

Biogás de aterro sanitário: análise de duas medidas mitigadoras das mudanças climáticas sob a perspectiva do mecanismo de desenvolvimento limpo

Landfill biogas: analysis of two mitigation measures from the perspective of the clean development mechanism

• **Data de entrada:**
20/08/2013

• **Data de aprovação:**
20/05/2015

André de Freitas Gomes Linard | Marisete Dantas de Aquino

DOI 10.4322/dae.2015.002

Resumo

Este trabalho analisou comparativamente duas alternativas mitigadoras de Gases do Efeito Estufa (GEEs), decorrentes da emissão do biogás de aterro sanitário (geração de energia elétrica e combustão em *flares*), à luz do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Os resultados evidenciaram a viabilidade técnica e econômica de ambas as medidas redutoras de gases poluentes, destacando a opção de queima de gás metano, por exigir custos de investimento bem inferiores em relação à utilização de metano para geração de eletricidade, enquanto auferir significativa receita com a venda dos créditos de carbono. Os resultados obtidos estão compatíveis com os estudos realizados pelo Banco Mundial (2005) e por Vanzin (2006). As duas medidas redutoras de GEEs trariam contribuições como a redução de emissões de aproximadamente 9,3 milhões de toneladas de dióxido de carbono e diversificação da matriz energética nacional.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Biogás. Aterro sanitário. Mecanismo de Desenvolvimento Limpo.

Abstract

This study analyses comparatively two mitigation alternatives of Greenhouse Gases (GHGs), resulting from the landfill biogas emissions (power generation and combustion in flares), through the perspective of the Clean Development Mechanism (CDM). The results demonstrated a technical and economic feasibility of both reductive measures of greenhouse gases, emphasizing the option of methane gas combustion by requiring much lower investment costs than the use of methane for electricity generation, while it earns significant revenue from the sale of carbon credits. The results are consistent with studies from the World Bank (2005) and Vanzin (2006). The contributions of these two GHGs reductive measures would bring contributions as the reduction of emissions in approximately 9.3 million tons of carbon dioxide and diversification of the national energy matrix.

Keywords: Municipal solid waste. Biogas. Landfill. Clean development mechanism.

André de Freitas Gomes Linard

Engenheiro civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Saneamento Ambiental pela mesma universidade. Engenheiro da Caixa Econômica Federal.

Marisete Dantas de Aquino

Engenheira de pesca pela UFC. Doutora em Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela École des Hautes Études en Sciences Sociales, Paris, França. Professora associada do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da UFC.

Endereço para correspondência

Rua Austrália, 831, Itaperi, Fortaleza, CE. CEP: 60.714-130
E-mail: andrelinard@yahoo.com.br

1 INTRODUÇÃO

1.1 Os resíduos sólidos no Brasil e o biogás de aterro

O montante significativo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSUs) produzidos no país, principalmente nos grandes centros urbanos, constitui problemática comum para gestores públicos e para a sociedade. Com produção diária de cerca de 260 mil toneladas (IBGE, 2010), aliada à crescente escassez de áreas para a destinação apropriada, constata-se que grande porcentagem de toda essa quantidade de resíduos não está sendo tratada nem disposta corretamente.

O gerenciamento dos resíduos sólidos nas áreas urbanas baseou-se, historicamente, em coleta e afastamento. Ao longo do tempo, as administrações municipais ou locais equivalentes passaram a prestar o serviço de coleta e afastamento (PHILIPPI JR; AGUIAR, 2005). Nas regiões metropolitanas, existe a tendência de esgotarem-se mais rapidamente os espaços destinados a aterros sanitários. Consequentemente, pode haver elevação dos custos de disposição final, seja pelo aumento das distâncias de transporte, seja pelos custos de novas áreas, seja pela introdução de outros processos tecnológicos, como a incineração (PHILIPPI JR; AGUIAR, 2005).

No Brasil, os RSUs apresentam a seguinte destinação final: 27,7% em aterros sanitários, 22,5% em aterros controlados e 50,8% em vazadouros a céu aberto (IBGE, 2010). Destaca-se que os aterros sanitários são a forma apropriada para disposição dos resíduos, pois atendem a normas técnicas de engenharia e a legislações que visam à redução dos impactos ao meio ambiente.

Em lixões, aterros controlados e sanitários, os resíduos sólidos, em virtude de processos de decomposição da sua parcela orgânica, lançam na atmosfera o biogás. Este, de acordo com Oliveira (2000), apresenta composição molar de 40-55% de metano, 35-50% de dióxido de carbono e 0-20% de nitrogênio. O biogás de aterro possui

poder calorífico (mormente em razão do metano) de 14,9 a 20,5 MJ/m³ ou cerca de 5.800 kcal/m³.

1.2 As mudanças climáticas

Os gases componentes do biogás gerado a partir da degradação dos RSUs possuem a propriedade de reter parte da radiação solar (infravermelha) refletida pela Terra, impedindo-a de dispersar-se em direção ao espaço e formando, assim, uma espécie de estufa, sendo classificados como Gases de Efeito Estufa (GEEs).

A influência humana nas mudanças pelas quais atravessa o clima é clara. As emissões de GEEs antropogênicas aumentaram sobremaneira desde a era pré-industrial, resultantes do desenvolvimento econômico e do crescimento populacional, e estão no nível mais elevado desde então. Isso ocasionou o lançamento na atmosfera de dióxido de carbono, metano e óxido nitroso em montantes sem precedentes nos últimos 800 mil anos (IPCC, 2014).

As graves mudanças climáticas advindas dessa fenomenologia (efeito estufa), que se traduzem em elevação global da temperatura do planeta, aumento do nível dos mares, derretimento das geleiras e perda da biodiversidade dos ecossistemas, trouxeram luz para o tema e motivaram a adoção de ações efetivas da comunidade internacional. A reunião de esforços convergiu para a assinatura de um tratado multilateral, denominado Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC). Esta, ante a constatação de que as anomalias por que passa o meio ambiente revestiam-se de grande importância, definiu as responsabilidades a ser levadas a cabo pelos países desenvolvidos e pelos países em desenvolvimento.

Os países signatários da CQNUMC, mediante processos de reuniões nas quais se debatiam critérios, diretrizes e propostas a respeito da temática clima, fizeram emergir um instrumento formal de âmbito internacional, conhecido como Protoco-

lo de Quioto. Este estabeleceu que as nações industrializadas deveriam reduzir suas emissões de GEEs em pelo menos 5%, objetivando retornar aos níveis observados no ano de 1990 e subvertendo um processo de elevação nas emissões originadas dessas pátrias datado de aproximadamente 150 anos (MCT, 1998).

O Protocolo de Quioto imputou metas quantificadas de redução dos índices de GEEs na atmosfera somente para os países desenvolvidos signatários. Para tanto, com o intuito de obter êxito na minoração do lançamento desses gases poluentes e tendo ciência também dos obstáculos a ser enfrentados pelos países desenvolvidos, previu um instrumento de flexibilização, denominado Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). O MDL resolveu que nações desenvolvidas e com dificuldades de implementar medidas internas de minoração da emissão de GEEs poderiam investir em projetos de igual teor em países em desenvolvimento ou adquirir destes as respectivas Reduções Certificadas de Emissão (RCEs) ou créditos de carbono. As RCEs correspondem a uma tonelada de dióxido de carbono e constituem títulos que podem ser transacionados em bolsas de valores, leilões e entre países no mercado de carbono.

Citam-se como medidas redutoras de GEEs em aterros sanitários o aproveitamento para geração de energia elétrica a partir do biogás e a combustão desse gás em dutos especiais (*flares*).

1.3 O mercado de carbono

O mercado de carbono consiste em um ambiente de troca, regulado pelo MDL, o qual permite que países com elevadas emissões de carbono comprem o “excedente” das cotas de nações que produzem menos dióxido de carbono (BRASIL, 2012). No Brasil, a comercialização dos créditos de carbono é feita por meio de leilões, promovidos pela BM&FBOVESPA, a pedido de entidades públicas ou privadas. O regimento de cada leilão é divulgado em anúncios públicos e editais (BRASIL, 2012).

Os Estados Unidos possuem algumas instituições que realizam negociações de compra e venda de RCEs, entre elas, a Chicago Climate Exchange (CCX) – em português, Bolsa do Clima de Chicago –, Regional Greenhouse Gas Initiative (RGGI) – em português, Iniciativa Regional de Gases do Efeito Estufa – e a Western Climate Initiative (WCI) – em português, Iniciativa Climática do Oeste. No mercado da União Europeia, a estrutura compreende 31 países do continente, cobrindo 45% das emissões de GEEs da Europa (BRASIL, 2012).

1.4 A geração de eletricidade a partir do biogás de aterro e a matriz energética nacional

O biogás é um gás úmido, com concentrações variáveis que devem ser consideradas no projeto de um sistema de aproveitamento desse gás. A alta umidade pode causar problemas na coleta do biogás por meio das tubulações. Alguns dos gases componentes do biogás, em combinação com a umidade, podem provocar corrosão dos equipamentos. Dependendo da aplicação, o biogás bruto pode requerer algum tipo de processamento (BANCO MUNDIAL, 2004).

A seguir, apresenta-se a classificação do biogás em três categorias, conforme o nível de pré-tratamento/processamento requerido, e citam-se as respectivas aplicações energéticas (BANCO MUNDIAL, 2004):

- combustível de baixo grau: requer processamento mínimo, envolvendo câmara de remoção de condensado com parte do sistema de coleta de biogás, a fim de reduzir a quantidade de umidade no fluxo de gás. Pode ser utilizado como combustível para caldeira, a fim de produzir vapor para aquecimento ou geração de eletricidade por meio de turbinas;
- combustível de médio grau: dispositivos adicionais de tratamento são empregados para extrair mais umidade (com contaminantes) e partículas finas. O processo compreende compressão e refrigeração do biogás e/ou tratamento químico ou físico para remoção

de umidade e de gases, como mercaptanos, compostos de enxofre, siloxanos e compostos orgânicos voláteis. Pode ser utilizado em caldeiras industriais, secadores ou fornos a gás (aquecimento) e motores recíprocos de combustão interna ou turbinas a gás (eletricidade);

- combustível de alto grau: envolve extensivo pré-tratamento para separar do metano dióxido de carbono e outros gases constituintes principais e para remover impurezas, incluindo mercaptanos, compostos de enxofre, sulfureto

de hidrogênio e compostos orgânicos voláteis. Abrange ainda compressão para desidratação do gás. Pode ser utilizado em células de combustível, para geração de eletricidade, em veículos automotores e em gasodutos, em substituição ao gás natural.

Classificam-se como aterros energéticos aqueles que realizam a conversão energética do biogás. O Quadro 1 reúne aterros no Brasil que possuem projeto de aproveitamento do biogás.

Quadro 1 – Aterros energéticos no Brasil.

Estado	Aterro	Potência elétrica estimada (MW)
Amazonas	Manaus	2,00
Pará	Aurá	5,98
Paraíba	Probiogás	4,18
Bahia	Canabrava	4,25
	Veja Bahia	16,43
Espírito Santo	CTRVV	1,61
	Marca	17,76
Rio de Janeiro	Gramacho	Acima de 40,00
	Nova Gerar	6,35
São Paulo	Alto Tietê	2,00
	Anaconda	2,30
	Bandeirantes	25,40
	Caieiras	14,56
	Embralixo/Araúna	1,32
	Estre/Santos	4,66
	Estre/Itapevi	2,12
	Lara/Mauá	20,45
	Onyx Sasa	1,78
	Paulínia	4,21
	Pedreira	2,14
	Quitaúna	2,25
	São João	20,95
	Tecipar – Progat	2,00
Urbam – Arauna	2,32	
Santa Catarina	Florianópolis/Biguaçu	2,60
	Icara/Santec	2,99
Rio Grande do Sul	Sil	6,58

Fonte: CETESB; SMA-SP (2010).

A estrutura energética brasileira apresenta esta diagramação (por fonte): hídrica (76,9%), gás natural (7,9%), biomassa (6,8%), derivados de petróleo (3,3%), nuclear (2,7%), carvão (1,6%) e eólica (0,9%) (EPE, 2013). O biogás, em cuja composição há metano, gás com características combustíveis, pode ser aproveitado para finalidade energética, contribuindo para o fortalecimento da matriz energética nacional e reduzindo a dependência do país relativamente ao modal hidráulico.

O Brasil é uma nação que se destaca por sua diversidade de fontes a partir das quais se pode gerar energia elétrica, como hidráulica, térmica, eólica, solar e biomassa, possibilitando ao país blindar-se contra eventuais deficiências de componentes do espectro da matriz energética (aumentando o grau de confiabilidade do sistema), além de fortalecer a oferta interna de energia para demandas e usos futuros.

1.5 Objetivo

Este trabalho propõe-se a realizar uma avaliação econômica entre duas medidas mitigadoras de GEEs em aterros sanitários: geração de energia elétrica a partir do biogás e combustão deste em *flares*, considerando-as enquadradas como atividades de MDL.

2 METODOLOGIA

2.1 Estudo de caso: Aterro Sanitário Metropolitano Oeste em Caucaia (ASMOC)

O ASMOC localiza-se na rodovia BR 020, no município de Caucaia/CE, e recebe resíduos dessa cidade e de Fortaleza/CE. A natureza dos RSUs dispostos é doméstica, industrial (classe II) e pública (varrição, poda de árvores). Apresenta área total de 123 hectares, dos quais 78 hectares destinam-se ao recebimento dos RSUs. A taxa de deposição de lixo no aterro é de aproximadamente 3.600 toneladas.dia⁻¹.

A Tabela 1 traz o histórico de RSU que deu entrada no ASMOC, desde a abertura (1992) até o fe-

chamento (consideração de fechamento da atual área de disposição de resíduos em 2010).

O aumento notório da quantidade de RSUs disposta no aterro observado a partir do ano de 1998 deve-se ao fato de que, até 1997, o ASMOC recebia somente os resíduos do município de Caucaia/CE e, nos anos posteriores, passou a ser também a destinação final dos RSUs da cidade de Fortaleza/CE.

Tabela 1 – Fluxo de RSUs depositados no ASMOC.

Ano	Resíduos sólidos (tonelada/ano)
1992	40.000
1993	40.000
1994	40.000
1995	40.000
1996	40.000
1997	40.000
1998	1.065.169
1999	1.012.934
2000	1.113.743
2001	1.055.160
2002	1.004.630
2003	864.737
2004	730.067
2005	944.083
2006	1.062.288
2007	1.188.843
2008	1.186.655
2009	1.436.782
2010	1.739.632

Fonte: ACFOR; EMLURB; ECOFOR (2010).

2.2 Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica (EVTE)

2.2.1 Análise técnica do uso de biogás do ASMOC

- Estimativa da geração de biogás e da potência disponível no ASMOC

A avaliação da viabilidade técnica da utilização do biogás, obtido a partir da decomposição anaeróbia dos RSUs dispostos no aterro, foi realizada por meio do uso do programa Biogás – Geração e Uso Ener-

gético (Aterros-Versão 1.0). O programa, parte do convênio entre a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (Cetesb), a Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA-SP) e o Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT), realiza, entre outras análises, estimativas de geração de biogás, baseando-se no histórico dos resíduos sólidos lá depositados, e também da potência disponível mediante a conversão energética do biogás existente.

Adotaram-se para as variáveis seguintes, necessárias às inferências do *software*, estes valores médios: constante de decaimento ($k = 0,08$) e potencial de geração de metano ($L_0 = 0,12 \text{ m}^3 \text{ CH}_4$ biogás/kg RSU). Considerou-se a eficiência do sistema de coleta de biogás em 75%.

b) Escolha da tecnologia de geração de eletricidade

A produção de energia elétrica dá-se pela utilização de motores recíprocos de combustão interna associados a conjuntos de geradores. Os motores possuem comparativamente menor custo por quilowatt e maior eficiência que a maioria das turbinas a gás e oferecem, ainda, como vantagem a flexibilidade para futuras expansões ou reduções do sistema, levando em consideração as incertezas quanto a produções futuras de biogás. Os custos dos grupos geradores compõem 40% a 60% dos custos totais do investimento no projeto de geração de energia a partir do biogás (BANCO MUNDIAL, 2004).

Assim, admite-se que cerca de 50% dos custos totais dizem respeito à infraestrutura de coleta e captação de biogás e os outros 50% referem-se ao sistema de geração de energia elétrica.

2.2.2 Análise econômica

Procedeu-se à análise do conjunto de investimentos para a consecução das duas medidas mitigadoras de GEEs, compreendendo os custos para a construção de uma usina de geração de energia elétrica (na alternativa do uso de biogás para fins energéticos), para a implantação da infraestrutura

para extração e coleta de biogás, bem como dos métodos de financiamento do fluxo de caixa (envolvendo o balanço entre receitas e despesas), e, por fim, para a avaliação econômica e financeira.

Considerou-se financiamento integral por meio do Banco Mundial, procedendo à metodologia do Sistema de Amortização Constante (SAC) para o reembolso do investimento. Para o EVTE, a avaliação foi realizada tendo como base os parâmetros Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR)¹. Empregou-se, para a obtenção do valor presente das entradas e saídas, como também para estabelecer relação de comparação com a TIR, a Taxa Mínima de Atratividade (TMA) como taxa de desconto (trazer ao valor presente) (CASAROTTO FILHO; KOPITKE, 2010).

Tendo como base os estudos conduzidos pelo Banco Mundial (2005) sobre a viabilidade do aproveitamento energético do biogás dos aterros de Muribeca (Pernambuco) e Gramacho (Rio de Janeiro), adotaram-se a TMA de 8% e o horizonte para pagamento de 15 anos (período compreendido entre 2010 e 2025).

A viabilidade das medidas, então, foi avaliada em consonância com o esquema apresentado a seguir.

Para o VPL:

- maior que zero: indicação positiva da atratividade para investimento do projeto;
- igual a zero: demonstração da indiferença em relação ao investimento no projeto (investir ou não conduz ao mesmo resultado);
- menor que zero: denotação do caráter desfavorável do investimento no projeto.

¹ O VPL consiste em calcular o valor presente das diversas parcelas do fluxo de caixa para somá-lo ao valor do investimento inicial de cada alternativa a certa taxa de desconto; já a TIR corresponde à taxa necessária para zerar o valor presente dos fluxos de caixa das alternativas (CASAROTTO FILHO; KOPITKE, 2010).

Para a TIR:

- maior que a TMA: representação do grau positivo da atratividade para investimento do projeto;
 - igual à TMA: grau de indiferença no que tange ao investimento no projeto;
 - menor que a TMA: indicativo da não receptibilidade para investimento no projeto.
- a) Procedimento para o cálculo do investimento total do sistema de extração e coleta do biogás e da implantação da usina de energia elétrica do ASMOC

Utilizou-se, para o cálculo do custo total do investimento no sistema de coleta de biogás e na construção de uma usina de geração de energia elétrica, a metodologia elaborada por Vanzin (2006), a qual se baseia em estudos realizados pelo Banco Mundial de viabilidade de recuperação e aproveitamento energético de biogás dos aterros: Muribeca (Pernambuco), Gramacho (Rio de Janeiro), Montevideu (Uruguai), Queretaro (México), Chihuahua (México), Huyacoloro (Peru), El Combeima (Colômbia), La Esmeralda (Colômbia) e El Carrasco (Colômbia).

Vanzin (2006) reuniu, em um banco de dados, os valores de custos atinentes à geração de eletricidade, à infraestrutura de captação do biogás e à capacidade de disposição de resíduos sólidos dos aterros supracitados, obtendo como resultado a Equação 1:

$$\text{Investimento (milhões US\$)} = 0,08032049 + 0,9616 \times (\text{potência MW})$$

(Equação 1)

Essa expressão exprime o valor do investimento total do sistema de coleta do biogás e da implantação da usina de geração de eletricidade, relacionando-o ao valor da potência da usina de energia.

- b) Considerações acerca da estimativa dos custos do sistema de coleta de biogás, da usina de geração de eletricidade e dos valores dos parâmetros quilowatt de energia elétrica e créditos de carbono

Os custos atinentes à implantação do sistema de coleta de gás e da usina de energia adotados basearam-se nos estudos do Banco Mundial (2005) sobre a viabilidade do aproveitamento energético do biogás dos aterros de Muribeca (Pernambuco) e Gramacho (Rio de Janeiro). Os valores foram convertidos para moeda nacional e atualizados pela inflação acumulada do período (até 2010, ano de fechamento do aterro).

Os estudos de viabilidade trabalham com projeções futuras, mas consideram que todos os valores são computados a preços constantes e estão referidos a uma mesma data-base. Assume-se, portanto, que a inflação de preços não afetará os resultados do estudo em longo prazo (DOS ANJOS JR, 2011).

Adotaram-se, para o preço do quilowatt de energia, os valores resultantes do segundo leilão de fontes alternativas.

Para as RCEs, os preços assumidos foram extraídos de cotações em bolsas de valores e leilões que comercializam os créditos de carbono.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Alternativa 1: utilização do biogás para geração de eletricidade

3.1.1 Geração de biogás no ASMOC

Estimou-se a quantidade de gás metano produzida no ASMOC desde o período de sua abertura (1992) até o seu fechamento (2010), conforme ilustra a Figura 1.

Destaca-se que o pico máximo de produção de metano ocorre na data de fechamento do aterro, ano no qual encerrou suas operações de recebimento de resíduos sólidos, e apresenta decréscimo exponencial ao longo dos anos que se seguiram. A curva em azul representa o montante de metano advindo da decomposição dos RSUs lá dispostos e a correspondente em vermelho, a quantidade que efetivamente é coletada (a uma taxa de 75%).

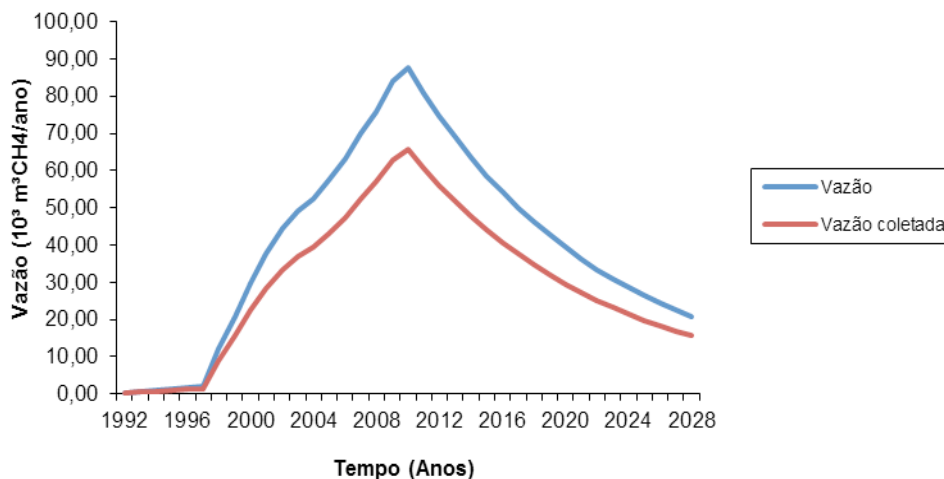


Figura 1 – Curva de geração de gás metano no ASMOC.

3.1.2 Potência disponível no ASMOC

Avaliou-se a potência disponível no aterro mediante a conversão energética da vazão de metano coletada, como pode ser analisado na Figura 2.

Ressalta-se o fato de que a curva possui simetria e proporcionalidade com a respectiva curva de vazão de metano, apresentando idêntico comportamento (pico máximo de potência no ano de fechamento do aterro, decaindo exponencialmente ao longo dos anos subsequentes).

Optou-se pela instalação de uma planta de geração de energia elétrica cuja potência é de 16,5 MW (16.500 kW), possibilitando o uso da usina a plena carga durante o intervalo de 2010 a 2025.

3.1.3 Investimento na infraestrutura de captação e coleta de biogás e de construção da usina de geração de energia elétrica

Dada a potência da usina de energia elétrica, considerando que os custos totais dividem-se aproximadamente em 50% para o sistema de extração de biogás e 50% para a geração de eletricidade, calculou-se o valor do aporte financeiro necessário para a consecução da medida de geração de energia a partir do biogás do ASMOC (Tabela 2).

O valor total do investimento perfaz R\$ 103,26 milhões, dos quais R\$ 51,63 milhões correspondem ao sistema de captação e coleta de biogás e R\$ 51,63 milhões, à construção da usina de energia elétrica.

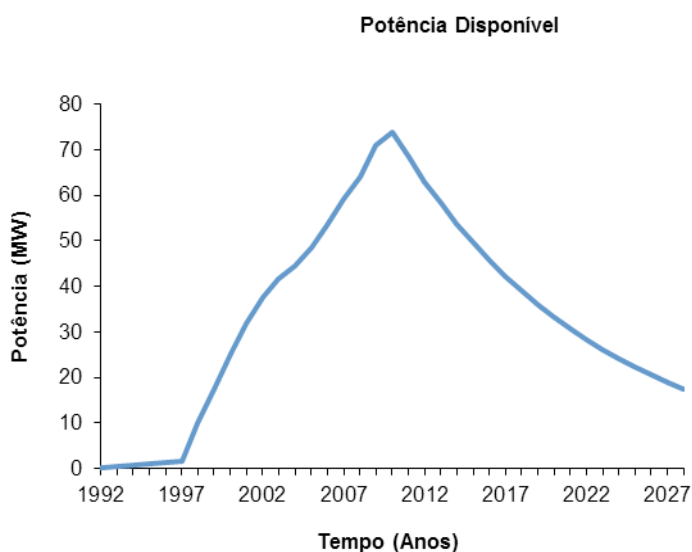


Figura 2 – Curva da potência disponível no ASMOC.

Tabela 2 – SAC do aproveitamento energético dos RSUs do ASMOC.

Período	Saldo devedor	Prestação	Amortização	Juros
0	103.256.371,97			
1	96.372.613,83	15.144.267,89	6.883.758,13	8.260.509,76
2	89.488.855,70	14.593.567,24	6.883.758,13	7.709.809,11
3	82.605.097,57	14.042.866,59	6.883.758,13	7.159.108,46
4	75.721.339,44	13.492.165,94	6.883.758,13	6.608.407,81
5	68.837.581,31	12.941.465,29	6.883.758,13	6.057.707,16
6	61.953.823,18	12.390.764,64	6.883.758,13	5.507.006,50
7	55.070.065,05	11.840.063,99	6.883.758,13	4.956.305,85
8	48.186.306,92	11.289.363,33	6.883.758,13	4.405.605,20
9	41.302.548,79	10.738.662,68	6.883.758,13	3.854.904,55
10	34.418.790,66	10.187.962,03	6.883.758,13	3.304.203,90
11	27.535.032,52	9.637.261,38	6.883.758,13	2.753.503,25
12	20.651.274,39	9.086.560,73	6.883.758,13	2.202.802,60
13	13.767.516,26	8.535.860,08	6.883.758,13	1.652.101,95
14	6.883.758,13	7.985.159,43	6.883.758,13	1.101.401,30
15	0	7.434.458,78	6.883.758,13	550.700,65

3.2 Alternativa 2: combustão do biogás

3.2.1 Investimento na infraestrutura de captação e coleta de biogás

Os custos envolvidos na medida de queima do biogás compreendem a implantação do sistema de extração e coleta, correspondendo a 50% do investimento total necessário à instalação de uma planta energética no ASMOC, isto é, R\$ 51,63 milhões (Tabela 3).

3.3 Critérios para enquadramento de projeto como atividade de MDL

Um projeto, para ser elegível como atividade de MDL, deve atender a alguns critérios, quais sejam: linha de base, adicionalidade e viabilidade econômica condicionada aos recursos dos créditos de carbono. Assim, as medidas de mitigação de GEEs dos RSUs do ASMOC apresentaram para as condicionantes supramencionadas os seguintes resultados:

a) linha de base: corresponde ao cenário que reúne as emissões de GEEs que ocorreriam anteriormente à implantação do projeto. No ASMOC, ocorre a emissão parcial de biogás para a atmosfera, sendo uma fração dele queimada com certa periodicidade em drenos;

b) adicionalidade: refere-se ao fato de o empreendimento proposto ser efetivo na tarefa de redução de gases poluentes. As medidas de mitigação de GEEs dos RSUs do ASMOC registrariam, no período de 2010 a 2025, reduções de emissão na atmosfera de 442 mil metros cúbicos de metano, correspondendo a 9,3 milhões de toneladas de dióxido de carbono;

c) viabilidade econômica vinculada à obtenção de receita dos créditos de carbono: certifica que o empreendimento seria levado a efeito tão somente após a contabilização dos recursos extras das

Tabela 3 – SAC da combustão do biogás do ASMOC.

Período	Saldo devedor	Prestação	Amortização	Juros
0	51.628.185,98			
1	48.186.306,92	7.572.133,94	3.441.879,07	4.130.254,88
2	44.744.427,85	7.296.783,62	3.441.879,07	3.854.904,55
3	41.302.548,79	7.021.433,29	3.441.879,07	3.579.554,23
4	37.860.669,72	6.746.082,97	3.441.879,07	3.304.203,90
5	34.418.790,66	6.470.732,64	3.441.879,07	3.028.853,58
6	30.976.911,59	6.195.382,32	3.441.879,07	2.753.503,25
7	27.535.032,52	5.920.031,99	3.441.879,07	2.478.152,93
8	24.093.153,46	5.644.681,67	3.441.879,07	2.202.802,60
9	20.651.274,39	5.369.331,34	3.441.879,07	1.927.452,28
10	17.209.395,33	5.093.981,02	3.441.879,07	1.652.101,95
11	13.767.516,26	4.818.630,69	3.441.879,07	1.376.751,63
12	10.325.637,20	4.543.280,37	3.441.879,07	1.101.401,30
13	6.883.758,13	4.267.930,04	3.441.879,07	826.050,98
14	3.441.879,07	3.992.579,72	3.441.879,07	550.700,65
15	0	3.717.229,39	3.441.879,07	275.350,33

RCEs. Simularam-se cenários para as duas medidas mitigadoras, considerando nos três primeiros, no caso do emprego do biogás para gerar eletricidade (Tabela 4), apenas a receita da venda da energia elétrica produzida e, nos demais, a venda consorciada da energia com as RCEs.

Nos três primeiros cenários ensaiados, a análise do investimento concluiu pela inviabilidade econômica, ou seja, a não atratividade da atividade à TMA de 8% ao ano (todos apresentaram VPLs negativos e TIRs inferiores à TMA). Por outro lado, os demais cenários, cujas receitas provinham tanto da venda da energia elétrica quanto dos créditos de carbono, mostraram-se viáveis economicamente.

Para a alternativa de combustão do biogás, na Tabela 5, ensaiaram-se cenários considerando a receita obtida a partir da comercialização das RCEs.

Da simulação anterior, conclui-se pela atratividade econômica do empreendimento em todos os cenários testados.

Tabela 5 – Avaliação econômica da combustão do biogás do ASMOC.

Cenário	Valor das RCEs	TIR	VPL
I	R\$ 28,06	14,68%	R\$ 15.187.485,41
II	R\$ 29,09	16,65%	R\$ 19.899.082,50
III	R\$ 30,89	20,02%	R\$ 28.098.614,69

4 CONCLUSÕES

Realizou-se análise econômica comparativa entre duas medidas mitigadoras de GEEs (conversão do biogás para geração de eletricidade e queima em *flares*) oriundos dos resíduos do ASMOC sob a perspectiva do MDL.

A geração de eletricidade a partir do biogás mostrou-se inviável nos cenários que consideravam a receita somente da venda da energia elétrica. Nas demais simulações, que incluíam também os créditos de carbono, considerou-se a atividade viável, variando, respectivamente, os valores de VPL e TIR de R\$ 2.447.379,32 e 8,41% (cenário IV – valores

Tabela 4 – Avaliação econômica do aproveitamento energético dos RSUs do ASMOC.

Cenário	Valor do kWh	Valor das RCEs	TIR	VPL
I	R\$ 0,10	-	-12,46%	(R\$ 120.440.861,92)
II	R\$ 0,13	-	-6,35%	(R\$ 95.217.945,04)
III	R\$ 0,15	-	-1,70%	(R\$ 69.969.084,93)
IV	R\$ 0,10	R\$ 28,06	8,41%	R\$ 2.447.379,32
V	R\$ 0,13	R\$ 28,06	12,57%	R\$ 29.254.147,05
VI	R\$ 0,15	R\$ 28,06	16,29%	R\$ 56.069.217,55
VII	R\$ 0,10	R\$ 29,09	9,21%	R\$ 7.202.148,14
VIII	R\$ 0,13	R\$ 29,09	13,32%	R\$ 34.017.218,64
IX	R\$ 0,15	R\$ 29,09	17,02%	R\$ 60.832.289,15
X	R\$ 0,10	R\$ 30,89	10,59%	R\$ 15.471.702,09
XI	R\$ 0,13	R\$ 30,89	14,63%	R\$ 42.286.772,59
XII	R\$ 0,15	R\$ 30,89	18,30%	R\$ 69.101.843,09

pessimistas para venda da energia e das RCEs) a R\$ 69.101.843,09 e 18,30% (cenário XII – valores otimistas para venda da energia e das RCEs).

A combustão do biogás, por sua vez, apresentou VPL e TIR variando, respectivamente, de R\$ 15.187.485,41 e 14,68% (cenário I – valor pessimista para a venda das RCEs) a R\$ 28.098.614,69 e 20,02% (cenário III – valor otimista para a venda das RCEs), sendo viável em todos os cenários ensaiados.

Entre as medidas, destaca-se a opção de queima de gás metano por exigir custos de investimento bem inferiores em relação à utilização de metano para geração de eletricidade, enquanto auferir significativa receita com a venda dos créditos de carbono. Os resultados anteriores estão compatíveis com os estudos do Banco Mundial (2005) e de Vanzin (2006).

As duas medidas de mitigação trariam reflexos positivos, como a redução significativa de emissão de GEEs (aproximadamente 9,3 milhões de toneladas de dióxido de carbono), no período entre 2010 e 2025, e o fortalecimento da diversificação da matriz energética nacional, por meio da utilização de fontes alternativas (biogás de aterro) para geração de eletricidade.

REFERÊNCIAS

AUTARQUIA DE REGULAÇÃO, FISCALIZAÇÃO E CONTROLE DOS SERVIÇOS PÚBLICOS DE SANEAMENTO AMBIENTAL (ACFOR); EMPRESA MUNICIPAL DE LIMPEZA E URBANIZAÇÃO (EMLURB); ECOFOR. **Resíduos sólidos dispostos no ASMOC de 1998 a junho de 2009**. Disponível em: < http://www.fortaleza.ce.gov.br/acfor/residuos-dispostos-no-asmoc-de-1998-junho-de-2009?option=com_content&task=view&id=106&Itemid=68>. Acesso em 10 junho 2013.

BANCO MUNDIAL. **Estudo de pré-viabilidade para recuperação de biogás no aterro de Muribeca, Pernambuco, Brasil**. 2005. 88 p.

BANCO MUNDIAL. **Estudo de pré-viabilidade para recuperação de biogás e produção de energia no aterro de Gramacho, Rio de Janeiro, Brasil**. 2005. 108 p.

BANCO MUNDIAL. **The World Bank handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and the Caribbean**. Waterloo, Ontario, 2004. 236 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Protocolo de Quioto**, 1998. 29 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT); SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO (SMA-SP); COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Biogás – geração e uso energético (aterros - versão 1.0)**: Manual do usuário do programa de computador. São Paulo, 2006.

BRASIL. PORTAL BRASIL. **Entenda como funciona o mercado de carbono**. 2012. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/meio-ambiente/2012/04/entenda-como-funciona-o-mercado-de-credito-de-carbono>>. Acesso em: 11 fevereiro 2013.

CASAROTTO FILHO, N.; KOPITKE, B. **Análise de investimento: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

COTAÇÃO créditos de carbono. Disponível em: <<http://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>>. Acesso em 31 março 2013.

DOS ANJOS JR., A. Gestão econômica e financeira de projetos. In: DOS ANJOS JR., A. (Org.). **Gestão estratégica do saneamento**. Barueri, São Paulo: Manole, 2011. cap. 2. p 13-31.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional**, 2013. 284 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa nacional de saneamento básico**, 2008. Rio de Janeiro, 2010. 219 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Fifth assessment report**. 2014.

LEILÕES de energia: base de dados. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/oquefazemos_menu_lateral/precos?_adf.ctrl-state=jptvq5zkv_105&_afLoop=1124241066235127>. Acesso em 15 janeiro 2013.

OLIVEIRA, L. B. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos e abatimento de gases do efeito estufa**. Rio de Janeiro, 2000. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

PHILIPPI JR, A.; AGUIAR, A. Resíduos sólidos: características e gerenciamento. In: PHILIPPI JR, A. (Org.). **Saneamento, saúde e ambiente: fundamentos para um desenvolvimento sustentável**. Barueri, São Paulo: Manole, 2005. cap. 8. p 267-321

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO (SMA-SP); COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Projetos de MDL em aterros no Brasil**. São Paulo, 2010. Disponível em <http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/mdl_brasil/portugues/projetos_aterros_brasil_10_br.htm>. Acesso em: 06 dez. 2010.

VANZIN, E. **Procedimento para análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no Aterro de Santa Tecla**. Rio Grande do Sul, 2006. Dissertação de mestrado, Universidade de Passo Fundo.