

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E DE CRÉDITOS DE CARBONO A PARTIR DA ESTIMATIVA DE EMISSÃO DE METANO EM ATERRO SANITÁRIO NO SUDOESTE DO PARANÁ

Henrique Cesar Almeida (UNILA) E-mail: henrique.almeida@unila.edu.br

Andrielle Rimoldi Mello (UTFPR) E-mail: andrielerimoldi@gmail.com

Renato Grassi (Flessak Eletro Industrial) E-mail: renato.grassi@hotmail.com

Denice Oliveira Almeida (Centro Universitário Dinâmica das Cataratas) E-mail: almeidadeni@yahoo.com.br

Resumo: O presente trabalho tem por objetivo estimar a geração de metano do Aterro Sanitário do município de Francisco Beltrão, PR e avaliar seu potencial de geração de energia elétrica e potencial de créditos de carbono. O levantamento de dados foi realizado no ano de 2013 em um aterro que possui 37.847 m² de área útil e que recebe 82,76% dos resíduos sólidos urbanos gerados no município. Para a mensuração da emissão de metano, foi utilizado o software Biogás, geração e uso energético – aterro 1.0, desenvolvido pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. A quantificação do metano e o cálculo de geração de energia elétrica indicaram a possibilidade do aproveitamento desta forma alternativa de energia no próprio aterro, sobrando ainda um excedente que pode ser comercializado ou utilizado para outras finalidades. Estima-se que no ano de maior emissão de metano (2030), os valores de potência elétrica e de energia disponíveis podem chegar a 1.655,33 kW e 4.350.207,24 kWh, respectivamente. No mercado de carbono, a quantidade de carbono equivalente pode gerar um rendimento de R\$ 355.376,74 em 2030. Neste sentido, o investimento econômico foi considerado viável, uma vez que será totalmente recuperado no ano de 2023, totalizando um período de recuperação de investimento de quatro anos.

Palavras-chave: Saneamento. Biogás. Energia. Viabilidade Econômica.

POTENTIAL FOR ELECTRICITY GENERATION AND CARBON CREDITS FROM METHANE EMISSION ESTIMATE IN LANDFILL OF PARANÁ SOUTHWEST

Abstract: This study aims to estimate the generation of methane from landfill in Francisco Beltrão, PR and evaluate its potential for electricity generation and carbon credit potential. Data collection was carried out in 2013 in a landfill which has 37,847 m² of floor area and receiving 82.76% of municipal solid waste generated in the city. For measuring methane emissions, we used the software Biogas generation and energy use - landfill 1.0, developed by the Environmental Sanitation Technology Company of the State of São Paulo. Methane quantification and electricity generation calculating indicated the possibility of the use of this energy alternative form in the landfill, still left a surplus that can be sold or used for other purposes. It is estimated that in the year largest methane emissions (2030), the electric power values and available energy can reach 1,655.33 kW and 4,350,207.24 kWh, respectively. The carbon market, the amount of carbon equivalent can generate an income of R\$ 355,376.74 in 2030. In this sense, economic investment was considered feasible; it will be fully recovered in the year 2023, totaling a recovery period investment four years.

Keywords: Sanitation. Biogas. Energy. Economic viability

1. INTRODUÇÃO

A rápida urbanização e o aumento do consumismo que tem ocorrido no Brasil nos últimos anos tem potencializado a geração de resíduos sólidos urbanos (RSU). Segundo o último levantamento, o montante de RSU produzidos no Brasil chegou a 78,6 milhões de toneladas, o que corresponde a 387,63 kg.hab⁻¹.ano⁻¹ (ABRELPE, 2014).

Esses dados mostram a necessidade de investimentos que impulsionem processos eficientes para o tratamento desses resíduos. Dentre os processos conhecidos para o tratamento e disposição final dos RSU, os aterramentos sanitários são os mais utilizados. Os aterros sanitários são considerados locais adequados para a disposição final dos RSU já que dispõem de impermeabilização do solo, cobertura dos resíduos, captação do chorume, captação e queima do biogás gerado, o que minimiza os impactos ambientais (BOSCOV, 2008; SILVA et al., 2013).

O biogás produzido nesses aterros é constituído em média por 50% de metano (CH_4) (TCHOBANOGLOUS et al., 1993). Estudos sobre o CH_4 mostram que este gás possui impacto vinte e uma vezes maior do que o dióxido de carbono (CO_2) sobre o potencial de efeito estufa, tendo relação direta com as mudanças climáticas (HINRICHS e KLEINBACH, 2014). Mais de 60% do total de suas emissões são provenientes de atividades humanas, dentre elas, a gestão de resíduos.

Geralmente em aterros sanitários é feito o emprego de queimadores de gás (flares), em que o CH_4 do biogás é convertido em CO_2 e água, o que diminui substancialmente o potencial de aquecimento global que o CH_4 provocaria. No entanto, a utilização do CH_4 gerado para a produção de energia elétrica se enquadra melhor aos mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL), que além de reduzir a emissão de gases do efeito estufa, engloba também processos de eficiência energética e negociações no mercado de carbono. No que se refere a este último, as atuais negociações no mercado voluntário de carbono estão na ordem dos 400 milhões de dólares (HAMRICK e GOLDSTEIN, 2015).

Referente a conversão do CH_4 em energia elétrica, esta pode ocorrer preferencialmente em motores de ciclo Otto, que são de combustão interna, e microturbinas a gás (ICLEI, 2009). Os motores de ciclo Otto apresentam maior rendimento elétrico e custo inferior em relação aos demais (CENBIO, 2005). Porém, este tipo de conversão requer investimentos e, para todo o investimento empregado, é necessário saber o tempo de retorno do mesmo e se o este é atrativo.

Neste sentido, o presente trabalho tem por objetivo estimar a geração de metano do Aterro Sanitário do município de Francisco Beltrão, PR e avaliar seu potencial de geração de energia elétrica e potencial de créditos de carbono.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Local e descrição da área de estudo

O estudo foi realizado no ano de 2013 no aterro sanitário do município de Francisco Beltrão, localizado na região sudoeste do estado do Paraná, sob as coordenadas UTM, longitude: 298620 m E e latitude: 7118300 m S.

De acordo com o censo oficial disponível em 2013 (IBGE, 2010), a população de Francisco Beltrão era de 78.957 habitantes. O clima da região está classificado como mesotérmico úmido, sem estação seca definida, com verões quentes e chegando a temperaturas acima de $22\text{ }^\circ\text{C}$ no mês mais quente. Já a precipitação média no município varia de 2.000 a 2.500 $\text{mm}\cdot\text{ano}^{-1}$ (IAPAR, 2013).

2.2 Descrição do Aterro e sistema de coleta de resíduos

O aterro sanitário de Francisco Beltrão, PR, recebe resíduos de caráter urbano e entrou em operação no ano 2001.

No início de sua operação, a disposição dos resíduos era efetuada na forma de aterro controlado (célula 1), sem impermeabilização do solo e mecanismos para coleta e tratamento do chorume gerado. Esta célula ocupava uma área de aproximadamente 21.590 m², sendo encerrada em 2009.

No mesmo ano, entrou em operação a primeira célula estruturada na forma de aterro sanitário (célula 2), com uma área de aproximadamente 9.280 m². Esta célula possuía impermeabilização com argila e geomembrana e os resíduos eram dispostos em camadas de dois metros de altura, compactados e cobertos com solo diariamente. De acordo com inspeção realizada no local, a mesma possuía 12 drenos de gases instalados. O chorume era coletado e encaminhado para tratamento, composto por caixa equalizadora, lagoa anaeróbia e lagoa aerada. A mesma foi encerrada em dezembro de 2012.

A célula onde atualmente são dispostos os resíduos iniciou sua operação em janeiro de 2013 e possui cerca de 15.000 m². Apresenta impermeabilização do solo, drenos de gases e tratamento do chorume. A mesma está na primeira camada de resíduos e contém atualmente 11 drenos de gases, sendo que este número vai aumentar, pois foram ocupados somente 12.200 m² do espaço disponível.

Após esta célula alcançar o mesmo nível da célula do aterro controlado, elevando-se em aproximadamente 8 m, será realizada a ampliação da célula atual. Para isso, será impermeabilizada toda a superfície da célula 1, fazendo com que a célula atual fique com uma área de 37.847 m². Desta forma, a célula existente na forma de aterro controlado, será totalmente sobreposta por esta nova célula, perfazendo um total de 38 drenos no aterro.

Para a quantificação do biogás produzido pelo aterro sanitário, foram levantadas as seguintes informações: número de habitantes e quantidade de RSU gerado no município; percentagem de RSU que vai para o aterro; produção per capita de resíduos; composição gravimétrica; número de drenos para gás e uso de energia elétrica mensal do aterro.

2.3 Metodologia de quantificação do biogás e geração de energia elétrica

Para o cálculo do fluxo de geração de RSU (R_x), do potencial de vazão de metano (Q_x) e da potência elétrica disponível (P_x) no aterro sanitário, foi utilizado o software Biogás, geração e uso energético – aterro 1.0 (CETESB, 2006). A utilização deste software, sua reprodução e distribuição são livres.

Para calcular R_x , Q_x e P_x o software se utiliza das equações 1, 2 e 3, respectivamente. Sendo:

$$R_x = \text{Pop}_x \cdot i \cdot T_{\text{RSU}} \cdot T_{\text{coleta}} \quad (1)$$

Onde:

R_x = fluxo de resíduos no ano x (t.ano⁻¹).

Pop_x = população urbana no ano x (hab.).

i = taxa de crescimento populacional no período considerado (%).

T_{RSU} = taxa de geração de resíduos (t.hab⁻¹.ano).

T_{coleta} = taxa de coleta (%)

RSU = resíduos sólidos urbanos.

A taxa de crescimento populacional foi calculada com base nos dados de população segundo dados do IBGE para os anos de 2010 e 2012. O valor de “i” utilizado foi de 1,12%.

$$\sum Q_x = k.L_0. \sum (R_x.e^{-k(x-T)}) \quad (2)$$

Onde:

Q_x = Vazão do metano ($m^3.ano^{-1}$).

k = Constante de decaimento (ano^{-1}).

L_0 = Potencial de geração de biogás ($m^3.kg^{-1}$).

R_x = Fluxo de resíduo ($t.ano^{-1}$).

x = Ano atual (ano).

T = Tempo de deposição do resíduo (ano).

A estimativa de vazão de metano foi considerada até o ano de 2050, ou seja, até 20 anos após a previsão do fechamento do aterro. Tal consideração levou em conta que mesmo não recebendo mais resíduos, o resíduo previamente depositado continua reagindo e liberando gás até certo período. Para isso, a emissão de metano foi extrapolada de cinco em cinco anos até 2050 utilizando a média dos resíduos depositados durante os anos de funcionamento do mesmo.

$$P_x = [(Q.Pci_{(CH_4)}/31.536.000).Ec]/1.000 \quad (3)$$

Onde:

P_x = Potência disponível por ano ($kW.ano^{-1}$).

Q = Vazão do CH_4 por ano ($m^3.ano^{-1}$).

$Pci_{(CH_4)}$ = Poder calorífico inferior do $CH_4 = 35,53.10^6 J.m^{-3}$.

31.536.000 = quantidade de segundos por ano ($s.ano^{-1}$).

Ec = Eficiência de coleta de gases (75%).

A energia disponível foi deduzida pela equação 4.

$$E = P_x.Rend.\Delta t \quad (4)$$

Onde:

E_x = Energia disponível por ano ($kWh.ano^{-1}$).

P_x = Potência disponível por ano ($kW.ano^{-1}$).

Δt = Tempo de operação durante um ano (h).

$Rend$ = Rendimento de motores operando a plena carga (%).

Para este cálculo, considerou-se que o motor irá operar $24 h.dia^{-1}$, ou seja, que o sistema vai funcionar de forma ininterrupta. Para a escolha da potência nominal do sistema motorizador utilizando um motor de ciclo Otto, adotou-se a seguinte equação 5 (adaptado de PECORA, 2006):

$$Pot_G = [(Q \times \%CH_4 \times Pci_{(CH_4)} \times \eta) / (31.536.000)]/1.000 \quad (5)$$

Onde:

Pot_G = potência gerada pelo motor (kW)

Q = vazão do CH_4 por segundo ($m^3.s^{-1}$).

$\%CH_4$ = percentual de metano no biogás (%).

$Pci_{(CH_4)}$ = Poder calorífico inferior do $CH_4 = 35,53.10^6 J.m^{-3}$.

η = eficiência do motor (%).

De acordo com o Atlas Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos (ABRELPE, 2013), a eficiência de motores a combustão interna utilizado para este fim varia de 25 a 35%. Optou-se por um valor médio de rendimento de 30%. Adotou-se também uma percentagem média de 50% de metano no biogás (TCHOBANOGLOUS et al., 1993).

2.4 Potencial de créditos de carbono

A metodologia sugerida para a quantificação da tonelada de carbono equivalente é expressa pela equação 6 (ICLEI, 2009):

$$\text{CO}_{2\text{Eq.}} = Q_{\text{CH}_4} \cdot d_{\text{CH}_4} \cdot \text{PAG} \quad (6)$$

Onde:

$\text{CO}_{2\text{Eq.}}$ = Quantidade de CO_2 equivalente (tonelada de CO_2).

Q_{CH_4} = Volume de metano (m^3).

d_{CH_4} = Densidade do metano ($0,7167 \cdot 10^{-3} \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$).

PAG = Potencial de aquecimento global (21 vezes maior que o CO_2).

Para obter o rendimento anual equivalente a venda de créditos de carbono, a quantidade anual de carbono equivalente é multiplicada pelo preço médio de venda do período, considerando que o $\text{CO}_{2\text{Eq.}}$ corresponde a 1 (um) crédito de carbono. Para isso, foi utilizado o valor médio do crédito de carbono negociado no final de 2013, US\$ 6,00, ou seja, cerca de R\$ 14,40, considerando o câmbio da época (R\$ 2,40) (INVESTING BRASIL, 2016).

2.5 Cálculos de payback descontado e valor presente líquido

O Payback Descontado demonstra o tempo necessário para o investimento se pagar e começar a dar lucro. Este cálculo leva em consideração o efeito de se trazer o fluxo de caixa a valor presente, descontado pela taxa mínima de atratividade.

Para calcular o fluxo de caixa, soma-se as receitas e subtrai as despesas, conforme a equação 7 (GITMAN e MADURA, 2003).

$$\text{FC} = \text{Receitas} - \text{Despesas} \quad (7)$$

Onde:

FC = Fluxo de caixa anual (R\$).

Receitas = Entrada de caixa (R\$).

Despesas = Saída de caixa (R\$).

O valor presente líquido (VPL) é utilizado para análise da atratividade do projeto de investimento. Os fluxos estimados podem ser positivos ou negativos, dependendo das entradas e saídas de caixa. Quando o VPL é negativo, o retorno do projeto será menor que o investimento inicial e, quando o VPL é positivo, o valor obtido no projeto pagará o investimento inicial (GITMAN e MADURA, 2003).

A equação 8 é utilizada para o cálculo do Payback Descontado e a equação 9, para o cálculo do VPL.

$$\text{Payback Descontado} = \text{FC} / (1 + K)^n \quad (8)$$

Onde:

FC = Fluxo de caixa em cada ano (R\$).

K = Taxa de desconto (%).

n = Número do fluxo de caixa (1 a cada ano).

$$VPL = [FC / (1 + K)^n] - I_0 \quad (9)$$

Onde:

VPL = Valor presente líquido (R\$).

FC = Fluxo de caixa em cada ano (R\$).

K = Taxa de desconto (%).

n = Número do fluxo de caixa (1 a cada ano).

I₀ = Investimento inicial (R\$).

A taxa de desconto adotada tanto para o Payback Descontado quanto para o VPL foi de aproximadamente 11% para o período de 2013.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Características do aterro

Os resultados da análise dos documentos, das visitas no local, juntamente com as informações repassadas pelo engenheiro ambiental responsável, são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 – Principais informações coletadas no Aterro Sanitário de Francisco Beltrão, PR.

Itens verificados	
Composição gravimétrica dos resíduos	Matéria orgânica: 61,81%
	Madeira: 0,57%
	Metais: 2,21%
	Papel/papelão: 8,46%
	Plástico: 12,88%
	Trapos: 4,03%
	Vidros: 3,07%
	Contaminante biológico: 6,77%
Contaminante químico: 0,20%	
Geração de resíduos sólidos	1.740.000 kg.mês ⁻¹
Resíduos depositados no aterro	1.440.000 kg.mês ⁻¹
Produção per capita de resíduos	0,735 kg.habitante ⁻¹ .dia ⁻¹
Número de habitantes no município	78.943 habitantes
Porcentagem de resíduos depositados no aterro	82,76%
Início da operação do aterro	2001
Início da operação da célula	Célula 1: 2001
	Célula 2: 2009
	Célula atual: 2013
Previsão de fechamento do aterro	2030
Área total do aterro	19,36 hectares
Área das células	Célula 1: 21.589 m ²
	Célula 2: 9.284 m ²
	Célula atual: 14.991 m ²

	Célula atual após ampliação: 37.847 m ²
Número de drenos de gás	Célula 1: 20 drenos Célula 2: 12 drenos Célula atual: 11 drenos Célula atual após ampliação: 38 drenos
Uso de energia elétrica mensal do aterro	3.500 kWh.mês ⁻¹
Distâncias	Bairro mais próximo: 2.350 m Indústria mais próxima: 2.475 m Rio mais próximo: 250 m

Conforme observado, a matéria orgânica representou ser a parcela mais significativa dos resíduos depositados no aterro, com 61,81%, seguida pelo plástico, com 12,88% e pelo papel, com 8,46% (Tabela 1). Além disso, percebeu-se que mesmo com o programa de coleta seletiva da prefeitura, os materiais recicláveis (metais, papel/papelão, plásticos e vidros) compreendem mais de 25% da composição gravimétrica do aterro.

Em 2013 eram dispostos diariamente no aterro 60.000 kg de resíduos sólidos urbanos (RSU), seis dias por semana, chegando a um total de 1.440.000 kg.mês⁻¹. Considerando ainda que a Associação de Catadores de Materiais Recicláveis coleta um montante de 300.000 kg.mês⁻¹, tem-se a produção total de 1.740.000 kg de RSU mensais. Deste total, 82,76% são depositados no aterro. A geração per capita no município chega a 0,735 kg.hab⁻¹.dia⁻¹, muito próximo da média da região sul do Brasil, com geração de 0,725 kg hab⁻¹.dia⁻¹ (ABRELPE, 2014).

Apesar de o aterro sanitário estar a uma distância de 250 m de um curso d'água (rio Marrecas) e 2.450 m do bairro mais próximo, o mesmo encontra-se a jusante do ponto de captação, não representando um risco direto.

3.2 Estimativa do metano gerado

Para a realização da estimativa das emissões de metano e do potencial de energia elétrica disponível, considerou-se a ampliação prevista da célula atual. Os dados fornecidos ao software estão apresentados no quadro 1.

Quadro 1 – Dados fornecidos ao software para estimativa do metano gerado e potência elétrica disponível.

Principais informações adicionadas	
Características do aterro	
Nome da unidade	Aterro sanitário de Francisco Beltrão
Endereço	Linha Menino Jesus
Cidade	Francisco Beltrão
Estado	Paraná
Distância do bairro mais próximo	2.350 m
Área do aterro	37.847 m ²
Número de drenos	38
Uso interno de energia elétrica	3.500 kWh.mês ⁻¹
Uso interno de gás natural	0 m ³ CH ₄ .mês ⁻¹
Uso externo de energia elétrica	0 kWh.mês ⁻¹
Uso externo de gás natural	0 m ³ CH ₄ .mês ⁻¹
Estimativa de geração de biogás no aterro – entrada de dados	
Constante de decaimento (k)	0,08 ano ⁻¹
Potencial de geração de biogás (L ₀)	0,12 m ³ CH ₄ .kg ⁻¹

Ano de abertura do aterro	2013
Ano de fechamento do aterro	2030
Taxa de geração de resíduos	0,27 t.hab ⁻¹ .ano ⁻¹
Taxa de coleta de resíduos	82,76 %

Estimativa de geração de biogás no aterro segundo software (CETESB, 2006)

Linha de base de queima	20 %
Emissão de GEE evitada pela economia de energia elétrica gerada por fontes não renováveis	0,2782 tCO ₂ .MWh _{evit} ⁻¹
Eficiência de coleta de biogás	75 %
Eficiência de queima de biogás	95 %

De acordo com os resultados apresentados (Quadro 1), o fluxo anual de resíduos (R_x) foi de 20.089 t.ano⁻¹ para uma taxa de crescimento populacional de 1,12%. Os valores sugeridos pelo software para a constante de decaimento (k) e o potencial de geração de metano do biogás (L_0) foram de 0,08 ano⁻¹ e 0,12 m³CH₄.kg.RSU⁻¹, respectivamente. O valor de L_0 foi estimado considerando os dados fornecidos do RSU. Para o valor de k levou-se em consideração a precipitação média anual da região, que é >1.000 mm, e a decomposição do RSU (WORLD BANK, 2003), que varia de moderada a alta.

Segundo o Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos (ABRELPE, 2013), os valores de L_0 e de k apresentados neste trabalho, se encontram dentro da faixa esperada, de 0,006 a 0,27 m³CH₄.kg.RSU⁻¹ e de 0,03 a 0,21 ano⁻¹, respectivamente. O valor de L_0 depende da fração do carbono orgânico degradável do RSU, já o valor de k está relacionado a fatores como temperatura, umidade, disponibilidade de nutrientes e pH do meio, sendo mais diretamente proporcional ao teor de umidade.

Conforme observado na Tabela 2, o crescimento populacional aumenta o fluxo de resíduos e conseqüentemente a geração de metano, de 2013 a 2030, anos em que o aterro sanitário estará recebendo resíduos. Como era de se esperar, estima-se que a menor taxa de geração acontece no primeiro ano, com 175.000 m³CH₄.ano⁻¹ e a maior no último ano, com 1.959.000 m³CH₄.ano⁻¹. Com o fechamento do aterro previsto para 2030, a geração do metano se dá somente pela decomposição dos resíduos já depositados no local, acontecendo assim um decréscimo na sua geração, com 389.000 m³.CH₄.ano⁻¹ na projeção para o ano de 2050.

Tabela 2 – Estimativa de população, fluxo de resíduos e emissão de metano no Aterro Sanitário de Francisco Beltrão, PR, entre os anos de 2013 a 2050.

Ano	População (habitantes)	R_x (toneladas) ¹	Q_x (m ³ CH ₄ ano ⁻¹) ²
2013	81.646	18.243,866	175.000
2014	82.560	18.448,197	339.000
2015	83.485	18.654,817	492.000
2016	84.420	18.863,751	635.000
2017	85.365	19.075,025	769.000
2018	86.321	19.288,665	895.000
2019	87.288	19.504,698	1.014.000
2020	88.266	19.723,151	1.125.000
2021	89.254	19.944,050	1.230.000
2022	90.254	20.167,423	1.329.000
2023	91.265	20.393,299	1.423.000
2024	92.287	20.621,704	1.511.000
2025	93.321	20.852,667	1.595.000
2026	94.366	21.086,217	1.675.000

2027	95.423	21.322,382	1.751.000
2028	96.491	21.561,193	1.823.000
2029	97.572	21.802,678	1.892.000
2030	98.665	22.046,868	1.959.000
2031	-	20.088,925*	1.808.000
2035	-	20.088,925*	1.313.000
2040	-	20.088,925*	880.000
2045	-	20.088,925*	590.000
2050	-	20.088,925*	389.000

* Média dos resíduos depositados durante os anos de funcionamento do aterro; ¹ Fluxo de resíduos; ² Emissão de metano.

A curva de geração de metano permite visualizar como é a tendência de produção deste gás em relação aos anos em que o aterro recebe resíduos e o decaimento com o encerramento da célula (Figura 1).

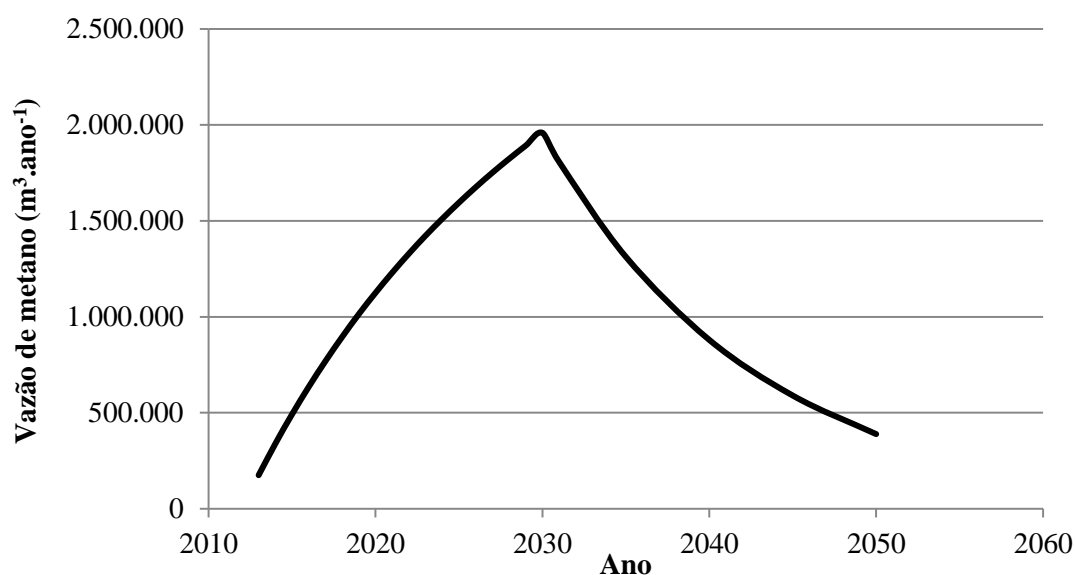


Figura 1– Curva estimativa da vazão de metano no Aterro Sanitário de Francisco Beltrão para os anos entre 2013 e 2050.

Considerando que a área útil do aterro sanitário de Francisco Beltrão é de 37.847 m², o maior pico de emissão previsto (2030) é de 51,79 m³CH₄.m⁻².ano⁻¹. Trabalhando com modelagem, Vanzin (2006) estimou um maior pico de emissão de 1.201,26 m³CH₄.m⁻².ano⁻¹ para o aterro sanitário de Santa Tecla, Gravataí, RS. Farzadkia et al. (2015), ao estudarem a estimativa de geração de metano para aterro sanitário em Shiraz no Irã, deduziram um maior pico de emissão de 285 m³CH₄.m⁻².ano⁻¹. Medições reais como, por exemplo, a do aterro sanitário de Caieiras na grande São Paulo, mostram valores de emissão na ordem de 107 m³CH₄.m⁻².ano⁻¹ (SILVA et al., 2013).

Verifica-se que mesmo padronizando a emissão de CH₄ pela área do aterro, os valores observados são bastante distintos. Tentar fazer comparações da estimativa de geração de biogás com outros aterros é uma tarefa complicada, uma vez que cada aterro sanitário possui características de projeto, fluxo de entrada de resíduos e locais com climas diferenciados.

Essas comparações podem dar uma ideia, mas não são conclusivas, principalmente quando se compara medições reais com estimativas matemáticas, uma vez que podem ocorrer discrepâncias entre o valor real medido e a previsão de emissão do biogás (PEDOTT e

AGUIAR, 2014). A composição gravimétrica do resíduo depositado, por exemplo, pode sofrer variação, além disso, a mesma não é minunciosamente acompanhada no decorrer do processo para saber se está de acordo com o planejado.

Conforme será visto na sequência, mesmo apresentando valores proporcionais menores de emissão em comparação a aterros de maior porte, isso não significa afirmar que a geração de metano será insuficiente para a produção de energia e obtenção de lucro.

3.3 Estimativa da potência e da energia elétrica disponível

Para o cálculo de potência elétrica (P_x) o valor da eficiência de coleta de gases (E_c) utilizada foi de 75% (CETESB, 2006). A eficiência de coleta de gases precisa ser considerada uma vez que nem todo o biogás gerado será aproveitado, devido as perdas no próprio sistema de coleta e transporte, chamadas de emissões fugitivas.

Em média, os valores de P_x e de energia elétrica (E_x) disponíveis para todo o período de aproveitamento foram de 983 kW.ano⁻¹ e 2.584.466 kWh.ano⁻¹, com picos de 1.655,33 kW e 4.350.207,24 kWh em 2030, respectivamente (Figuras 2 e 3).

Fazendo uma simulação do consumo de energia elétrica de uma casa de porte médio no Paraná, este seria de aproximadamente 580 kWh.mês⁻¹ (COPEL, 2016), ou seja, 6.960 kWh.ano⁻¹. Considerando o potencial de geração de energia elétrica do aterro de Francisco Beltrão e descontando seu consumo anual de energia, que é de 42.000 kWh.ano⁻¹ (Tabela 4), este poderia cobrir a demanda de energia de 365 casas. Isto atenderia uma média de 1.460 pessoas, ou seja, quase 2% da população do município.

Para a escolha da potência do motor utilizado, considerou-se a vazão média de metano para o período avaliado, que foi de 1.157.043 m³.ano⁻¹, e a percentagem média de metano no biogás (50%). Desta forma, a potência estimada para o motor foi de 195,53 kW. Portanto, para essa análise, optou-se por um motor de ciclo Otto com potência comercial mais próxima deste valor, ou seja, de 200 kW.

A escolha de um motor ciclo Otto se deve ao maior rendimento elétrico e custo inferior que esta tecnologia apresenta em relação as demais, além de ser um equipamento comumente utilizado para aproveitamento de biogás de aterros (CENBIO, 2005; ICLEI, 2009).

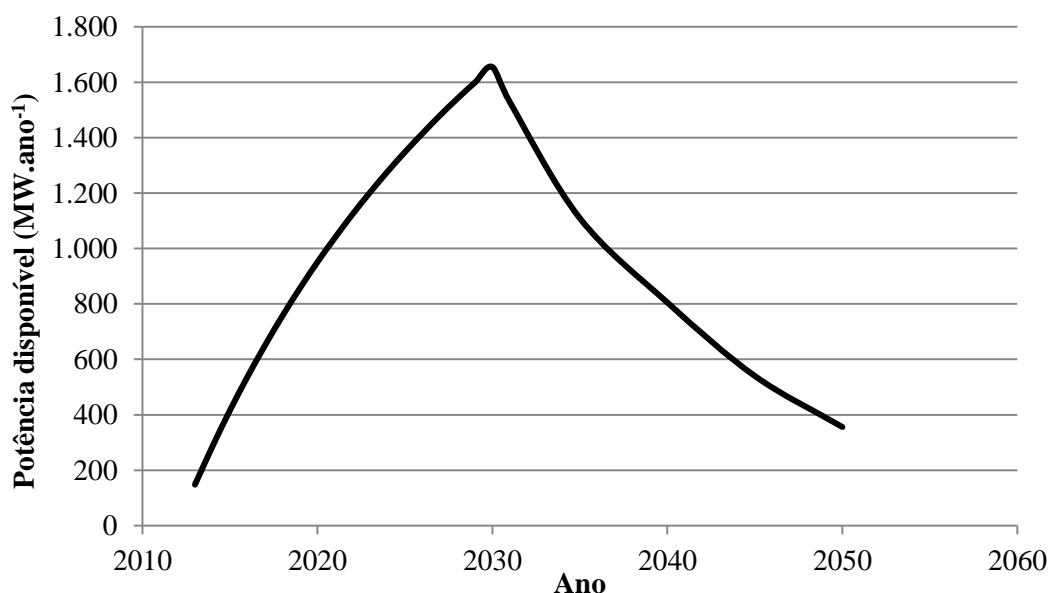


Figura 2 – Curva estimativa da potência disponível no Aterro Sanitário de Francisco Beltrão, PR, para os anos entre 2013 e 2050.

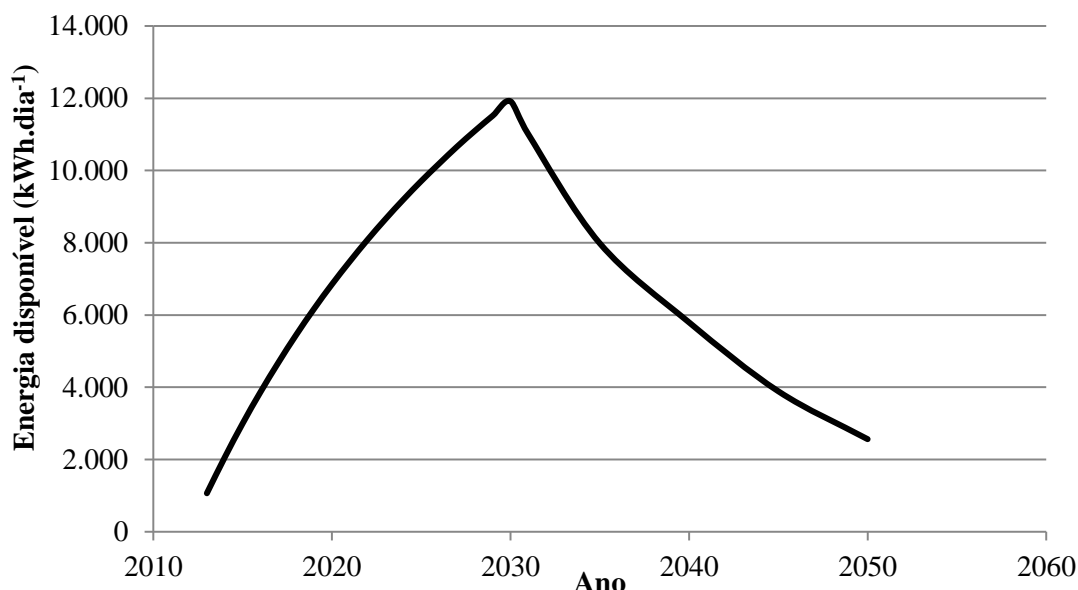


Figura 3 – Curva estimativa da energia disponível no Aterro Sanitário de Francisco Beltrão, PR, para os anos entre 2013 e 2050.

Percebe-se que a estimativa do biogás gerado é mais do que suficiente para suprir a demanda de energia elétrica do próprio aterro. Sabendo que o consumo médio mensal do aterro sanitário é de 3.500 kWh.mês⁻¹ (Tabela 4), que equivale a 42.000 kWh.ano⁻¹, todos os anos analisados supririam a necessidade de geração, sobrando ainda um excedente que poderia receber outra destinação, como o abastecimento de residências próximas, iluminação pública ou a venda para a rede de distribuição.

3.4 Crédito de carbono e rendimento pela venda

A estimativa da quantidade de carbono equivalente (tCO_{2Eq}) foi realizada considerando a queima de todo o metano coletado, tanto para a geração de eletricidade quanto pela queima em flare, sendo os resultados de tCO_{2Eq} e do rendimento anual pela venda mostrados na tabela 3.

Tabela 3 – Estimativa da quantidade de carbono equivalente e rendimento anual de sua venda para os anos entre 2013 e 2050 considerando os valores de tCO_{2Eq} utilizados.

Ano	CO _{2Eq} (tCO ₂)	Rendimento anual (R\$)
2013	2.205,40	31.757,76
2014	4.272,18	61.519,39
2015	6.200,33	89.284,75
2016	8.002,46	115.235,42
2017	9.691,17	139.552,85
2018	11.279,06	162.418,46
2019	12.778,73	184.013,71
2020	14.177,59	204.157,30
2021	15.500,00	223.200,00
2022	16.747,76	241.167,74
2023	17.926,91	258.147,50
2024	19.043,03	274.219,63
2025	20.101,26	289.458,14
2026	21.106,38	303.931,87

2027	22.062,82	317.704,61
2028	22.974,59	330.834,10
2029	23.845,47	343.374,77
2030	24.678,94	355.376,74
2031	22.781,53	328.054,03
2035	16.546,82	238.274,21
2040	11.090,02	159.696,29
2045	7.435,36	107.069,18
2050	4.902,29	70.592,98

Observa-se que a quantidade de carbono equivalente pode gerar um rendimento anual bastante significativo. Segundo a estimativa, o valor médio do rendimento seria de aproximadamente R\$ 210.000 ano⁻¹ para todo o período avaliado, com R\$ 31.757,76 para o primeiro ano e R\$ 355.376,74 em 2030 (Tabela 3). Assim, pode-se concluir que a venda de créditos de carbono pode ser vista como uma maneira de auxiliar no pagamento do investimento e de manter o sistema de geração de energia em funcionamento.

Fazendo uma relação do valor do rendimento da venda de crédito de carbono pelo volume de metano gerado, onde a média de emissão para o período foi de 1.157.043,48 m³.ano⁻¹, Francisco Beltrão poderia gerar R\$ 0,18 por m³ de metano produzido. Isso corresponde a aproximadamente R\$ 12,00 por tonelada de CO_{2Eq}.

Dentro de um cenário hipotético, os municípios brasileiros com 75.001 a 100.000 habitantes, que geram em média 104 t.dia⁻¹ de RSU, possuem um potencial de renda em créditos de carbono de aproximadamente 357 milhões de dólares por ano (LUZ et al., 2015), ou seja, cerca de 857 milhões de reais considerando o câmbio de 2013. Isso partindo de um pressuposto que todas as frações orgânicas e inorgânicas dos resíduos analisados fossem gaseificadas.

3.5 Tempo de retorno de investimento e valor presente líquido

A tabela 4 mostra as considerações utilizadas para verificar o tempo de retorno do investimento e a atratividade do projeto. A idealização foi montada considerando um período de aproveitamento de 15 anos (2020 a 2035), uma vez que em 2030 começa a existir uma diminuição acentuada da energia disponível gerada pelo biogás.

As outras considerações levaram em conta a produção média de energia neste período, o custo da produção de energia (sugerida pelo software), o valor a energia mais atual na época do estudo, a economia idealizada de energia por ano (que considera o consumo de energia pelo aterro) e o valor do investimento inicial com os equipamentos instalados naquele período. Para este último, a soma de gastos considerou: custos de coleta e de purificação do biogás gerado, sistema de compressão, gasômetro, queimador e custo com o sistema gerador (Tabela 4).

Tabela 4 – Dados para cálculo do Payback Descontado e Valor Presente Líquido.

Principais dados		Fonte
Energia elétrica		
Período de aproveitamento	2020 a 2035	Autores.
Produção média de energia	3.490,59 MWh.ano ⁻¹	Dados.
Custo da produção de energia	31,80 R\$ MWh ⁻¹	Sugerido pelo programa.
Valor de venda da energia	161,94 R\$ MWh ⁻¹	BRASIL, 2012.
Gastos de energia no aterro	42,00 MWh.ano ⁻¹	Engenheiro responsável.
Economia com energia	16.332 R\$.ano ⁻¹	Engenheiro responsável.
Investimento com equipamentos	R\$ 1.504.781,00	Autores.

Além da adequação do aterro sanitário de Francisco Beltrão com os conceitos de MDL e de eficiência energética, existe também uma viabilidade econômica da exploração do biogás (Tabelas 5 e 6)

Tabela 5 – Fluxo de Caixa estimado para o aproveitamento do biogás do Aterro Sanitário de Francisco Beltrão, PR.

Ano	Energia Comerciável (MWh.ano ⁻¹)	Receita Venda Energia (R\$)	Custo Produção Energia (R\$)	Economia com Energia (R\$)	Crédito de Carbono (R\$)	Fluxo de Caixa Líquido (R\$)
2020	2.457,23	397.923,50	74.221,20	16.632,00	204.157,30	544.491,60
2021	2.688,49	435.374,39	74.221,20	16.632,00	223.200,00	600.985,19
2022	2.909,24	471.122,97	74.221,20	16.632,00	241.167,74	654.701,51
2023	3.116,86	504.743,66	74.221,20	16.632,00	258.147,50	705.301,96
2024	3.313,96	536.662,03	74.221,20	16.632,00	274.219,63	753.292,46
2025	3.500,54	566.878,10	74.221,20	16.632,00	289.458,14	798.747,04
2026	3.676,62	595.391,84	74.221,20	16.632,00	303.931,87	841.734,51
2027	3.847,44	623.054,43	74.221,20	16.632,00	317.704,61	883.169,84
2028	4.007,75	649.014,71	74.221,20	16.632,00	330.834,10	922.259,61
2029	4.160,17	673.698,25	74.221,20	16.632,00	343.374,77	959.483,82
2030	4.307,34	697.530,64	74.221,20	16.632,00	355.376,74	995.318,18
2031	3.973,58	643.482,19	74.221,20	16.632,00	328.054,03	913.947,02
2035	2.872,45	465.164,88	74.221,20	16.632,00	238.274,21	645.849,89

Tabela 6 – Retorno do Investimento.

Ano	Investimento Inicial (R\$)	Fluxo de Caixa Líquido (R\$)	payback descontado (R\$)	VPL (R\$)
2019	1.504.781,00	-	-	- 1.504.781,00
2020	-	544.491,60	490.532,97	- 1.014.248,03
2021	-	600.985,19	487.773,06	- 526.474,96
2022	-	654.701,51	478.712,10	- 47.762,86
2023	-	705.301,96	464.604,25	416.841,38
2024	-	753.292,46	447.042,41	863.883,79
2025	-	798.747,04	427.042,79	1.290.926,58
2026	-	841.734,51	405.428,51	1.696.355,09
2027	-	883.169,84	383.230,79	2.079.585,88
2028	-	922.259,61	360.534,13	2.440.120,01
2029	-	959.483,82	337.915,31	2.778.035,32
2030	-	995.318,18	315.797,85	3.093.833,17
2031	-	913.947,02	261.243,37	3.355.076,54
2035	-	645.849,89	166.315,55	3.521.392,09

O investimento inicial de R\$ 1.504.781,00 realizado em 2019 será totalmente recuperado no ano de 2023, totalizando um período de recuperação de quatro anos (Tabela 6), o que é bastante razoável, já que o período de exploração do negócio pode ser por 15 anos ou mais. Portanto, é estimado que a partir de 2023 a exploração do biogás começará a gerar lucro, sendo que este poderá ser utilizado para ampliação e investimentos em tecnologia no próprio aterro. O VPL mostra que o resultado líquido deste investimento ao término do período idealizado é de R\$ 3.521.392,09, ou seja, 2,3 vezes mais do que o valor previsto de investimento para o período.

Em estudo realizado em 15 diferentes subgrupos populacionais de municípios brasileiros (de < 1.000 a > 1.000.000 de habitantes), verificou-se que para municípios de mais

de 60.000 habitantes o VPL foi sempre positivo (LUZ et al., 2015). No entanto, segundo os mesmos autores, sem os devidos incentivos por parte da iniciativa pública, é improvável que esse tipo de projeto possa ser concretizado, mesmo tendo um VPL positivo e um baixo tempo de retorno de investimento.

4. CONCLUSÕES

O aterro sanitário de Francisco Beltrão mostrou ter um grande potencial de geração de metano que, além de suprir a demanda de energia do próprio aterro, poderá atender a outras demandas energéticas. Além disso, no mercado de carbono, a quantidade de carbono equivalente negociada pode gerar rendimentos desde o primeiro até o último ano avaliado, o que é bastante significativo considerando um aterro de pequeno a médio porte.

Estima-se que o investimento seja totalmente recuperado no ano de 2023, o que torna o projeto atrativo economicamente, gerando uma receita de aproximadamente 3,5 milhões de reais ao término do período idealizado.

Mesmo que a receita gerada fosse apenas suficiente para cobrir o investimento durante todo o tempo de utilização do aterro, a iniciativa seria ambientalmente viável, uma vez mitigaria o impacto ambiental causado pelos RSU do município de Francisco Beltrão, PR.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Campus de Francisco Beltrão, pelo suporte e ajuda de custos neste trabalho.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. *Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos – 2013.* São Paulo, 2013, 172p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil – 2014.* São Paulo, 2014, 118p.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. *Ofício n° 004/2012 - SEM/ANEEL:* Valor anual de referência para o ano de 2012. Brasília, 2012.

BOSCOV, M.E.G. *Geotecnia Ambiental.* São Paulo: Oficina de Textos, 2008, 248p.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA – CENBIO. *Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto,* São Paulo, 2005.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA – COPEL. *Simulador.* Disponível em: <<http://www.copel.com/hpcopel/simulador/>>. Acesso em: 15/03/2016.

COMPANIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Biogás, Geração E Uso Energético – Aterro 1.0. (Software).* CETESB, 2006.

CONSELHO INTERNACIONAL PARA AS INICIATIVAS AMBIENTAIS LOCAIS – ICLEI. *Manual para Aproveitamento de Biogás Volume 1 - Aterros Sanitários.* São Paulo, 2009.

FARZADKIA, M.; DJAHED, B.; SHAHSAVANI, S.; DEGHANIFARD E. Prediction of gas emission and derived electrical power generation from shiraz landfill. *Global Nest Journal*, v.17, p.487-497, 2015.

- GITMAN, L. J.; MADURA, J.** *Administração financeira: uma abordagem gerencial*. São Paulo: Pearson, 2003, 676p.
- HAMRICK, K.; GOLDSTEIN, A.** *Ahead of the Curve: state of the voluntary carbon markets*. Washington: Forest Trends' Ecosystem Marketplace, 2015, 55p.
- HINRICHS, R.; KLEINBACH, M. H.** *Energia e meio ambiente*. São Paulo: Cengage Learning, 2014, 764p.
- INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ – IAPAR.** *Cartas Climáticas do Paraná, Net, Francisco Beltrão, agosto/2013. Seção de precipitação* [Internet]. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=856>>. Acesso em: 23/08/2013.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE.** *Censo 2010 Paraná*. Disponível em http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/tabelas_pdf/total_populacao_parana.pdf>. Acesso em: 15/08/2013.
- INVESTING BRASIL – FINANÇAS, CÂMBIO E BOLSA DE VALORES.** Disponível em: <<http://br.investing.com/commodities/carbon-emissions>>. Acesso em: 05/03/2016.
- LUZ, F.C.; ROCHA, M.H.; LORA, E.E.S.; VENTURINI, O.J.; ANDRADE, R.V.; LEME, M.M.V.; OLMO, O.A.** Techno-economic analysis of municipal solid waste gasification for electricity generation in Brazil. *Energy Conversion and Management*, v.103, p.321-337, 2015.
- PECORA, V.; V.; SILVIA M. S.; COELHO, S. T.** Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: Estudo de caso em São Paulo. In: Congresso Internacional de Bioenergia, 6., 2006, Curitiba.
- PEDOTT, J.G.J.; AGUIAR, A.O.** Biogás em aterros sanitários: comparando a geração estimada com a quantidade verificada em projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo. *Holos*, v.4, p.195-211, 2014.
- SILVA, T.N.; FREITAS, F.S.N.; CANDIANI, G.** Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.18, p.95-104, 2013.
- TCHOBANOGLIOUS, G; THEISEN, H; VIGIL, S.A.** *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues*. New York: McGraw-Hill, 1993, 978 p.
- VANZIN, E.** *Procedimento para análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no aterro Santa Tecla*. 96 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.
- WORLD BANK.** *Handbook for the preparation of landfill gas to energy projects in Latin America and Caribbean*. Washington: World Bank, 2003, 125p.