenario*, AM0011. < <http://unfccc.int>> Acesso em maio de 2005d.
- _____ *Biomethanation of municipal solid waste in India, using compliance with MSW rules*, AM0012< <http://unfccc.int>> Acesso em maio de 2005e.
- _____ *Guidelines for completing the project design document (cdm-pdd)*. < <http://unfccc.int>> Acesso em maio de 2005f.
- ÇENGEL, Yunnes; BOLES, Michael; 1994. *Termodinâmica*. Ed. Mc-Graw Hill. Cidade do México.
- DESIDERI, Umberto; 2002. *Sanitary Landfill Energetic Potential Analysis: A Real Case Study*. Energy Conversion and Management Perugia University . Perugia.
- FAUCHEUX, S.; Noel, J. F; 1998. *Economia dos recursos naturais e do meio ambiente*. Lisboa: Instituto Piaget.
- GIL, Antônio Carlos; 1991. *Como Elaborar Projetos de pesquisa*. São Paulo: Atlas.
- GOLDEMBERG, José; 1998. *Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo.
- GREENHOUSE ISSUES; 1997. Federation for Carbon Sequestration. *Greenhouse Issues* 30.
- INGARAMO, Jorge; SIERRA, Eduardo; 2005. *Situación y tendencias del mercado del carbono en 2005*. Instituto de Estudios Económicos de la Bolsa de Cereales. Buenos Aires.
- IBAY, Angela; 2004. *Legal Aspects of the Emission Reduction Purchase Agreement*. Climate Change Information Center - Manila Observatory. Manila, Filipinas.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS. *Censo 2000*. <<http://www.ibge.gov.br/censo>>. Acesso em agosto de 2005.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS; 1995. *Lixo municipal: Manual de gerenciamento integrado*. São Paulo.
- JINGRU, Li; ZHAO GUANG, Hu; 2002. Study on Mitigation environmental emissions from Power Sector in Yunnan Province, China. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY, POWERCON (13-17 Oct 2002). Proceedings Volume 4. Page(s):2076 – 2080.
- JIQ - JOINT IMPLEMENTATION QUARTERLY; 1997. *World Bank's Global Carbon Initiative and the Carbon Investment Fund*.
- JACQUES, Christiane; LAFRANCE, Gaëtan; Doucet Joseph; 1999. *L'inertie du changement dans l'industrie électrique en Amérique du Nord. Le respect du protocole de Kyoto est -il réaliste?*.

- Institut national de recherche scientifique (INRS) - Énergie et matériaux, Varennes, Québec.
- JOUVET, Pierre-André; MICHEL, Philippe; ROTILLON, Gilles; 2003. *International markets for pollution permits and factor income*. Université Paris I: Paris..
- KAYA, Yoichi; et al.; 2003. *Environment, Energy, and Economy: Strategies for Sustainability*. Nova Iorque: United Nations Press.
- LAFRANCE, Gaëtan; GENOIS, Julien; LEMAY, Martin; 2004. *Protocole de Kyoto: Le cas du secteur résidentiel au Canada*. Québec: GREEN Un.
- MAY, P. H. et al.; 2003 *Economia do meio ambiente: teoria e prática*. Rio de Janeiro: Ed. Campus.
- MANNE, Alan S. e RICHELIS, Richard G.; 2003. *Market Exchange Rates or Purchasing Power Parity: Does the Choice Make a Difference to the Climate Debate?*. AEI-BROOKINGS JOINT CENTER FOR REGULATORY STUDIES. Stanford University and Electric Power Research Institute (EPRI). Standford.
- MCT - MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA <<http://www.mct.gov.br/clima>> Acessado em julho de 2005.
- MMA - MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE; 2005. *Estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos “aterros sanitários” nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil*. Piracicaba.
- MOURA-COSTA, P. A convenção climática e o surgimento de commodities ambientais. *Gazeta Mercantil*: São Paulo, 1997.
- _____; 2000. *Project duration and accounting methods*. EcoSecurities Ltd. Londres.
- _____; 2002. *Carbon trading and investment in clean energy projects*. EcoSecurities Ltd. Londres.
- MOURA, L. A.; 2000. *Economia ambiental: gestão de custos e investimentos*. São Paulo: Editora Juarez de Oliveira.
- _____; 2001. *O valor da natureza: economia e política dos recursos ambientais*. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Garamond.
- MUYLAERT, Maria; 2000. *Análise dos acordos Internacionais sobre mudanças climáticas sob o ponto de vista do uso do conceito de ética*. Rio de Janeiro. Tese (Doutorado) – COPPE/Universidade Federal de Rio de Janeiro.
- OLIVEIRA, L. B; 2000. *Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos e abatimento das emissões de gases do efeito estufa*. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) – COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- POOLE, A. D.; HOLLANDA, J. B.; TOLMASQUIM, M. T.; 1998. *Conservação de Energia e Emissão de Gases do Efeito Estufa*. Instituto Nacional de Eficiência Energética.

- PRODEEM - PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO ENERGÉTICO DE ESTADOS E MUNICÍPIOS. < www.mme.gov.br>. Acesso em maio de 2005.
- RAVINDRANATH, N.H. MEILI, Anandi, ANITA, R, 1998. *AIJ in the Non-Energy Sector in ; India: Opportunities and Concerns*. Berkeley National Laboratory. Environmental Energy Technologies Division. Berkeley.
- ROCHA, M. T; 2003. *Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do modelo CERT*. Piracicaba. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.
- ROMAGNOLI, Henrique César; 2005. *Identificação de barreiras à Geração Distribuída no Marco Regulatório atual do Setor Elétrico Brasileiro*. Florianópolis. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.
- SANTOS, André; 2002. *Do fundo ao Mecanismo: Gênese, características e perspectivas para o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo; ao encontro ou de encontro à equidade*. Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado) - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- TOLMASQUIM, Mauricio; et al.; 2004. *Alternativas Energéticas Sustentáveis no Brasil*. Rio de Janeiro: Relume Dumará.
- UNFCCC SECRETARIAT. The Kyoto Protocol 1997. Disponível em < <http://unfccc.int>> Acesso em fevereiro de 2005a.
- _____ Marrakesh Acords and the Marrakesh Declaration 2001. Disponível em < <http://unfccc.int>> Acesso em março de 2005b.
- USIJI - UNITED STATES INITIATIVE ON JOINT IMPLEMENTATION; 1994. *National Program Report*. Washington.
- _____; 1997. *National Program Report*. Washington.
- VAN DAMME, Eric; 2005. *Liberalizing the Dutch electricity market: 1998-2004*. Center and TILEC. Tilburg University. Tilburg, Holanda.
- WALSH, Michael, 2004. *The Chicago Climate Exchange: Creating a Market for GHG Emission Reductions*. CHICAGO CLIMATE EXCHANGE, INC. Chicago.
- WB - WORLD BANK ; 1999. *Guidance Note on Recuperation of Landfill Gas from Municipal Solid Waste Landfills*. Washington: World Bank Press.
- _____; 2005. *State Trends of the Carbon Market 2005*. Washington: World Bank Press.

APÊNDICE A - RESUMO DAS CONFERÊNCIAS DAS PARTES

CONFERÊNCIA	OBJETIVOS, METAS E DESTAQUES.
<p>COP 1 04/1995 Berlim – Alemanha “Mandato de Berlim”</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Proposta da constituição do Protocolo. • Estipular os limites de emissões de GEE. • Estipular calendário de atividades. • Brasil propõe: <i>Activities Implemented Jointly (AIJ)</i> como modalidade de execução conjunta para cooperação internacional, incluindo países não compromissados com os limites de redução (não Anexo I)
<p>COP 2 06/1996 Genebra – Suíça “Declaração de Genebra”</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Apresentação do segundo relatório do IPCC¹⁵. • Constituição da base científica para que as nações tomassem ações fortes e urgentes.
<p>COP 3 12/1997 Kyoto – Japão “Protocolo de Kyoto”</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Inclui metas e prazos e limitações fixadas para os GEE. • Propõe três mecanismos de flexibilização¹⁶: <ul style="list-style-type: none"> ○ Execução Conjunta (<i>JI - Joint Implementation</i>). ○ Comércio de Emissões (<i>ET - Emissions Trade</i>). ○ Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (<i>CDM – Clean Development Mechanism</i>).
<p>COP 4 11/1998 Buenos Aires – Argentina “Plano de Buenos Aires”</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Fixa os prazos finais para a regulamentação e implementação do CDM. • Reiteração das metas de Kyoto. • Conceito de responsabilidade histórica das emissões (desde a Revolução Industrial). • <i>Voluntary Agreement (VA)</i> é o compromisso voluntário de metas de redução para os países em desenvolvimento (não integrantes do Anexo I) • EUA assinou o Protocolo de Kyoto mas não o ratificou, argumentando que países como a China, Índia, México e Brasil também são responsáveis por boa parte das emissões de GEE.
<p>COP 5 10/1999 Bonn - Alemanha</p>	<ul style="list-style-type: none"> • A redução dos GEE pode ser feita fora dos respectivos países de emissão, ou seja, não domesticamente. O CDM é o único que envolve países em desenvolvimento.
<p>COP 6 11/2000 Haia - Holanda</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Regras operacionais do Protocolo de Kyoto. • Divergências entre EUA e EU levaram a suspender a Conferência. EUA decidiu não negociar mais para a implementação do Protocolo¹⁷.

¹⁵ IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change. Este relatório é o documento mais autorizado sobre ciência da mudança do clima, contendo as possíveis consequências e as opções de resposta.

¹⁶ Os dois primeiros foram constituídos para serem utilizados entre países industrializados do Anexo I, e seus objetivos são a contabilização de reduções líquidas de emissões de gases com execução de projetos em outros países, também do Anexo I.

<p>COP 6 – BIS 07/2001 Bonn – Alemanha “Acordo de Bonn”</p>	<ul style="list-style-type: none"> • As Partes voltaram a negociar depois da abrupta finalização da conferência anterior. • O grupo denominado <i>Umbrella Group</i>, composto por Canadá, Federação Russa, Japão e Austrália propuseram um sistema brando para quantificação de emissões de carbono absorvidas pelos seus sumidouros e um regime não obrigatório para participação do Protocolo. • LULUCF são os critérios para o uso da terra e os câmbios para reflorestamento. (<i>Land use, land use change and forestry</i>).
<p>COP 7 10/2001 Marrakesh – Marrocos “Acordo de Marrakesh”</p>	<ul style="list-style-type: none"> • O UG propôs poucos critérios de elegibilidade para os IJ, ET e CDM; além de não fornecer informações detalhadas sobre seus sumidouros. • Estabeleceram-se as regras operacionais do LULUCF. • Estabelecimento dos fundos internacionais. • Os países deviam ter inventário de emissões, o não cumprimento faria a impossibilidade de participara dos mecanismos de mercado. • Detectaram que o Protocolo de Kyoto teve vários problemas: <ul style="list-style-type: none"> ○ EUA não está presente. ○ Existem dificuldades para medir os sumideros de carbono de floresta e agricultura na Federação Russa, pois apresentou um excesso de reduções disponíveis devido ao colapso da economia desde 1991 (<i>Hot Air</i>).

¹⁷ O Protocolo de Kyoto entrará em vigor com a adesão dos países industrializados que, juntos, contribuem com pelo menos 55% das emissões globais.

APÊNDICE B - DADOS DO MERCADO

(Fonte: WB, 2005).

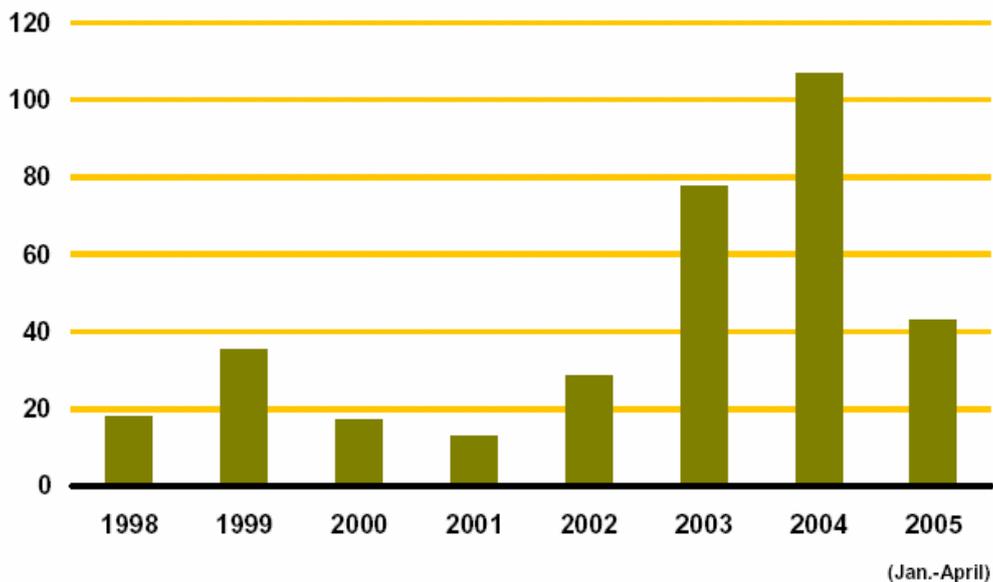


FIGURA B1: VOLUMES ANUAIS EMITIDOS (milhões tCO₂^{equiv})

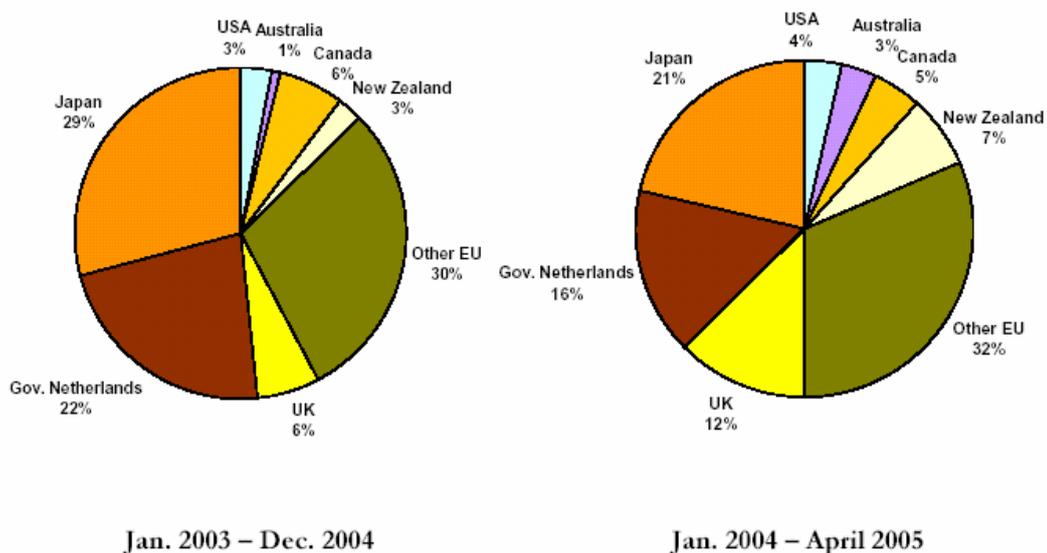


FIGURA B2: PRINCIPAIS COMPRADORES DE CERTIFICADOS DE EMISSÕES REDUZIDAS

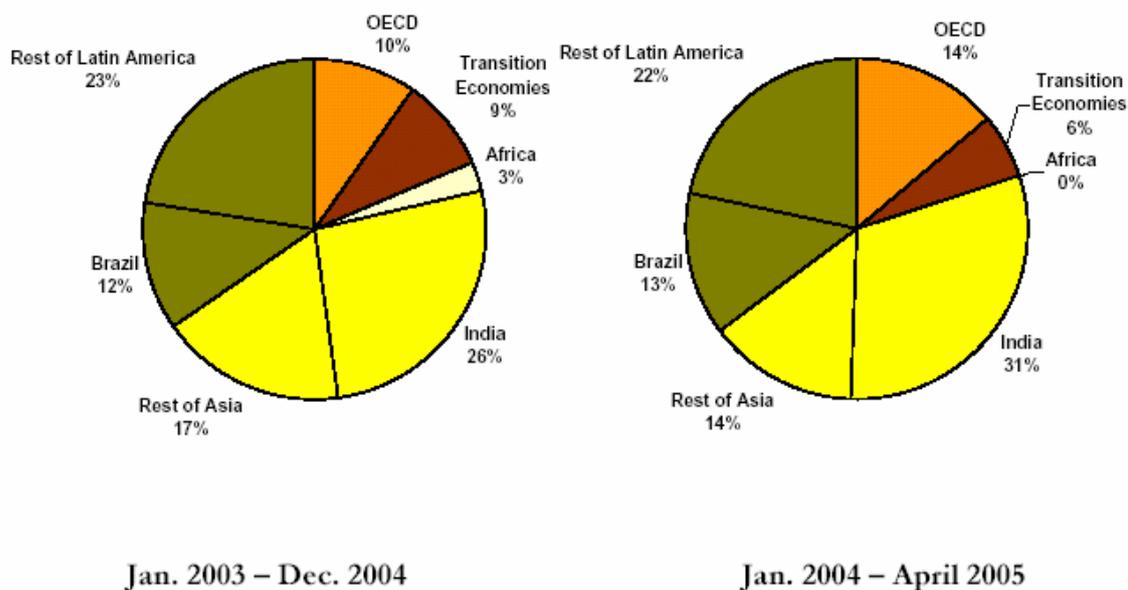


FIGURA B3: LOCALIZAÇÃO DOS PROJETOS DE MDL.

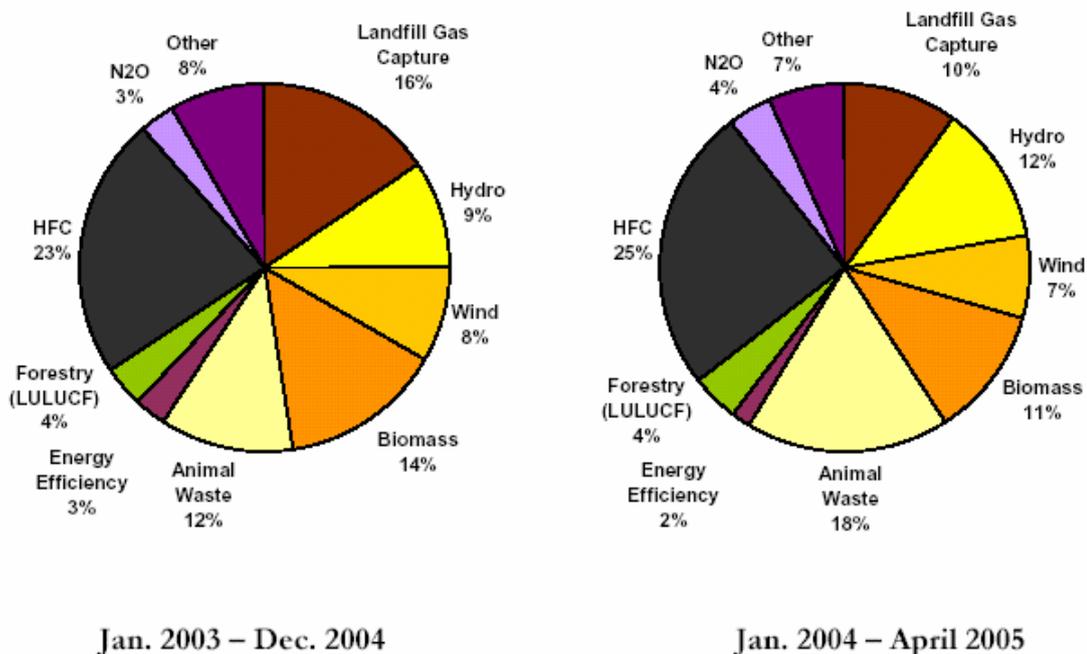


FIGURA B4: TECNOLOGIA DOS PROJETOS DE MDL.

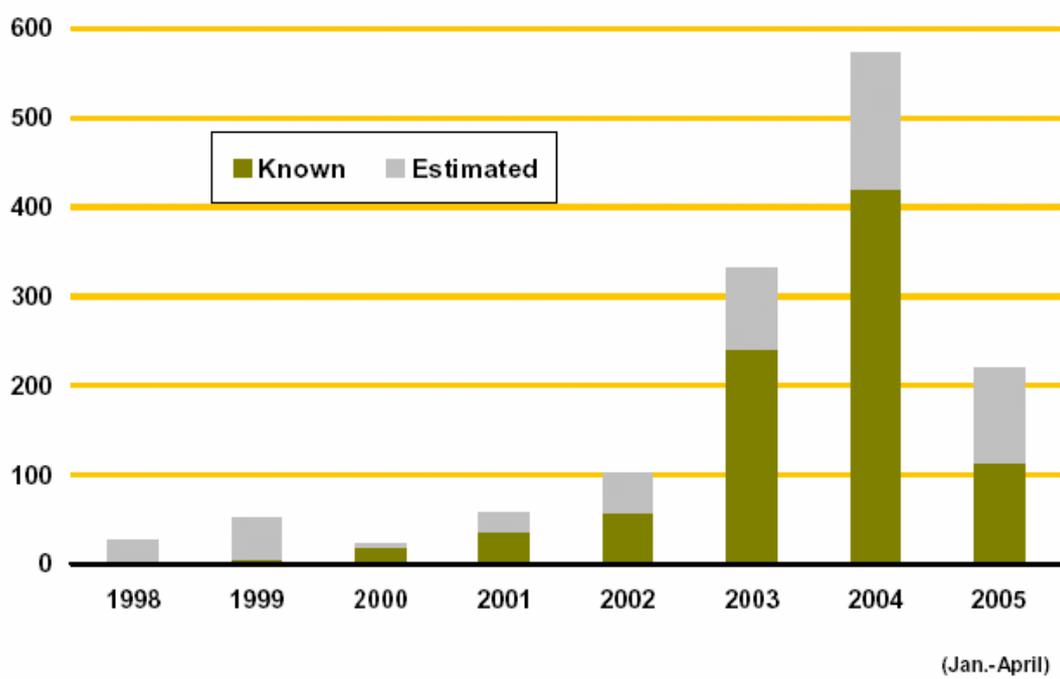


FIGURA B5: VOLUME TOTAL DE MERCADO UNIDADES DE RCE POR ANO EM MILHÕES DE US\$

APÊNDICE C - NOTAS SOBRE PRODUÇÃO INDEPENDENTE DE ENERGIA

O desenvolvimento dos mercados de créditos de carbono é inerente ao mercado de energia elétrica e às disposições que a partir deste se apresentam, pois além do objetivo inicial do MDL que é gerar Reduções Certificadas de Emissões (CER), são advindas quantidades de energia elétrica como produto de uma geração distribuída, e cujas quantidades podem ser negociadas, seja no mercado *spot* de energia elétrica, ou então por contrato de concessionária.

O presente item passa a abordar as disposições do setor elétrico em âmbito Federal, bem como os principais aspectos relacionados à produção independente de energia elétrica. No caso da presente dissertação, se faz ênfase no caso da produção independente com fontes renováveis de energia: caso particular da utilização como combustível gás oriundo de aterros sanitários.

A seguir, comenta-se sobre os diferentes agentes públicos e privados que atuam ou estão envolvidos nesta área, identificando as principais atribuições e apresentando as informações diretamente relacionadas ao projeto, objeto do presente estudo, qual seja, a implantação e operação, por produtor independente de energia, de usina termelétrica com biogás como combustível. O texto está baseado nas considerações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (Resoluções nº 281/99, 247/99, nº 102/2002 e nº 290/2000, e o Decreto nº 2.655/98), e o texto do MMA (2005).

1 - Agência Nacional de Energia Elétrica

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), regula e fiscaliza a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica no Brasil. Para esses fins, implementa as diretrizes para a exploração da energia elétrica, cumpre e faz cumprir as normas aplicáveis aos serviços públicos de energia elétrica, expede as autorizações necessárias e fixa as multas administrativas. Todas as atividades relacionadas ao setor elétrico encontram-se sob o poder regulador e fiscalizador da ANEEL, devendo ser observadas a legislação aplicável e as normas regulamentares por ela expedidas.

2. - Produtores de Energia Elétrica

O Outro agente importante é o gerador da energia elétrica. Existem entes que podem prestar os serviços públicos de produção de energia elétrica, tais como o produtor independente, o autoprodutor e os concessionários. Para o caso em questão, considerar-se-á livre comercialização da energia que será gerada por fontes limpas, como produção independente.

3. - Produtor independente de energia

O Produtor independente de energia é a pessoa jurídica ou o consórcio de empresas que conta com o direito de produzir energia elétrica e comercializá-la por sua conta. Este direito é conferido pela ANEEL.

Existem duas considerações referentes à implantação de fontes independentes: Para potência superior a 5.000 kW, não há mercado específico preestabelecido para comercialização da energia,

cabendo ao produtor negociar livremente suas condições e preços de fornecimento, e adquirir antes as permissões de ANEEL. Para potência igual ou inferior a 5.000 kW deve negociar a energia gerada a través de contrato e comunicar sua implementação a ANEEL para fins de registro.

4. - Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS)

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) administra as redes de transmissão e distribuição de energia elétrica no Brasil, de tal modo que se busca assegurar a continuidade do fornecimento de energia em todas as regiões. O ONS atua no Sistema Interligado, que é o conjunto de instalações responsáveis pelo suprimento de energia elétrica a todas as regiões do País, interligadas eletricamente, estando nele incluídas a Rede Básica e a Rede de Distribuição. Caso o projeto de geração de energia a partir do biogás de aterro envolva a conexão e utilização do Sistema Interligado, deverá, obrigatoriamente, sujeitar-se às regras pertinentes ao ONS.

5. - Procedimento para Conexão à Rede Básica do Sistema Interligado

A Rede Básica é o conjunto de instalações de linhas de transmissão com tensão igual ou superior a 230 kV. Assim, todo o agente que tem interesse em conectar-se à Rede Básica do Sistema Interligado deve seguir um procedimento específico perante o ONS, a fim de regular as condições de acesso, conexão e uso das linhas de transmissão do sistema.

Como primeiro passo do procedimento, para acesso ao Sistema Interligado, tem-se a necessidade de providenciar a chamada Solicitação de Acesso, que é o requerimento do produtor independente de energia no qual se apresentam todos os dados e informações técnicas referentes ao projeto. Tal solicitação é encaminhada ao ONS e às concessionárias de transmissão de energia elétrica com as quais o produtor irá se relacionar.

Concluída essa fase, passa-se à etapa pertinente da celebração dos contratos indispensáveis à conexão e utilização do sistema pelo produtor independente de energia:

- **Contrato de Conexão ao Sistema de Transmissão (CCT)**

É o instrumento celebrado entre o produtor independente de energia e as concessionárias das instalações de transmissão de energia elétrica, no qual são fixadas as condições pertinentes à conexão à Rede Básica. Neste CCT devem-se esclarecer: os requisitos técnicos e operacionais do ponto de conexão; as responsabilidades de instalação e operação da conexão realizada; a descrição detalhada dos pontos de conexão e das instalações de conexão, incluindo o conjunto de equipamentos necessários para a interligação elétrica das instalações do produtor independente ao sistema de transmissão ou de distribuição, com seus respectivos encargos de conexão; e as penalidades pelo atraso no pagamento do não-atendimento dos índices de qualidade.

- **Contrato de Uso do Sistema de Transmissão (CUST)**

Este contrato deve ser celebrado entre o ONS e o produtor independente de energia, o Contrato de Uso do Sistema de Transmissão (CUST), onde são estabelecidas as condições gerais e técnicas relativas ao uso das instalações de transmissão de energia elétrica do Sistema Interligado, tais como: a obrigatoriedade da observância aos procedimentos de rede; os montantes de uso dos sistemas de transmissão contratados nos horários de ponta e fora de ponta e as condições para a solicitação de alteração dos valores de uso contratados; definição dos locais e dos procedimentos

para medição e informação de dados; e os índices de qualidade relativos aos serviços de transmissão a serem prestados.

6. - Procedimento para Conexão à Rede de Distribuição do Sistema Interligado

O projeto pode contemplar a hipótese ou necessidade de o produtor independente de energia conectar-se à Rede de Distribuição, caso em que também há procedimento específico ante o ONS, para regulamentar o acesso, a conexão e o uso às instalações de distribuição do Sistema Interligado.

Havendo a necessidade de acesso à Rede de Distribuição por parte do produtor independente de energia, que para tanto deverá promover a celebração dos acordos adiante explanados, torna-se obrigatória, também, a celebração do CUST, ainda que a energia a ser transportada seja de tensão inferior a 230 kV.

- **Contrato de Conexão ao Sistema de Distribuição (CCD)**

As condições regedoras da conexão à Rede de Distribuição devem constar de instrumento próprio, o Contrato de Conexão ao Sistema de Distribuição (CCD), firmado entre o produtor independente e as concessionárias ou permissionárias detentoras das instalações de distribuição de energia elétrica, no qual obrigatoriamente FIGURA como interveniente o ONS¹⁸.

Quanto às condições contratuais mínimas a serem estabelecidas no CCD, são estas as mesmas previstas e aplicáveis ao CCT.

- **Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD)**

O procedimento para acesso à Rede de Distribuição completa-se com a celebração do Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD) entre o produtor independente de energia e as concessionárias ou permissionárias de distribuição de energia elétrica, onde ficam consagradas as condições gerais e técnicas relativas ao uso da Rede de Distribuição do Sistema Interligado.

As mesmas condições contratuais mínimas regedoras do CUST aplicam-se e devem ser previstas no CUSD.

7. - Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE)

O Mercado Atacadista de Energia Elétrica¹⁹ (MAE), tem a responsabilidade pelo registro dos contratos e contabilização das transações que ocorrem em seu âmbito; a possibilidade de assegurar aos agentes participantes do MAE o acesso aos dados necessários para a conferência da contabilização de suas transferências; a competência de receber e processar solicitações e manifestações dos agentes que comercializam energia elétrica no seu âmbito.

¹⁸ Artigo 6º da Resolução nº 247/99.

¹⁹ É regulamentado pelo Decreto nº 2.655, de 2 de julho de 1998, pela Resolução nº 102, de 1 de março de 2002 e pela Resolução nº 290, de 3 de agosto de 2000.

O MAE não compra ou vende energia elétrica, ele apenas viabiliza estas transações entre os diversos agentes do mercado, assegurando, ainda, os mecanismos de proteção aos interesses dos consumidores.

Dentro do MAE, se credenciam as regras para a comercialização de energia elétrica e subsequentes contabilização; a liquidação (processo de pagamento e recebimento de obrigações e direitos referentes à compra e venda de energia no Mercado de Curto Prazo); os requisitos de garantia financeira relacionada com os montantes comercializados.

8. - Contrato de Compra e Venda de Energia Elétrica

Na maioria dos empreendimentos relacionados à produção independente de energia faz-se importante a celebração do contrato de compra e venda de energia elétrica, comumente conhecido por PPA (*Power Purchase Agreement*). Isto porque, conhecidas as condições pertinentes à comercialização da energia elétrica a ser produzida, o produtor independente, em primeiro lugar, tem assegurado a destinação final para o seu produto e, em segundo, pode analisar a viabilidade econômica e financeira do empreendimento.

APÊNDICE D– CONSIDERAÇÕES SOBRE ATERROS SANITÁRIOS

O seguinte ANEXO oferece uma apresentação da metodologia seguida no desenvolvimento do projeto e considerações necessárias para o modelo de cálculo assumido, junto com a descrição do desenho do aterro enquanto às características operativas e técnicas.

É fornecida uma contextualização básica dos aspectos preliminares referentes aos aterros sanitários, partindo de dados brasileiros da quantidade de resíduos sólidos urbanos gerados nos centros urbanos. É feita uma definição do termo “Resíduo Sólido Urbano” e posteriormente explicam-se os processos de formação do biogás. Finalmente desenvolve-se um item dos aterros sanitários enquanto às condições operativas dos mesmos.

1. Contextualização e aspectos preliminares

É importante fazer uma estimativa do potencial que possuem os aterros sanitários no Brasil. O MMA (2005), a partir de dados fornecidos através da **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico do IBGE**, Do ano 2000, afirma que as municipalidades brasileiras produzem 228.413 mil toneladas de lixo. Desse total, 40,5% têm um destino final adequado. Assim, são as regiões metropolitanas as mais afetadas com a disposição final do lixo.

A partir desses dados, é possível concluir que existem muitas oportunidades para desenvolver controles do lixo para diminuir a poluição do ar, das águas e dos solos; e conseqüentemente evitar as emissões desmesuradas de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Observa-se que a queima pura e simples do metano é uma oportunidade para mitigar as emissões de GEE; e considere-se também o cenário da possibilidade de geração de energia renovável junto aos grandes centros consumidores de eletricidade, além dos benefícios sócio-econômicos que traz a implementação do projeto em relação ao desenvolvimento sustentável da região afetada e do País, tais como:

- Atração de investimento estrangeiro adicional;
- Redução de possíveis impactos à higiene ocupacional e ao meio ambiente local, mediante a captura e combustão do gás de aterro sanitário e o manejo correto do chorume, pela impermeabilização da sua área superficial nas proximidades dos drenos por onde grande parte da água de chuva acaba infiltrando;
- Oportunidades de emprego na área em que o projeto está localizado;
- Aumento da confiabilidade de abastecimento elétrico;
- Contribuição para reduzir as importações de combustíveis.

2. Resíduos Sólidos Urbanos

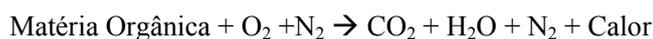
Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são definidos, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), como aqueles “resíduos nos estados sólidos e semi-sólidos que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Também os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornam inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos d’água, ou exijam, para isso, soluções técnicas e economicamente inviáveis, em face à melhor tecnologia disponível” (ABNT, 1987).

Com esta diretriz sobre os resíduos sólidos, deve-se aclarar que dentro dos sistemas de aterros sanitários são considerados os resíduos provenientes das atividades domésticas e comerciais e industriais, pois suas composições apresentam maior quantidade de resíduos orgânicos próprios para a geração de metano.

A composição percentual média dos resíduos sólidos urbanos do Brasil é: orgânica (65%), papel (25%), metais (4%), plásticos (3%) e vidro (3%), e aclara além que existe o desperdício de aproximadamente sete milhões de toneladas de recicláveis – papéis, plásticos, vidros e metais (IPT, 1998).

3. Geração e captura de biogás

A geração do biogás tem várias etapas logo após a disposição dos resíduos no aterro sanitário, ponto no qual é iniciado o processo de degradação aeróbia, facilitado pelos microorganismos naturais presentes no ambiente devido à presença de oxigênio. Este processo é acelerado, e pode ser verificado mediante a liberação de calor (temperatura do resíduo de 55 a 70°C) e presença de dióxido de carbono (WB, 1999). A reação exotérmica ocorre como descrita a seguir:



Após o processo aeróbio, na falta de oxigênio, ocorre o processo anaeróbio. A velocidade da degradação anaeróbia é muito lenta, podendo produzir gases por mais de 30 anos. O processo anaeróbio pode se dividir em quatro fases, classificadas conforme o tipo de bactérias presentes.

A primeira é a **fase Acidogênica**, produzida por enzimas celulares, que decompõem a matéria orgânica formando compostos mais simples, como ácidos solúveis (ácidos graxos, aminoácidos e açúcares). Os subprodutos formados são principalmente água, hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias presentes são as *Clostridium* y *Bacillus*.



A duração da fase acidogênica é de algumas semanas, finalizando com o pico de produção de CO₂ (chegando a cerca de 90%) e H₂ (que chega a alcançar a faixa de 20%).

- **Fase Metanogênica instável:** é a segunda fase do processo anaeróbio, que ocorre na presença de microorganismos normalmente presentes no solo. As bactérias responsáveis são as

Methanobacterium Brvantii y *Methanosarcina Barkeri*, que transformam os ácidos orgânicos e o CO₂ em metano. A expressão química é:



O período de incremento da formação de metano é de seis meses a dois anos, com produção de metano entre 50% e 60% da composição do biogás, gerando adicionalmente CO₂ e traços de outros gases.

A **Fase Metanogênica estável** é a fase mais longa, estendendo-se por décadas. A composição básica é de cerca de 60% de metano, 40% de CO₂ e pequenas frações variáveis de outros gases, só sofrendo grandes variações em caso de perturbações do equilíbrio de fatores como umidade, cobertura, etc. E A **Fase final** ocorre após várias décadas com o decréscimo da porcentagem de metano na composição do biogás até que se torne desprezível, praticamente esgotando-se o material degradável nas condições do aterro.

Portanto, a geração de biogás nos aterros é espontânea. O gás pode escapar do aterro para a atmosfera por diferença de pressão, por drenos de gás (se existentes) ou pela própria superfície de cobertura, quando não é adequadamente disposta.

O biogás pode ser capturado com maior eficiência com drenos internos tanto verticais como horizontais, ocorrendo com maior eficiência quando existem drenos horizontais radiais em as camadas superpostas, convergindo para poços de drenagem vertical. A eficiência aumenta significativamente com sucção forçada, que demanda cuidados na execução e operação dos drenos para evitar a entrada de ar atmosférico.

Os drenos são conectados com tubulações de polietileno de alta densidade, adaptados ao aterro para conduzir o biogás até o setor de sucção, condensação e queima (*flare*). A água que condensa na tubulação e em suspensão no biogás deve ser retirada para evitar entupimentos nas linhas e danificação do grupo gerador por calço hidráulico e corrosão. Filtros de partículas também são necessários para evitar problemas, uma vez que uma instalação desse tipo fica em operação 24 horas, durante anos. A FIGURA 1 demonstra esquematicamente a composição estrutural de um aterro com drenos para captação do biogás.

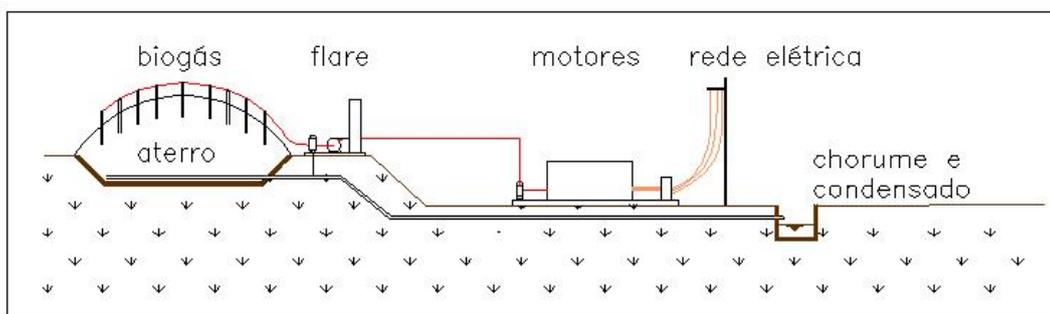


FIGURA D1. Esquema ilustrativo da produção de biogás de aterro.

(Fonte: MMA, 2005).

4. Aterros Sanitários

Segundo DESIDERI (2002), a disposição dos resíduos sólidos urbanos (também referenciados nos textos como MSW) pode ser feita para pirólise, incineração e compostagem aeróbia e/ou anaeróbia. Mas a bibliografia apresenta que as mais comuns são a disposição direta em aterros sobre o solo ou previamente submetidos à triagem para reciclagem.

Acadêmicos como OLIVEIRA (2000) e o WB (1999) têm estudado com detalhes o manejo e a administração dos RSU desde a produção inicial até os usos finais. Porém, ambos coincidem na importância da hierarquização dos resíduos. OLIVIERA (2000) propõe a hierarquia baseada no critério do resíduo final mínimo, conhecida como Sistema Integrado de Gerenciamento de Resíduos Sólidos (SIGRS), no qual as rotas dos RSU devem ser priorizadas em reciclagem, recuperação de energia e finalmente aterro sanitário.

De acordo com esta hierarquização, classificam-se os aterros sanitários como CONTROLADOS, se os resíduos sólidos são cobertos com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho, logrando assim produzir poluição localizada, e também são LIXÕES, se os resíduos são dispostos sobre o solo e sem medidas de proteção ao meio ambiente e à saúde pública (descarga de lixo a céu aberto).

Os RSU provenientes dos setores industrial, comercial e residencial, após serem recolhidos, passam por um sistema de gerenciamento que identifica, em função de algumas características, sua destinação. Esta pode ser a reciclagem, a compostagem ou a geração de energia – a partir da queima, da gaseificação direta, da produção de celulignina ou por meio do biogás de um aterro energético – ou ainda, a deposição num aterro sanitário (OLIVEIRA, 2000).

Considera-se também que a reciclagem de vidros, papéis, plásticos e metais, não exclui as etapas de compostagem, recuperação energética e disposição final. É possível uma combinação administrativa entre reciclagem, compostagem e a recuperação energética, permitindo conciliar o problema da disponibilidade de áreas para armazenar resíduos.

Com uma hierarquização das rotas de aproveitamento dos RSU é possível gerar energia elétrica a partir da queima do biogás recuperado dos depósitos de lixo, da combustão de celulignina catalítica, da incineração ou da gaseificação. Nos aterros sanitários existe um grande potencial teórico de energia disponível.

A forma adequada de destruir com grande eficiência o metano presente no biogás é queimá-lo diretamente em *flare* enclausurado com tempo de retenção e temperatura suficiente para atingir mais de 98% de oxidação em turbinas.

Também é possível utilizar o poder calorífico deste utilizando-se na queima direta (processo *waste to energy*) ou da gaseificação; o aproveitamento calorífico do biogás, produzido lentamente a partir do lixo orgânico disposto em um aterro energético; ou a produção de um combustível sólido, como a celulignina, a partir dos restos alimentares, para ser queimada em caldeira para mover uma turbina a vapor ou em combustor externo e mover turbina a gás de ciclo combinado.

Na TABELA D1, expõem-se os diferentes tipos de disposição dos RSU tais como incineração, gaseificação ou utilização do biogás.

Finalmente é necessário complementar o anteriormente escrito considerando o aterro sanitário como um sistema de disposição de resíduos, cuja estrutura básica está de acordo com a boa técnica construtiva, de operação e monitoramento. Assim, os aterros sanitários atendem no mínimo às seguintes especificações:

- Impermeabilização da área deve ser com manta plástica e/ou argila compactada com baixa taxa de permeabilidade;
- Drenagem inferior de chorume;
- Drenagem vertical e horizontal de biogás e chorume;
- Drenagem de pé de talude;
- Drenos de monitoramento;
- Drenagem pluvial superficial;
- Compactação do lixo;
- Cobertura diária com terra;
- Cobertura final de argila;
- Acesso pavimentado;
- Administração;
- Balança;
- Oficina;
- Sistema de tratamento de chorume; e,
- Segurança para evitar invasão de catadores.

Cabe anotar também que os aterros sanitários, sendo mesmo bem operados, emitem odores desagradáveis e portanto, ocasionam desconforto na população vizinha. A razão básica de este fato é que a drenagem espontânea de chorume e gás pelos drenos nunca atinge eficiência que elimine os odores. Para aumentar esta eficiência, é recomendável a utilização de um sistema de captação forçada de biogás.

TABELA D1 – Disposição dos resíduos sólidos urbanos. (Fonte: DESIDERI, 2002 e WB, 2005).

Tipo de disposição de resíduos (e definição)	Vantagens	Desvantagens:
<p>Incineração:</p> <p>É o aproveitamento do poder calorífico do material combustível presente no lixo a partir da sua queima para geração de vapor.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Resulta em uso direto de energia térmica para geração de vapor e/ou energia elétrica; • Necessita de alimentação contínua de resíduos; • Relativamente sem ruído e sem odores; • Requer pequena área de instalação. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inviabilidade com resíduos de menor poder calorífico e com aqueles clorados; • A umidade excessiva e os resíduos de menor poder calorífico prejudicam a combustão; • Necessidade de utilização e equipamento auxiliar para manter a combustão; • Metais tóxicos podem ficar concentrados nas cinzas; • Possibilidade de emissão de dioxinas e furanos cancerígenos; • Altos custos de investimento e de operação e manutenção.
<p>Gaseificação:</p> <p>Na gaseificação é fornecido calor para a desintegração das cadeias poliméricas do material do lixo e são formados gases mais simples como CH₄, CO, CO₂ e H₂, posteriormente coletados e aproveitados. Esta tecnologia ainda não é utilizada comercialmente.</p>	<p>O gás resultante do referido processo pode ser utilizado diretamente para aquecimento, utilizado para motores a combustão interna ou em turbinas, ou distribuído em gasodutos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Custos de implementação muito elevados; • Pouco desenvolvimento tecnológico.
<p>Utilização do gás do lixo ou Biogás²⁰:</p> <p>Uso energético mais simples dos resíduos sólidos urbanos a partir da disposição nos aterros sanitários.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Redução dos gases de efeito estufa; • Baixo custo para o descarte de lixo; • Permitir utilização para geração de energia ou como combustível doméstico. 	<ul style="list-style-type: none"> • A ineficiência do processo de recuperação do gás, que permite um aproveitamento de aproximadamente 50% do total de GDL produzido (correspondente a cerca de 90% do metano); • A inviabilidade de utilização do metano para lugares remotos; • O alto custo para “upgrade” de uma planta; • Possibilidades de ocorrência de autoignição e/ou explosão pelas altas concentrações de metano.

²⁰ O Biogás está composto em percentual molar de: 40%-60% de CH₄, 35%-50% de CO₂ e de 0-20% N₂. Seu poder calorífico é de 4.500 a 5.800 Kcal/m³.

APÊNDICE E– CÓDIGO FONTE.

```
function varargout = padrao(varargin)

% TELAINICIAL Application M-file for telainicial.fig
% FIG = TELAINICIAL launch telainicial GUI.
% TELAINICIAL('callback_name', ...) invoke the named callback.

if nargin == 0 % LAUNCH GUI

    OldUnits=get(0,'Units');
    set(0,'Units','Pixels');
    temp=get(0,'ScreenSize');
    set(0,'Units',OldUnits);

    %Rotina para configuração do tamanho da tela
    if temp(3)>800
        OldUnits=get(0,'Units');
        set(0,'Units','Characters');
        temp=get(0,'ScreenSize');
        y=(temp(4)-45)*0.5;
        x=(temp(3)-160.8)*0.5;
        PosFIGURA=[x,y,160.8,45];

    else
        PosFIGURA=[.5,0,159,43];
    end
    fig = openfig(mfilename,'reuse');
    % Use system color scheme for figure:
    set(fig,'Color',get(0,'DefaultUicontrolBackgroundColor'));

    set(fig,'Position',PosFIGURA)
    set(fig,'Visible','on')

    % Generate a structure of handles to pass to callbacks, and store it.
    handles = guihandles(fig);
    guidata(fig, handles);

    if nargout > 0
        varargout{1} = fig;
    end

elseif ischar(varargin{1}) % INVOKE NAMED SUBFUNCTION OR CALLBACK
    try
        if (nargout)
            [varargout{1:nargout}] = feval(varargin{:}); % FEVAL switchyard
        else
            feval(varargin{:}); % FEVAL switchyard
        end
    catch
        disp(lasterr);
    end
end

| ABOUT CALLBACKS:
| GUIDE automatically appends subfunction prototypes to this file, and
| sets objects' callback properties to call them through the FEVAL
| switchyard above. This comment describes that mechanism.
|
| Each callback subfunction declaration has the following form:
| <SUBFUNCTION_NAME>(H, EVENTDATA, HANDLES, VARARGIN)
|
| The subfunction name is composed using the object's Tag and the
```

```

| callback type separated by '_', e.g. 'slider2_Callback',
| 'figure1_CloseRequestFcn', 'axis1_ButtondownFcn'.
|
| H is the callback object's handle (obtained using GCBO).
|
| EVENTDATA is empty, but reserved for future use.
|
| HANDLES is a structure containing handles of components in GUI using
| tags as fieldnames, e.g. handles.figure1, handles.slider2. This
| structure is created at GUI startup using GUIHANDLES and stored in
| the figure's application data using GUIDATA. A copy of the structure
| is passed to each callback. You can store additional information in
| this structure at GUI startup, and you can change the structure
| during callbacks. Call guidata(h, handles) after changing your
| copy to replace the stored original so that subsequent callbacks see
| the updates. Type "help guihandles" and "help guidata" for more
| information.
|
| VARARGIN contains any extra arguments you have passed to the
| callback. Specify the extra arguments by editing the callback
| property in the inspector. By default, GUIDE sets the property to:
| <MFILENAME>('<SUBFUNCTION_NAME>', gcbo, [], guidata(gcbo))
| Add any extra arguments after the last argument, before the final
| closing parenthesis.

```

VARIÁVEIS

```

global Pop Tax GerLix Numero_anos Efcl_contract Lo k CF GWP_CH4 Dens_CH4 Po

```

```

-----CARACTERISTICAS DA POPULAÇÃO -----
Pop=500;          População em milhares de habitantes.
Tax= 0.15;        Taxa de crescimento populacional por ano (p.u.) - Brasil Instituto Brasileiro
de Geografia e Estatística
GerLix= 1.0;      Geração de lixo [kg/pessoa/dia].

```

```

-----CARACTERISTICAS DO ATERRO -----
Lo=180;          Geração de Metano pelo aterro @ 60 material orgânico [Nm3/ton
Waste].
k= 0.12;         Indice de deterioração @ 60 material orgânico [Ton CH4/Ton
Waste].
Porc_CH4= 0.50;   Porcentagem de Metano no aterro sanitário.
CF=0.000662;     Fator de conversão [ton CH4/m3 CNPT CH4]. CNPT=Standar
Temperature and Pressure.
GWP_CH4=21;      Global warming potential [ton CO2e/ton CH4] IPCC Guidelines for
National Greenhouse Gas Inventories [1996-2012]
Dens_CH4=0.652;  Densidade do Metano CNPT [kg/m3]

```

-----CARACTERISTICAS DO PROJETO -----

```

Efcl_actual = 0.30; Eficiência de coleta de lixo [p.u.] (linha de base)
Efcl_contract = 0.80; Eficiência de coleta de lixo [p.u.] (projeto)

```

-----CAMPOS-----

Características da População

```

function varargout = dados_Pop_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global Pop

Pop = get(handles.dados_Pop, 'string');
Pop = str2num(Pop);

function varargout = dados_Tax_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global Tax

```

```

Tax = get(handles.dados_Tax,'string');
Tax = str2num(Tax);

function varargout = dados_GerLix_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global GerLix

GerLix = get(handles.dados_GerLix,'string');
GerLix = str2num(GerLix);

-----
Características do Metano @ CNPT
-----

function varargout = dados_Lo_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global Lo

Lo = get(handles.dados_Lo,'string');
Lo = str2num(Lo);

function varargout = dados_k_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global k

k = get(handles.dados_k,'string');
k = str2num(k);

function varargout = dados_CF_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global CF

CF = get(handles.dados_CF,'string');
CF = str2num(CF);

function varargout = dados_GWP_CH4_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global GWP_CH4

GWP_CH4 = get(handles.dados_GWP_CH4,'string');
GWP_CH4 = str2num(GWP_CH4);

function varargout = dados_Dens_CH4_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global Dens_CH4

Dens_CH4 = get(handles.dados_Dens_CH4,'string');
Dens_CH4 = str2num(Dens_CH4);

-----
Características do Projeto
-----

function varargout = dados_Numero_anos_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global Numero_anos

Numero_anos = get(handles.dados_Numero_anos,'string');
Numero_anos = str2num(Numero_anos);

function varargout = dados_Efcl_contract_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global Efcl_contract

Efcl_contract = get(handles.dados_Efcl_contract,'string');
Efcl_contract = str2num(Efcl_contract);

-----
Cálculo dos resultados - Definição Padrão das variáveis
-----

function varargout = OK_Callback(h, eventdata, handles, varargin)
global Pop Tax GerLix Numero_anos Efcl_contract Lo k CF GWP_CH4 Dens_CH4

```

```

if isempty(Pop)
    Pop = 500;
end

if isempty(Tax)
    Tax = 0.15;
end

if isempty(GerLix)
    GerLix = 1.0;
end

if isempty(Lo)
    Lo = 180;
end

if isempty(k)
    k = 0.12;
end

if isempty(CF)
    CF = 0.000662;
end

if isempty(GWP_CH4)
    GWP_CH4=21;
end

if isempty(Dens_CH4)
    Dens_CH4=0.652;
end

if isempty(Efcl_contract)
    Efcl_contract = 0.80;
end

if isempty(Numero_anos)
    Numero_anos = 21;
end

-----
Aterro
-----

-----CARACTERISTICAS DO PROJETO -----

Porc_CH4= 0.50;
Efcl_actual = 0.30; Eficiência de coleta de lixo [p.u.] (linha de base)
Efcl_contract = 0.80; Eficiência de coleta de lixo [p.u.] (projeto)

Numero_anos = 21; Vida do projeto de MDL
Ano = 0:1:Numero_anos; Ano(y)

Populacao(1) = Pop; Dado inicial
for i=2:Numero_anos
    Populacao(i) = Populacao(i-1)*(1+Tax); Crescimento da população
end
for i=1:Numero_anos
    Ger_lixo(i) = Populacao(i)*GerLix*365; Quantidade de Lixo gerado por ano [Ton]
end

-----Requerimentos de destruição de metano-----

FD = 0.5; - fração de gases capturados e queimados no aterro durante o ano y
CH4_LFG_contract = 0.50; p.u.
CH4_LFG_projected = 0.50; p.u. Estimativos
Ratio_CH4_LFG_projected_contract = CH4_LFG_projected/CH4_LFG_contract;

```

```

for t=1:Numero_anos
    Waste_contract(t) = Ger_lixo(t)*Efcl_contract;
    Waste_actual(t) = Ger_lixo(t)*Efcl_actual;
    Ratio_Waste_actual_contract(t) = Waste_actual(t)/Waste_contract(t);

    somatorio = 0;
    for i=0:Ano
        somatorio = somatorio + Waste_contract(i+1)*exp(-k*(i-Ano(t)));
    end

    CH4_projected(t) = k*Lo*somatorio; [m3 de CH4 CNPT]
    LFG_projected(t) = CH4_projected(t)/CH4_LFG_contract; (landfillgas) [m3 de CH4 CNPT]
    CH4_contract(t) = LFG_projected(t)*FD*CH4_LFG_contract; [m3 de CH4 CNPT]
    CH4_baseline(t) =
    CH4_contract(t)*Ratio_Waste_actual_contract(t)*Ratio_CH4_LFG_projected_contract;
end

-----CALCULOS DAS EMISSOES-----

CH4_flared = CH4_projected*Efcl_contract;
ER_CH4 = CH4_flared-CH4_baseline;
ER = ER_CH4*GWP_CH4*CF;

Total_ER = sum(ER);

-----ENERGIA-----

PoderCalorico = 10.861; Poder calorifico do Metano [kWh/m3CH4]
Energia=ER_CH4*Dens_CH4*PoderCalorico;
EnergiaTotal=sum(Energia);

-----CALCULOS DAS EMISSOES EVITADAS PELA GERACAO-----

Cap_inst = 0.2;
EP = Cap_inst*365*24;
EC = 0.45;
EE = ((CH4_flared-CH4_baseline)/CH4_baseline)*EP*EC/1000;

Total_EE = sum(EE);

CO2_equiv = ER-EE;

Total_CO2 = sum(CO2_equiv);

-----SAIDA DE DADOS-----

fid = fopen('saida.txt', 'w');
fprintf(fid,
'*****\n');
fprintf(fid, '----DESENHO DO ATERRO SANITÁRIO PARA REDUÇÃO DE EMISSOES DE CO2, DACORDO COM O
MDL----\n');
fprintf(fid,
'*****\n');

fprintf(fid,
'=====\n');
fprintf(fid, '
CARACTERÍSTICAS INICIAIS
\n');
fprintf(fid, '-----
----\n\n');

fprintf(fid, '-----POPULAÇÃO-----
----\n');

fprintf(fid, '\nPopulação [Milhares de Habitantes] = 4.0f',Pop);
fprintf(fid, '\nTaxa de Crescimento Populacional por ano [p.u.] = 4.2f',Tax);

```

```

fprintf(fid, '\nTaxa de Geração de Lixo [kg/pessoa/dia] = 4.2f',GerLix);

fprintf(fid, '\n\n-----ATERRO-----\n\n');

fprintf(fid, '\nLo - Geração de Metano pelo aterro @ 60 material orgânico [m3/Ton] = 4.2f',Lo);
fprintf(fid, '\nk - Índice de eterioração @ 60 material orgânico [Ton CH4/Ton Waste] = 1.2f',k);
fprintf(fid, '\nFC - Fator de conversão [Ton CH4/m3 CNPT CH4] = 2.0f',CF);
fprintf(fid, '\nGWP - Global Warming Potential [Ton CO2e/Ton CH4] = 2.0f',GWP_CH4);
fprintf(fid, '\nDensidade do Metano CNPT [kg/m3] = 4.2f',Dens_CH4);

fprintf(fid, '\n\n-----PROJETO-----\n\n');

fprintf(fid, '\nTempo do projeto de Redução de Emissões [anos] = 2.0f',Numero_anos);
fprintf(fid, '\nEficiência da coleta de lixo [p.u.] (contrato) = 1.2f',Efcl_contract);
fprintf(fid, '\nEficiência da coleta de lixo [p.u.] (actual) = 1.2f',Efcl_actual);
fprintf(fid, '\nFD - Fração de gases capturados e queimados = 1.2f',FD);
fprintf(fid, '\nFração de Metano no total dos gases gerados pelo aterro (contrato) [p.u.] = 1.2f',CH4_LFG_contract);
fprintf(fid, '\nFração de Metano no total dos gases gerados pelo aterro (projetado)[p.u.] = 1.2f',CH4_LFG_projected);

result= [Ano(2:Numero_anos+1)' Populacao' Ger_lixo' Waste_contract' Waste_actual' LFG_projected'];

fprintf(fid, '\n\n=====');
fprintf(fid, '
                                CALCULOS GERALES
\n');
fprintf(fid, '-----\n\n');
fprintf(fid, '
Ano      População      Geração      Resíduos      Resíduos      LFG      \n');
fprintf(fid, '
      [Mil Habit]      de Lixo      Contratados      Atuais      Projetado \n');
fprintf(fid, '
                                [Ton]      [Ton]      [Ton]      [Nm3/ano] \n');
fprintf(fid, '-----\n\n');
fprintf(fid, ' 2.0f      6.0f      7.0f      7.0f      6.0f      6.0f\n', result);

resultB= [Ano(2:Numero_anos+1)' CH4_projected' CH4_baseline' CH4_flared' ER_CH4' ER' Energia'];

fprintf(fid, '\n\n=====');
fprintf(fid, '
                                CALCULOS DAS EMISSOES
\n');
fprintf(fid, '-----\n\n');
fprintf(fid, '
Ano      CH4      CH4      CH4      Reduções      Reduções
Energia\n');
fprintf(fid, '
      Projetado      Baseline      Flared      de CH4      Equiv. CO2
total\n');
fprintf(fid, '
      [Nm3/ano]      [Nm3/ano]      [Nm3/ano]      [Ton]      [Ton]
[MWh]\n');
fprintf(fid, '-----\n\n');
fprintf(fid, ' 2.0f \t 7.0f\t      7.0f\t      7.0f\t      7.0f\t      7.0f      7.0f \t\n', resultB);

fprintf(fid, '\n\nEmissões Evitadas Totais [Ton CO2e]= 7.0f',sum(ER));
fprintf(fid, '\n\nEnergia Total Gerada [MWh]= 7.0f',EnergiaTotal);
fclose(fid);

```

```

plot(Ano(2:Numero_anos+1), ER_CH4);
hold on
plot(Ano(2:Numero_anos+1), ER);
title('Reducao de Emissoes')
xlabel('Anos')
ylabel('[Ton de CH4]')

figure()

plot(Ano(2:Numero_anos+1), CH4_projected/1000);
hold on
plot(Ano(2:Numero_anos+1), CH4_baseline/1000,'r');

title('Emissoes Geradas')
xlabel('Anos')
ylabel('[m3]')
legend('CH4 linha de base','CH4 projetado')

hold off

close(padrao);
open saida.txt;
clear all;

```

APÊNDICE F- RESULTADOS COMPUTACIONAIS

200 mil habitantes

 ---DESENHO DO ATERRO SANITÁRIO PARA REDUÇÃO DE EMISÕES DE CO2, DACORDO COM O MDL---

=====

CARACTERÍSTICAS INICIAIS

-----POPULAÇÃO-----

População [Milhares de Habitantes] = 200
 Taxa de Crescimento Populacional por ano [p.u.] = 0.15
 Taxa de Geração de Lixo [kg/pessoa/dia] = 1.00

-----ATERRO-----

Lo - Geração de Metano pelo aterro @ 60% material orgânico [m3/Ton] = 180.00
 k - Índice de deterioração @ 60% material orgânico [Ton CH4/Ton Waste] = 0.12
 FC - Fator de conversão [Ton CH4/m3 STP CH4] = 0
 GWP - Global Warming Potential [Ton CO2e/Ton CH4] = 21
 Densidade do Metano STP [kg/m3] = 0.65

-----PROJETO-----

Tempo do projeto de Redução de Emissões [anos] = 21
 Eficiência da coleta de lixo [p.u.] (contrato) = 0.80
 Eficiência da coleta de lixo [p.u.] (actual) = 0.30
 FD - Fração de gases capturados e queimados = 0.50
 Fração de Metano no total dos gases gerados pelo aterro (contrato) [p.u.] = 0.50
 Fração de Metano no total dos gases gerados pelo aterro (projetado) [p.u.] = 0.50

=====

CALCULOS GERALES

Ano	População [Mil Habit]	Geração de Lixo [Ton]	Resíduos Contratados [Ton]	Resíduos Atuais [Ton]	LFG Projetado [Nm3/ano]
1	200	73000	73000	73000	3153600
2	230	83950	83950	83950	3555674
3	264	96542	96542	96542	4009011
4	304	111024	111024	111024	4520148
5	350	127677	127677	127677	5096452
6	402	146829	146829	146829	5746234
7	463	168853	168853	168853	6478861
8	532	194181	194181	194181	7304895
9	612	223309	223309	223309	8236246
10	704	256805	256805	256805	9286341
11	809	295326	295326	295326	10470321
12	930	339625	339625	339625	11805254
13	1070	390568	390568	390568	13310386
14	1231	449153	449153	449153	15007419
15	1415	516527	516527	516527	16920817
16	1627	594005	594005	594005	19078168
17	1872	683106	683106	683106	21510575
18	2152	785572	785572	785572	24253105
19	2475	903408	903408	903408	27345300
20	2846	1038919	1038919	1038919	30831739
21	3273	1194757	1194757	1194757	34762689

=====

CALCULOS DAS EMISSOES

Ano	CH4 Projetado [Nm3/ano]	CH4 Baseline [Nm3/ano]	CH4 Flared [Nm3/ano]	Reduções de CH4 [Ton]	Reduções Equiv. CO2 [Ton]	Energia total [MWh]
1	1576800	788400	1261440	473040	6576	3349772
2	1777837	888919	1422270	533351	7415	3776858
3	2004506	1002253	1603605	601352	8360	4258395
4	2260074	1130037	1808059	678022	9426	4801327
5	2548226	1274113	2038581	764468	10628	5413481
6	2873117	1436558	2298494	861935	11983	6103683
7	3239430	1619715	2591544	971829	13510	6881883
8	3652447	1826224	2921958	1095734	15233	7759302
9	4118123	2059061	3294498	1235437	17175	8748588
10	4643171	2321585	3714537	1392951	19365	9864006
11	5235160	2617580	4188128	1570548	21834	11121635
12	5902627	2951313	4722101	1770788	24617	12539609
13	6655193	3327597	5324155	1996558	27756	14138370
14	7503709	3751855	6002967	2251113	31295	15940967
15	8460409	4230204	6768327	2538123	35285	17973390
16	9539084	4769542	7631267	2861725	39784	20264941
17	10755287	5377644	8604230	3226586	44856	22848657
18	12126553	6063276	9701242	3637966	50575	25761789
19	13672650	6836325	10938120	4101795	57023	29046336
20	15415870	7707935	12332696	4624761	64293	32749652
21	17381345	8690672	13905076	5214403	72491	36925130

Emissões Evitadas Totais [Ton CO2e]= 589479

Energia Total Gerada [MWh]= 300267772

500 mil habitantes

 ---DESENHO DO ATERRO SANITÁRIO PARA REDUÇÃO DE EMISÕES DE CO₂, DACORDO COM O MDL---

=====

CARACTERÍSTICAS INICIAIS

-----POPULAÇÃO-----

População [Milhares de Habitantes] = 500
 Taxa de Crescimento Populacional por ano [p.u.] = 0.15
 Taxa de Geração de Lixo [kg/pessoa/dia] = 1.00

-----ATERRO-----

Lo - Geração de Metano pelo aterro @ 60% material orgânico [m³/Ton] = 180.00
 k - Índice de eterioração @ 60% material orgânico [Ton CH₄/Ton Waste] = 0.12
 FC - Fator de conversão [Ton CH₄/m³ CNPT CH₄] = 0
 GWP - Global Warming Potential [Ton CO₂e/Ton CH₄] = 21
 Densidade do Metano CNPT [kg/m³] = 0.65

-----PROJETO-----

Tempo do projeto de Redução de Emissões [anos] = 21
 Eficiência da coleta de lixo [p.u.] (contrato) = 0.80
 Eficiência da coleta de lixo [p.u.] (actual) = 0.30
 FD - Fração de gases capturados e queimados = 0.50
 Fração de Metano no total dos gases gerados pelo aterro (contrato) [p.u.] = 0.50
 Fração de Metano no total dos gases gerados pelo aterro (projetado)[p.u.] = 0.50

=====

CALCULOS GERALES

Ano	População [Mil Habit]	Geração de Lixo [Ton]	Resíduos Contratados [Ton]	Resíduos Atuais [Ton]	LFG Projetado [Nm ³ /ano]
1	500	182500	182500	182500	7884000
2	575	209875	209875	209875	8889185
3	661	241356	241356	241356	10022528
4	760	277560	277560	277560	11300369
5	875	319194	319194	319194	12741131
6	1006	367073	367073	367073	14365585
7	1157	422134	422134	422134	16197151
8	1330	485454	485454	485454	18262237
9	1530	558272	558272	558272	20590615
10	1759	642012	642012	642012	23215854
11	2023	738314	738314	738314	26175802
12	2326	849061	849061	849061	29513134
13	2675	976421	976421	976421	33275966
14	3076	1122884	1122884	1122884	37518547
15	3538	1291316	1291316	1291316	42302043
16	4069	1485014	1485014	1485014	47695421
17	4679	1707766	1707766	1707766	53776437
18	5381	1963931	1963931	1963931	60632763
19	6188	2258520	2258520	2258520	68363249
20	7116	2597298	2597298	2597298	77079348
21	8183	2986893	2986893	2986893	86906723

 CALCULOS DAS EMISSOES

Ano	Biogás Projetado [Nm3/ano]	CH4 Projetado [Nm3/ano]	CH4 linhaBase [Nm3/ano]	Reduções de CH4 [Ton]	Reduções Equiv. CO2 [Ton/ano]	Energia total [MWh/ano]
1	3942000	1971000	3153600	1182600	16441	8374431
2	4444593	2222296	3555674	1333378	18537	9442144
3	5011264	2505632	4009011	1503379	20900	10645988
4	5650185	2825092	4520148	1695055	23565	12003318
5	6370565	3185283	5096452	1911170	26569	13533703
6	7182792	3591396	5746234	2154838	29957	15259207
7	8098576	4049288	6478861	2429573	33776	17204708
8	9131119	4565559	7304895	2739336	38082	19398254
9	10295307	5147654	8236246	3088592	42938	21871471
10	11607927	5803963	9286341	3482378	48412	24660014
11	13087901	6543950	10470321	3926370	54584	27804089
12	14756567	7378284	11805254	4426970	61544	31349022
13	16637983	8318991	13310386	4991395	69390	35345924
14	18759273	9379637	15007419	5627782	78237	39852418
15	21151022	10575511	16920817	6345306	88212	44933476
16	23847710	11923855	19078168	7154313	99459	50662352
17	26888218	13444109	21510575	8066465	112140	57121643
18	30316381	15158191	24253105	9094914	126438	64404472
19	34181625	17090812	27345300	10254487	142558	72615840
20	38539674	19269837	30831739	11561902	160734	81874131
21	43453361	21726681	34762689	13036008	181227	92312825

Emissões Evitadas Totais [Ton CO2e]= 1.473.698
 Energia Total Gerada [MWh]= 750.669.429

1 milhão de habitantes

 ---DESENHO DO ATERRO SANITÁRIO PARA REDUÇÃO DE EMISÕES DE CO2, DACORDO COM O MDL---

=====

CARACTERÍSTICAS INICIAIS

-----POPULAÇÃO-----

População [Milhares de Habitantes] = 1000
 Taxa de Crescimento Populacional por ano [p.u.] = 0.15
 Taxa de Geração de Lixo [kg/pessoa/dia] = 1.00

-----ATERRO-----

Lo - Geração de Metano pelo aterro @ 60% material orgânico [m3/Ton] = 180.00
 k - Índice de eterioração @ 60% material orgânico [Ton CH4/Ton Waste] = 0.12
 FC - Fator de conversão [Ton CH4/m3 STP CH4] = 0
 GWP - Global Warming Potential [Ton CO2e/Ton CH4] = 21
 Densidade do Metano STP [kg/m3] = 0.65

-----PROJETO-----

Tempo do projeto de Redução de Emissões [anos] = 21
 Eficiência da coleta de lixo [p.u.] (contrato) = 0.80
 Eficiência da coleta de lixo [p.u.] (actual) = 0.30
 FD - Fração de gases capturados e queimados = 0.50
 Fração de Metano no total dos gases gerados pelo aterro (contrato) [p.u.] = 0.50
 Fração de Metano no total dos gases gerados pelo aterro (projetado)[p.u.] = 0.50

=====

CALCULOS GERALES

Ano	População [Mil Habit]	Geração de Lixo [Ton]	Resíduos Contratados [Ton]	Resíduos Atuais [Ton]	LFG Projetado [Nm3/ano]
1	1000	365000	365000	365000	15768000
2	1150	419750	419750	419750	17778370
3	1323	482713	482713	482713	20045057
4	1521	555119	555119	555119	22600738
5	1749	638387	638387	638387	25482261
6	2011	734145	734145	734145	28731169
7	2313	844267	844267	844267	32394303
8	2660	970907	970907	970907	36524474
9	3059	1116543	1116543	1116543	41181230
10	3518	1284025	1284025	1284025	46431707
11	4046	1476629	1476629	1476629	52351604
12	4652	1698123	1698123	1698123	59026268
13	5350	1952841	1952841	1952841	66551932
14	6153	2245767	2245767	2245767	75037093
15	7076	2582633	2582633	2582633	84604087
16	8137	2970027	2970027	2970027	95390841
17	9358	3415532	3415532	3415532	107552873
18	10761	3927861	3927861	3927861	121265526
19	12375	4517041	4517041	4517041	136726499
20	14232	5194597	5194597	5194597	154158697
21	16367	5973786	5973786	5973786	173813445

=====						
CALCULOS DAS EMISSOES						
Ano	CH4 Projetado [Nm3/ano]	CH4 Baseline [Nm3/ano]	CH4 Flared [Nm3/ano]	Reduções de CH4 [Ton]	Reduções Equiv. CO2 [Ton]	Energia total [MWh]
1	7884000	3942000	6307200	2365200	32881	16748861
2	8889185	4444593	7111348	2666756	37073	18884288
3	10022528	5011264	8018023	3006758	41800	21291975
4	11300369	5650185	9040295	3390111	47129	24006635
5	12741131	6370565	10192904	3822339	53138	27067406
6	14365585	7182792	11492468	4309675	59913	30518415
7	16197151	8098576	12957721	4859145	67552	34409416
8	18262237	9131119	14609790	5478671	76164	38796509
9	20590615	10295307	16472492	6177184	85875	43742941
10	23215854	11607927	18572683	6964756	96824	49320029
11	26175802	13087901	20940641	7852741	109169	55608177
12	29513134	14756567	23610507	8853940	123087	62698045
13	33275966	16637983	26620773	9982790	138781	70691848
14	37518547	18759273	30014837	11255564	156475	79704836
15	42302043	21151022	33841635	12690613	176425	89866951
16	47695421	23847710	38156336	14308626	198919	101324705
17	53776437	26888218	43021149	16132931	224280	114243286
18	60632763	30316381	48506210	18189829	252875	128808945
19	68363249	34181625	54690599	20508975	285116	145231680
20	77079348	38539674	61663479	23123805	321467	163748262
21	86906723	43453361	69525378	26072017	362453	184625650

Emissões Evitadas Totais [Ton CO2e]= 2947397
Energia Total Gerada [MWh]= 1501338858