

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ANDRIELE RIMOLDI MELLO
RENATO GRASSI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS GERADO NO ATERRO
SANITÁRIO DO MUNICÍPIO DE FRANCISCO BELTRÃO – PR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FRANCISCO BELTRÃO

2014

ANDRIELE RIMOLDI MELLO
RENATO GRASSI

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS GERADO NO ATERRO
SANITÁRIO DO MUNICÍPIO DE FRANCISCO BELTRÃO – PR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para a conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Ambiental da UTFPR, Câmpus Francisco Beltrão.

Orientador: Dr. Henrique Cesar Almeida

Co-orientador: Msc. Guillermo Caprario

Co-orientador: Msc. Adir Silvério Cembranel

FRANCISCO BELTRÃO

2014



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Francisco Beltrão
Curso de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC - 2

Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir do Biogás gerado no aterro sanitário do município de Francisco Beltrão/PR.

por

Andriele Rimoldi Mello

Monografia apresentada às **19:00 horas, do dia 18 de fevereiro de 2014** como requisito parcial para obtenção do título de **ENGENHEIRO AMBIENTAL**, Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Francisco Beltrão. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO**.

Banca examinadora:

**Prof. MsC. ADIR SILVÉRIO
CEMBRANEL**
UTFPR Convidado

Prof. Dr. HENRIQUE C. ALMEIDA
UTFPR Orientador

**Prof. MsC. GUILLERMO NEY
CAPRARIO**
UTFPR Convidado

Prof. Dr. Juan Carlos Pokrywiecki
Coordenador do TCC-2

A copia original encontra-se assinada na coordenação de Engenharia Ambiental



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Francisco Beltrão
Curso de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC - 2

Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir do Biogás gerado no aterro sanitário do município de Francisco Beltrão/PR.

por

Renato Grassi

Monografia apresentada às **19:00 horas, do dia 18 de fevereiro de 2014** como requisito parcial para obtenção do título de **ENGENHEIRO AMBIENTAL**, Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Francisco Beltrão. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **APROVADO**.

Banca examinadora:

**Prof. MsC. ADIR SILVÉRIO
CEMBRANEL**
UTFPR Convidado

Prof. Dr. HENRIQUE C. ALMEIDA
UTFPR Orientador

**Prof. MsC. GUILLERMO NEY
CAPRARIO**
UTFPR Convidado

Prof. Dr. Juan Carlos Pokrywiecki
Coordenador do TCC-2

A copia original encontra-se assinada na coordenação de Engenharia Ambiental

RESUMO

MELLO, Andriele Rimoldi; GRASSI, Renato. Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir do biogás gerado no aterro sanitário do município de Francisco Beltrão – PR. 2014. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, 2014.

Este trabalho objetiva avaliar o potencial de geração de metano no Aterro Sanitário de Francisco Beltrão – PR e o aproveitamento deste para a geração de energia elétrica. O mesmo apresenta os principais conceitos referentes ao estudo, como os resíduos sólidos, aterros sanitários, geração e aproveitamento do biogás, entre outros. Para a mensuração da emissão de metano, foram utilizados dois métodos matemáticos: o primeiro é sugerido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas e o segundo pelo 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. O investimento econômico foi considerado viável para venda do excedente de energia e dos créditos de carbono, com tempo de retorno do investimento de dois anos, um mês e quinze dias.

Palavras-chave: Aterro sanitário. Aproveitamento do metano. Energia elétrica.

ABSTRACT

MELLO, Andrielle Rimoldi; GRASSI, Renato. Evaluation of the potential for generating electricity from biogas generated at the landfill in the municipality of Francisco Beltrão - PR. 2014. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Francisco Beltrão, 2014.

This work aims to evaluate the potential for methane generation in Landfill Francisco Beltrão - PR and use this to generate electricity. The same presents the main concepts related to the study, such as solid waste, landfill, generation and use of biogas, among others. For the measurement of methane emission, two mathematical methods were used: the first is suggested by the Intergovernmental Panel on Climate Change and the second by the software Biogas generation and energy use - landfill 1.0 developed by Technology Company of Environmental Sanitation of São Paulo. The quantification of methane and calculation of power generation indicated the possibility of the use of this alternative form of energy at the landfill itself, still left a surplus that can be sold or used for other purposes. The economic investment was viable for selling excess energy and carbon credits, with time to payback of two years, one month and fifteen days.

Keywords: Landfill. Use of methane. Electricity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura básica de um aterro sanitário.....	15
Figura 2. Localização do sudoeste do Paraná, do município de Francisco Beltrão e do aterro sanitário municipal.....	32
Figura 3. Delimitação do aterro sanitário de Francisco Beltrão – PR.	34
Figura 4. Delimitação das células do aterro sanitário.	44
Figura 5. Localização do aterro sanitário.	45

LISTA DE FLUXOGRAMAS

Fluxograma 1. Etapas para o aproveitamento energético do biogás.	24
---	----

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Fases de degradação dos resíduos e geração do biogás.	18
Quadro 2. Dados fornecidos ao software para estimativa do metano gerado e potência elétrica disponível.	48
Quadro 3. Variáveis utilizadas para o cálculo da geração de metano pela metodologia do IPCC (1996).	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Geração e coleta de resíduos sólido urbanos no Brasil.....	14
Gráfico 2. Destino final dos resíduos sólidos no Brasil, por unidades de destino dos resíduos, em 2008.....	16
Gráfico 3. Destinação final dos RSU (t/dia) em 2011 e 2012.	17
Gráfico 4. Composição gravimétrica dos resíduos destinados no aterro sanitário de Francisco Beltrão.....	46
Gráfico 5. Curva estimativa da geração de metano para os anos entre 2013 e 2050.	51
Gráfico 6. Curva estimativa da potência disponível para os anos entre 2013 e 2050.	55
Gráfico 7. Curva estimativa da energia disponível para os anos entre 2013 e 2050.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Participação dos principais materiais no total de RSU coletados no Brasil em 2012.....	14
Tabela 2. Composição média do biogás em aterros.	19
Tabela 3. Tecnologias de geração de energia.	23
Tabela 4. Principais informações coletadas.	42
Tabela 5. Estimativa de população, fluxo de resíduos e emissão de metano através da metodologia do IPCC (1996) e pelo software Biogás (2006), entre 2013 e 2050.	50
Tabela 6. Potência e energia disponível para os anos de 2013 a 2050.	53
Tabela 7. Estimativa da quantidade de carbono equivalente e rendimento anual de sua venda para os anos entre 2013 e 2050 considerando os valores de tCO ₂ Eq utilizados.	57
Tabela 8. Dados para cálculo do <i>payback</i> Descontado e Valor Presente Líquido. ...	59
Tabela 9. Fluxo de Caixa.....	59
Tabela 10. Retorno do Investimento.	60

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVOS	12
2.1 Objetivo geral	12
2.2 Objetivos específicos	12
3 REVISÃO DE LITERATURA	13
3.1 Resíduos sólidos urbanos	13
3.2 Destinação dos resíduos sólidos	15
3.3 Degradação dos resíduos sólidos urbanos e a geração do biogás no aterro sanitário	17
3.4 Efeito estufa	19
3.5 Fatores que influenciam a produção do biogás	20
3.6 Aproveitamento do biogás	22
3.6.1 Extração e tratamento do biogás do aterro	24
3.6.2 Sistema de queima em flare	25
3.6.3 Geração de energia elétrica	26
3.7 Metodologias de mensuração de geração de biogás	27
3.8 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo e os Créditos de carbono	28
3.9 estudos realizados de quantificação do biogás	29
3.10 aproveitamento energético do biogás de aterros	30
4 MATERIAL E MÉTODOS	32
4.1 Local e descrição da área de estudo	32
4.2 Descrição do aterro sanitário	33
4.3 Coleta de dados	34
4.4 Metodologias para quantificação do biogás gerado	35
4.4.1 Quantificação do metano gerado	35
4.4.2 Determinação da potência e energia elétrica disponível	39
4.4.3 Cálculos de <i>payback</i> descontado e valor presente líquido	39
4.4.4 Potencial de créditos de carbono	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1 Características do Aterro, geração de resíduos e composição gravimétrica	42
5.2 Estimativa do metano gerado	47
5.3 Estimativa da potência e da energia elétrica disponíveis	53
5.4 Crédito de carbono e rendimento pela venda	56
5.5 Retorno do investimento	58
6 CONCLUSÃO	61
REFERÊNCIAS	62
APÊNDICE	67

1 INTRODUÇÃO

A rápida urbanização tem como consequência inúmeros impactos nos diferentes compartimentos ambientais (água, solo e ar). Neste sentido, a geração de resíduos sólidos, que é um dos principais problemas desta urbanização, vem afetando gradativamente a qualidade de vida da população.

Dentre os processos ambientalmente corretos conhecidos para o tratamento e disposição final destes resíduos, os aterramentos sanitários são os mais utilizados. Os aterros sanitários são considerados locais adequados para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos já que dispõem de mecanismos corretos para a impermeabilização do solo, cobertura dos resíduos, captação do chorume e captação e queima do biogás.

De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos E.U.A (EPA, 2011), o metano (CH_4) possui um impacto vinte e uma vezes maior do que o dióxido de carbono (CO_2) sobre o potencial de efeito estufa, tendo relação com as mudanças climáticas. Não é de se admirar que, globalmente, mais de 60% do total de suas emissões são provenientes de atividades humanas, dentre elas, a gestão de resíduos.

A utilização de queimadores nos aterros sanitários, em que o CH_4 do biogás é convertido em CO_2 e água, é uma prática 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 quesitos do desenvolvimento sustentável, que além de reduzir a emissão de gases do efeito estufa, engloba também modernos processos de eficiência energética (FIGUEIREDO, 2007).

Adicionalmente, existe hoje um grande interesse na produção de energia a partir de fontes alternativas. É neste contexto que se encaixa a utilização do biogás gerado em aterros sanitários, passando de um subproduto indesejado obtido pela decomposição anaeróbia da matéria orgânica para o seu aproveitamento na geração de energia elétrica.

Neste contexto, surgem duas perguntas: o aproveitamento do metano gerado em aterros sanitários para a geração de energia elétrica é viável

economicamente? A energia gerada seria suficiente para pelo menos atender a demanda de energia elétrica das edificações do próprio aterro? Para responder essas perguntas, o presente trabalho utilizou como modelo o Aterro Sanitário do município de Francisco Beltrão – PR. Para isso, foi necessário traçar alguns objetivos, conforme pode ser verificado na sequência.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Mensurar a geração de metano do Aterro Sanitário do município de Francisco Beltrão – PR através das metodologias sugeridas pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) (1996) e pelo software Biogás, geração e uso energético – aterro 1.0 (CETESB, 2006), e avaliar seu potencial de geração de energia elétrica e potencial de crédito de carbono.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Coletar dados referentes aos resíduos sólidos urbanos do Aterro Sanitário do município de Francisco Beltrão – PR e sua destinação.
- Determinar o potencial de geração de biogás que o aterro sanitário possui.
- Avaliar a possibilidade de aproveitamento do biogás do aterro sanitário para a geração de energia elétrica.
- Calcular o potencial de crédito de carbono.
- Obter o *payback* descontado e a atratividade econômica da realização do investimento.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Os resíduos sólidos são definidos como resíduos nos estados sólidos ou semi-sólidos, que resultam das atividades da comunidade, de origem: industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição (ABNT, 2004).

Esses resíduos, quando acumulados no meio ambiente de forma inadequada, causam poluição e caracterizam um desperdício da matéria originalmente utilizada (FIGUEIREDO, 2007).

As estratégias de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos urbanos buscam evitar ou reduzir a geração de resíduos e poluentes. Desse modo deve-se priorizar, em ordem decrescente de aplicação, a redução na fonte, o reaproveitamento, o tratamento e a disposição final dos mesmos (ZANTA & FERREIRA, 2003).

Existem várias classificações para os resíduos sólidos, podendo ser quanto à periculosidade e quanto à origem do resíduo prevista na Política Nacional dos Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010). Os resíduos sólidos urbanos, classificados pela sua origem, compreendem os resíduos domiciliares, originários das atividades domésticas em residências urbanas, e os resíduos de limpeza urbana, provenientes da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.

Dentre os principais materiais coletados no país, destacam-se os metais, papel, papelão e embalagens longa vida, plástico, vidro e a matéria orgânica, sendo o último mais significativo com 51,4% de participação, somando um montante de 29.072.794 t ano⁻¹. A Tabela 1 apresenta os valores de participação e quantidade desses resíduos (ABRELPE, 2012).

Tabela 1. Participação dos principais materiais no total de RSU coletados no Brasil em 2012

Material	Participação (%)	Quantidade (t.ano ⁻¹)
Metais	2,9	1.640.294
Papel, papelão e TetraPak	13,1	7.409.603
Plástico	13,5	7.635.851
Vidro	2,4	1.357.484
Matéria Orgânica	51,4	29.072.794
Outros	16,7	9.445.830
Total	100,0	56.561.856

Fontes: ABRELPE, 2012, adaptado.

A geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil aumentou 1,3% em 2012 em comparação a 2011, passando de 61.936.368 t.ano⁻¹ para 62.730.096 t.ano⁻¹. Já a coleta desses resíduos cresceu 1,9% no mesmo período, passando de 55.534.440 t.ano⁻¹ para 56.561.856 t.ano⁻¹ (ABRELPE, 2012). O Gráfico 1 ilustra este crescimento.

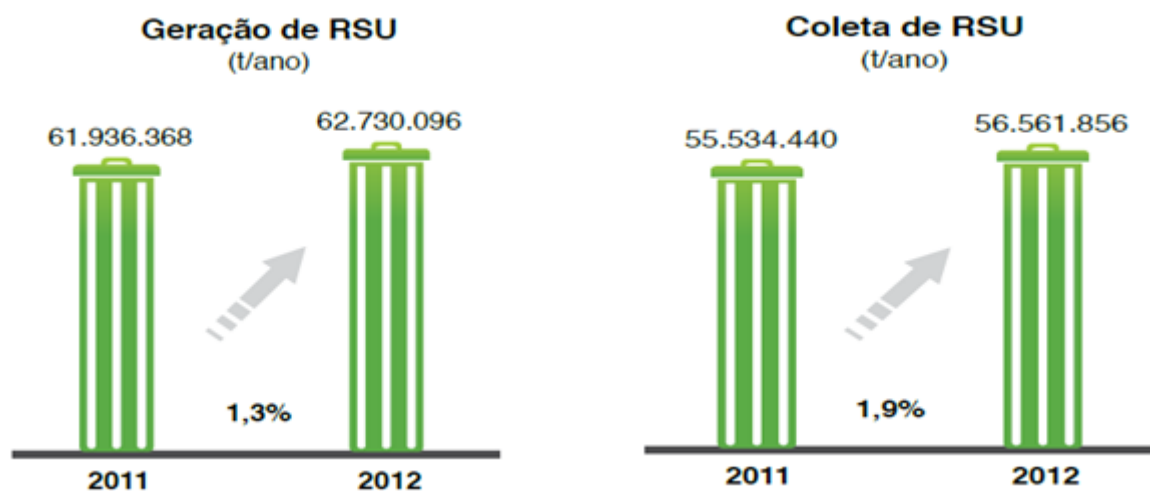


Gráfico 1. Geração e coleta de resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Fonte: ABRELPE, 2012, adaptado.

As informações do Gráfico 1 também demonstram que aproximadamente 90% dos resíduos sólidos urbanos gerados são coletados. Após o recolhimento é realizada a destinação final desses resíduos, comumente em lixões (aterros não controlados), aterros controlados e aterros sanitários, sendo os aterros sanitários considerados a forma mais adequada de destinação final.

3.2 DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

No aterro sanitário a disposição final dos resíduos sólidos urbanos é realizada sobre terreno natural, através do seu confinamento em camadas cobertas com material inerte, seguindo normas operacionais específicas. O uso de aterros sanitários para disposição dos resíduos é considerado tecnicamente mais adequado, pois evita danos ao meio ambiente, mais particularmente à saúde e à segurança pública (IBAM, 2001).

Para isso, os aterros sanitários contam com unidades operacionais e unidades de apoio. As unidades operacionais abrangem as células com os resíduos, a impermeabilização, sistemas de coleta e tratamento dos líquidos percolados e do biogás, sistema de drenagem das águas pluviais, monitoramento ambiental, entre outros. As unidades de apoio consistem na cerca e barreira vegetal, as entradas de acesso, balança e outros (IBAM, 2001). Na Figura 1 visualiza-se um esquema da estrutura básica de um aterro sanitário.



Figura 1. Estrutura básica de um aterro sanitário

Fonte: <http://www.saojoaodelreitransparente.com.br/works/view/670>.

Os resíduos sólidos urbanos no Brasil nem sempre recebem a correta destinação final. Em 2008, os vazadouros a céu aberto (lixões) eram apontados como o destino final dos resíduos em 50,8% dos municípios brasileiros. As demais unidades de destino são os aterros controlados, com 22,5% e os aterros sanitários, com 27,7% (IBGE, 2010). Esses valores são apresentados no Gráfico 2.

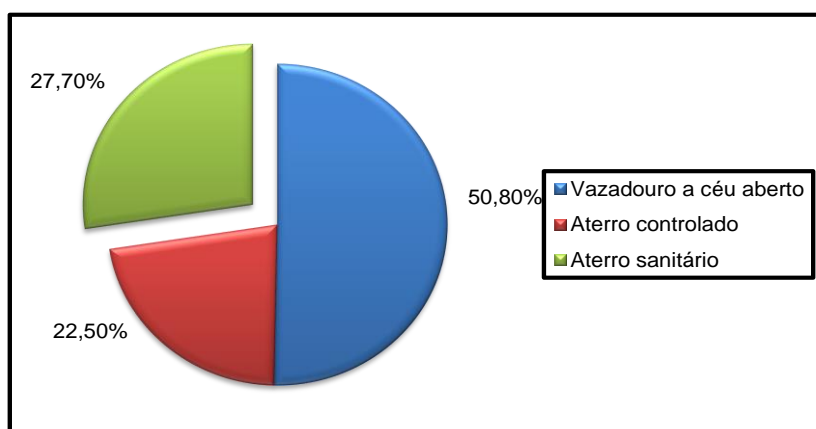


Gráfico 2. Destino final dos resíduos sólidos no Brasil, por unidades de destino dos resíduos, em 2008.

Fonte: IBGE, 2010, adaptado.

Embora os aterros sanitários correspondam a apenas 27,7% das unidades de destinação em 2008, a situação melhora se a quantidade de resíduos que é disposta nos mesmos for avaliada. Dados publicados pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE) (2012) mostram que a maior parte dos resíduos urbanos gerados (58%) vai para o aterro sanitário, seguido do aterro controlado (24,2%) e do lixão (17,8%) (Gráfico 3).

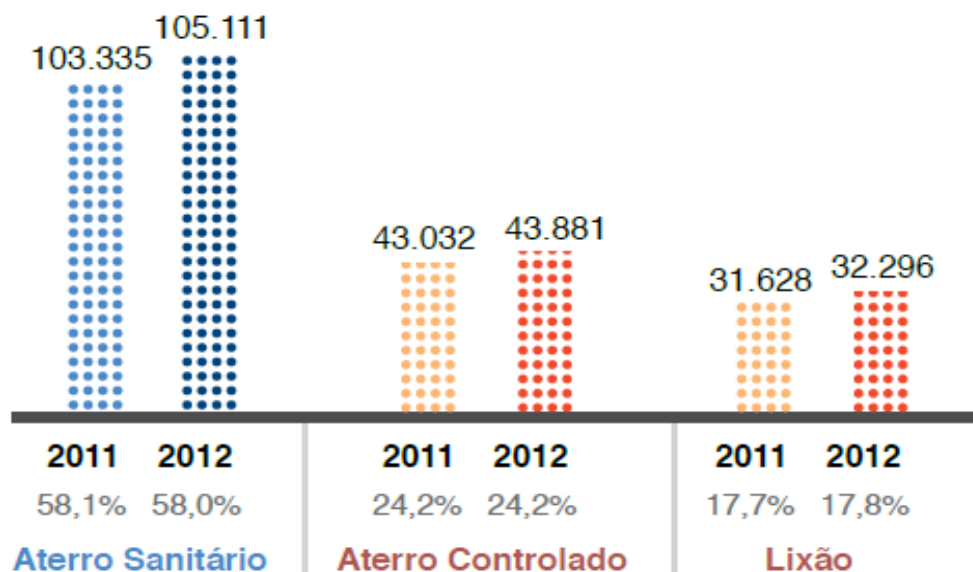


Gráfico 3. Destinação final dos RSU (t/dia) em 2011 e 2012.

Fonte: ABRELPE, 2012.

Com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) prevista na Lei nº 12.305/2010 que proíbe qualquer destinação que não seja ambientalmente adequada a partir de 2014, o cenário apresentado nos Gráficos 2 e 3 tende a mudar, dando maior destaque para os aterros sanitários (BRASIL, 2010).

3.3 DEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E A GERAÇÃO DO BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO

Um aterro sanitário funciona como um reator biológico onde as principais entradas são os resíduos e a água e as principais saídas são os gases e o chorume. Dentro do aterro, a decomposição da matéria orgânica ocorre por dois processos: a decomposição aeróbia e a decomposição anaeróbia. A decomposição aeróbia acontece pela ação dos microrganismos na presença do ar e ocorre no período de deposição do resíduo. Após este período, o oxigênio presente nos resíduos diminui dando origem ao processo de decomposição anaeróbia (BORBA, 2006).

A variedade de resíduos implica na diversidade microbiana, permitindo a ocorrência de uma corrente de várias reações até degradação destes resíduos. As

comunidades microbianas presentes nos aterros sanitários incluem bactérias hidrolíticas e fermentativas, acidogênicas, acetogênicas e archeas metanogênicas, além de bactérias redutoras de sulfato e protozoários (CASTILHOS JR et al., 2003).

A formação dos gases do aterro varia com o tempo e segue fases distintas de decomposição (VANZIN, 2006). O Quadro 1 apresenta o que acontece em cada fase.

Fase I: Ajuste inicial	A biodegradação acontece em condições aeróbias, formando gás carbônico e água. A terra utilizada como cobertura contribui como fonte de microrganismos.
Fase II: Transição	A disponibilidade de oxigênio diminui e as reações anaeróbias tem início. Os nitratos e sulfatos podem ser receptores de elétrons nas reações biológicas de conversão. Ocorre a produção de metano e com a queda do potencial de oxirredução os microrganismos iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos.
Fase III: Ácida	As reações são aceleradas e ocorre grande produção de ácidos orgânicos e quantidades menores de gás hidrogênio. Hidrólise dos compostos de maior massa molecular em compostos apropriados para o uso como fonte de energia para os microrganismos. Acidogênese e acetogênese com a conversão dos compostos resultantes da hidrólise em compostos intermediários, como o ácido acético, com menor massa molecular. O dióxido de carbono é o principal gás gerado.
Fase IV: Metanogênica	Microrganismos estritamente anaeróbios convertem o ácido acético e gás hidrogênio em metano e dióxido de carbono. A formação do metano ocorre ao mesmo tempo em que os ácidos (com formação reduzida).
Fase V: Maturação	Ocorre quando já há grande quantidade de metano e dióxido de carbono. A taxa de geração do gás diminui porque a maioria dos nutrientes já foi consumida, restando os de degradação lenta. Pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio pode ser encontradas no gás.

Quadro 1. Fases de degradação dos resíduos e geração do biogás.

Fonte: Vanzin, 2006, adaptado.

A taxa de decomposição dos resíduos sólidos atinge o seu máximo em dois anos, em condições normais, declinando até os dez anos, quando praticamente cessa a produção. A atividade no interior do aterro sanitário, contudo, pode prolongar-se por 25 anos se mantidas as condições ótimas do local, como o teor de umidade em torno de 50 a 60%, uniformemente distribuído (RUSSO, 2003).

Os principais constituintes do biogás gerados no processo de biodegradação dos resíduos em um aterro sanitário são: metano, dióxido de carbono, nitrogênio, oxigênio, enxofre, amônia, hidrogênio, monóxido de carbono e outros. A Tabela 2 apresenta a porcentagem média de geração desses gases.

Tabela 2. Composição média do biogás em aterros.

Composição	Porcentagem (Base seca)
Metano	45 – 60
Dióxido de carbono	40 – 60
Nitrogênio	2 – 5
Oxigênio	0,1 – 1
Enxofre, Mercaptanas	0 – 1,0
Amônia	0,1 – 1
Hidrogênio	0 – 0,2
Monóxido de carbono	0 – 0,2
Gases em menor concentração	0,01 – 0,6

Fonte: Tchobanoglous; Theisen; Vinil, 1993, apud Oliveira, 2009, adaptado.

Dentre os gases citados na Tabela 2, os principais e mais abundantes são o dióxido de carbono, com maior produção na degradação aeróbia e o metano na etapa de degradação anaeróbia. A emissão desses gases se mostra preocupante do ponto de vista ambiental, devido a sua relação com o efeito estufa.

3.4 EFEITO ESTUFA

O acréscimo dos gases do efeito estufa tem como consequência um aumento acentuado da temperatura média do planeta em decorrência do aumento da concentração de alguns gases na atmosfera, como o dióxido de carbono, os clorofluorcarbonos, o metano e o óxido nitroso, entre outros (SANTOS et al., 2006).

Nesse contexto, é importante entender que os gases do efeito estufa (GEE) datam da origem da Terra. Este fenômeno ocorre naturalmente e é responsável pela temperatura do planeta. Isto acontece porque a maior parte da radiação na faixa do infravermelho emitida pelo planeta é absorvida principalmente pelas moléculas de CO₂ e de água (e por outros gases de efeito estufa) existentes na atmosfera irradiando a mesma de volta para a Terra. Para se ter uma ideia, é devido ao efeito estufa que a temperatura na Terra se mantém cerca de 40 °C mais alta do que seria se não houvesse a absorção da radiação solar pelos gases mencionados, o que imprimiria uma temperatura de -15 °C a superfície (HINRICHS; KLEINBACH, 2010). No entanto, o advento da Revolução Industrial provocou um aumento progressivo da

emissão desses gases, causando a elevação da temperatura média do planeta a patamares perigosos (FURRIELA, 2006; OLIVEIRA, 2009).

Os GEE, em especial o dióxido de carbono e o metano, aumentam constantemente na atmosfera gerando preocupação. As principais formas de liberação de dióxido de carbono na atmosfera é a queima de resíduos sólidos, combustíveis fósseis, madeira e produtos de madeira. Para o metano, as fontes de emissão são a extração e transporte de carvão mineral e gás natural, indústria petroquímica, criação de gado, pântanos e arrozais, queima de biomassa, decomposição de resíduos orgânicos em aterros, tratamento de esgoto e dejetos animais (CASTILHOS JR et al., 2003).

A grande quantidade emitida desses gases e o consequente aumento de temperatura causam problemas como derretimento de geleiras, fenômenos climáticos extremos, elevação do nível do mar, entre outros (FURRIELA, 2006). Para evitar que isso aconteça deve-se reduzir as emissões desses gases, com medidas como as propostas no Protocolo de Quioto, que entrou em vigor oficialmente no ano de 2005. Outra alternativa seria promover mecanismos que pudessem aproveitar alguns destes gases gerados para outros fins. Um exemplo disso é a reutilização do metano existente no biogás proveniente de resíduos orgânicos de diversas origens e sua potencial aplicação como fonte alternativa de energia.

3.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DO BIOGÁS

A produção de biogás em um aterro sanitário é influenciada por alguns fatores. Entre eles, Borba (2006) e Oliveira (2007) apontam:

- Composição do resíduo – os resíduos sólidos urbanos são compostos em sua maioria por materiais biodegradáveis, sendo a parcela restante constituída de material inerte como concreto, cinza, solo, plástico e outros. Durante o ano, a composição dos resíduos apresenta variações devido a datas comemorativas, período de férias, clima e demais hábitos de consumo da comunidade. Essa composição afeta tanto a qualidade quanto a quantidade de gases produzidos no aterro, sendo que maiores porcentagens de material biodegradável aumentam a

disponibilidade de substrato para os microrganismos potencializando, conseqüentemente, a taxa de geração de gases.

- Tamanho das partículas – a velocidade de degradação é maior quando a massa é formada por resíduos menores, tanto no processo de degradação aeróbia, quanto na anaeróbia. Isso acontece porque a área superficial que fica exposta aos microrganismos é maior, quanto menor for o tamanho do resíduo.

- Umidade – juntamente com a composição dos resíduos, a umidade é um dos fatores mais significativos na produção do biogás. Essa característica vai depender da umidade com que os resíduos chegam ao aterro, da impermeabilização de fundo, da pluviosidade da região, o tipo de cobertura e se é realizada a recirculação do chorume. A água da chuva e a pressão das camadas superiores sobre as outras camadas contribuem para a saturação dos resíduos acelerando as reações químicas e biológicas. Em períodos muito chuvosos ocorre a entrada de oxigênio dissolvido, possibilitando a atividade de bactérias aeróbias e facultativas. Isso acarreta na elevação da temperatura na massa de resíduos, causando variações bruscas que desestabilizam a degradação anaeróbia da matéria orgânica.

- Temperatura – a temperatura tem papel importante nas reações bioquímicas de conversão de resíduos em gases, líquidos e compostos estáveis. Os microrganismos são sensíveis à temperatura do meio, pois não controlam sua temperatura corporal. Assim, esta não estiver adequada a esses microrganismos, o processo de biodegradação será comprometido. Temperaturas entre 30°C e 40°C compreendem a faixa ótima de geração de metano. A temperatura externa também pode influenciar no processo, principalmente na parte mais elevada do aterro.

- pH – o pH (potencial Hidrogeniônico) ácido que os aterros apresentam se aproxima da neutralidade no início da fase metanogênica. Para a geração de metano a melhor faixa de variação é entre 6 e 8, sendo que em condições acima ou abaixo de valor limitarão a produção de metano.

- Idade dos resíduos – os resíduos são depositados no aterro ao longo de um período e os processos de decomposição são afetados diferentemente conforme a fase de degradação em que se encontram. Geralmente, os resíduos mais recentes possuem mais potencial na geração de metano do que os antigos, pois esses últimos – em condições de umidade adequada – já passaram pelos processos de biodegradação.

- Projeto do aterro – os projetos de aterros sanitários constam de três elementos básicos: a impermeabilização de fundo, que impede que o chorume infiltre no solo e o biogás migre por fendas do terreno; a drenagem do chorume, para que o mesmo não se acumule causando aumento da umidade, redução da degradação e, com isso, da geração do biogás; e a cobertura adequada dos resíduos para evitar a saturação da massa de lixo pelo escoamento superficial, diminuindo a produção de chorume, entrada de oxigênio e fuga do biogás.

- Operação – a compactação dos resíduos diminui a presença de oxigênio na massa, diminuindo a etapa aeróbia e antecipando a produção do metano. Por outro lado, a maior compactação diminui a superfície de exposição, dificultando a passagem dos líquidos e gases.

O conhecimento destes fatores permite maior controle na degradação do lixo e, conseqüentemente, da produção do biogás.

3.6 APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

O metano é o gás mais importante proveniente da degradação anaeróbia de resíduos em aterros, com quantias significativas geradas e liberadas à atmosfera anualmente. Devido ao elevado teor de metano presente no biogás, este possui várias aplicações de caráter energético, como geração de energia elétrica, produção de calor de processo, secagem de grãos em propriedades rurais, secagem de lodo em estações de tratamento de esgoto, queima em caldeiras, aquecimentos de granjas, iluminação a gás e outras (ICLEI, 2009).

Segundo dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) (2006), a maior utilização do biogás de aterros sanitários é como combustível para a geração de energia elétrica, sendo seu uso vantajoso, pois produz valor agregado. Para isso, existem várias tecnologias, como motores de combustão interna, turbinas de combustão e turbinas com utilização de vapor.

A escolha da tecnologia de geração de energia vai depender da aplicação, sendo, sendo as principais características apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3. Tecnologias de geração de energia.

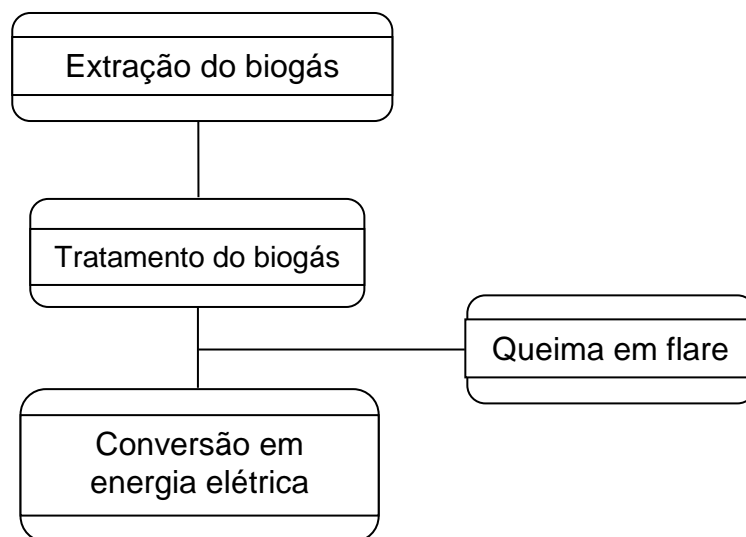
	Motores de combustão interna	Turbinas de combustão	Turbinas com utilização de vapor
Tamanho típico do projeto (MW)	> 1	> 3	> 8
Necessidade de GDL* (m ³ dia ⁻¹)	> 17,7	> 56,6	> 141,9
Custos de capital típicos (US\$ kW ⁻¹)	1.000 – 1.300	1.200 – 1.700	2.000 – 2.500
Custos de O&M** típicos (US\$ kWh ⁻¹)	1.8	1.3 – 1.6	1.0 – 2.0
Eficiência elétrica (%)	25 – 35	20 – 28 26 – 40	20 – 31
Potencial de co-geração	Baixo	Médio	Alto
Necessidade de compressão [atm]	Baixo (0,1 – 2,4)	Alto (> 11,2)	Baixo (0,1 – 0,3)
Vantagens	Baixo custo. Alta eficiência. Tecnologia mais comum.	Resistente à corrosão. Baixo custo de O&M. Pequeno espaço físico. Baixa emissão de NO _x .	Resistente à corrosão. Pode controlar composição e fluxo de gás.

*GDL – gás do lixo; **O&M – operação e manutenção.

Fonte: EPA, 1996, apud CETESB, 2006, adaptado.

O aproveitamento do biogás para a geração de energia elétrica compreende algumas etapas: a extração e o tratamento do biogás, a implantação de um sistema de queima em flares e a utilização de um motor ou turbina para conversão do combustível em energia elétrica, conforme apresenta o Fluxograma 1.

As etapas do fluxograma, apresentadas a seguir, foram baseadas em Oliveira (2009), Figueiredo (2007) e no “Manual para aproveitamento de biogás volume 1 – aterros sanitários” desenvolvido pelo Conselho Internacional para as Iniciativas Ambientais Locais (ICLEI) (2009).



Fluxograma 1. Etapas para o aproveitamento energético do biogás.

Fonte: Autores, 2013.

Os queimadores flare são utilizados para controlar a queima do biogás, causando sua oxidação térmica, convertendo o metano em gás carbônico, água e demais produtos resultantes da combustão (ECOGÁS, 2012).

3.6.1 Extração e tratamento do biogás do aterro

Um sistema de extração do biogás normalmente apresenta drenos horizontais e verticais, sopradores, filtros para remoção do material particulado e tanques separadores de condensado. A quantidade de drenos de extração é calculada através de ensaios de permeabilidade e extração, sendo que geralmente um dreno vertical tem um raio de influência de 30 a 40 metros. Os drenos já existentes no aterro podem ser adaptados e integrados ao sistema desde que apresentem boa vazão de biogás. A adaptação é realizada com a impermeabilização dos drenos, instalação de um cabeçote e interligação ao sistema de coleta (OLIVEIRA, 2009).

Dos drenos saem as tubulações que são ligadas a pontos de regularização do fluxo ou *manifolds* e, daí, o biogás é conduzido por uma linha principal para os sistemas de queima em flare ou para o reaproveitamento energético. A extração do biogás é realizada pela força motriz, onde o soprador gera a pressão negativa necessária. A vazão do biogás pode ser controlada diretamente por uma válvula borboleta ou indiretamente por um inversor de frequência acoplado ao motor do soprador, que regula o ponto de operação desse motor em função da pressão e mantém a vazão do processo constante.

A realização do pré-tratamento é necessária para remover partículas e líquidos, protegendo os sopradores e aumentando sua vida útil. O tratamento do gás tem início pela sua passagem em um filtro que remove o material particulado arrastado junto ao gás. Antes e após o filtro devem ser instalados vacuômetros para identificar a perda de carga e o momento de troca do elemento filtrante. Passando pelo filtro, o biogás recebe o segundo tratamento em um tanque desumidificador, que tem a função de separar os líquidos. Só depois de tratado o biogás deve ser encaminhado para a queima controlada em flare ou para o sistema de aproveitamento energético.

3.6.2 Sistema de queima em flare

Mesmo que o biogás receba aproveitamento energético é importante a instalação de um flare enclausurado. Assim, caso aconteça qualquer falha no sistema de aproveitamento, o metano não será emitido para a atmosfera.

Esse mecanismo é ainda mais importante se o projeto obtém créditos de carbono, já que as emissões podem provocar a sua perda (FIGUEIREDO, 2007).

3.6.3 Geração de energia elétrica

Após passar pelo sistema de extração e pré-tratamento, o biogás pode ser utilizado como combustível em motores ciclo Otto, microturbinas a gás ou outras tecnologias, para a geração de energia elétrica (ICLEI, 2009).

O motor ciclo Otto, é um motor de combustão interna, e apresenta maior rendimento elétrico e custo inferior em relação aos demais, e é por isso, o equipamento mais utilizado. Para sua utilização são necessárias pequenas modificações nos sistemas de alimentação, ignição e taxa de compressão. Em seu funcionamento acontece em quatro tempos, onde o motor aspira a mistura de ar-combustível, comprimi no interior dos cilindros, ocorre a combustão por centelha produzida na vela de ignição e as válvulas de escape abrem para a exaustão dos gases.

Nas microturbinas a gás, o ar aspirado é forçado para seu interior à alta velocidade e pressão, onde é misturado ao biogás e queimado na câmara de combustão. A combustão resulta em gases quentes e o calor dos gases de exaustão pode ser aproveitado para aquecimento do ar de combustão.

As turbinas a vapor são máquinas de combustão externa, que utilizam vapor d'água sob pressão e alta temperatura como fluido de trabalho. Nessas turbinas, os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluido de trabalho que escoar no interior da máquina. A energia térmica da combustão é transferida através da caldeira, para a água, que vaporiza e superaquece, sendo então expandido em uma turbina que aciona uma carga mecânica (COSTA, 2006).

Essas tecnologias apresentam um rendimento de aproximadamente 28%, além de emitir NO_x (óxidos de nitrogênio) em quantidades que variam com o porte do equipamento, porém menor nas microturbinas. As microturbinas apresentam um investimento inicial maior, alto custo de operação e manutenção e necessita de um sistema de limpeza do biogás rígido, quando comparadas aos motores ciclo Otto.

3.7 METODOLOGIAS DE MENSURAÇÃO DE GERAÇÃO DE BIOGÁS

Existem diferentes modelos numéricos desenvolvidos para o cálculo da geração de biogás em aterros sanitários. Entre eles, destacam-se as metodologias desenvolvidas pelo IPCC, Banco Mundial, Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e CETESB.

As metodologias listadas apresentam equações cinéticas de primeira ordem e consideram parâmetros de entrada semelhantes, como a massa de resíduo que ingressa no aterro anualmente, o tempo de atividade do aterro, a taxa de geração de metano e o potencial de geração de metano (BORBA, 2006).

A USEPA (1998) considera em sua metodologia a eficiência de captação do biogás, já que os sistemas não são 100% efetivos. Caso a eficiência seja desconhecida, a metodologia propõe que seja adotado o valor de 75%. Apresenta cálculos para aterros com e sem sistema de controle, além de aterros em funcionamento ou já desativados. Também leva em conta o dispositivo de controle, de acordo com a tecnologia adotada.

O Banco Mundial (2003) trás sua metodologia no “Manual para a preparação de gás de aterro sanitário para projetos de energia na América Latina e Caribe”. Esse método considera que existe uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo, propõe valor de geração de metano em relação à precipitação anual e de potencial de geração de metano em função da degradabilidade do resíduo. É aceito nas Américas do Sul e do Norte e é considerado simples de compreender e aplicar, sendo mais adequado para aterros que já não recebem lixo.

O IPCC (1996) descreve um método simplificado que supõe que o total de metano potencial gerado é liberado durante o ano em que os resíduos são dispostos; o método de decomposição obedece uma cinética de primeira ordem, que considera o processo de degradação ao longo do tempo. A metodologia sugere valores do fator de correção para o metano de acordo com o tipo de aterro; recomenda a utilização do valor 0,05 para a constante de geração de biogás se a velocidade de degradação não estiver caracterizada; sugere um valor para o carbono orgânico degradável de 12% se as frações dos resíduos não forem conhecidas; o uso de 77% para a fração do carbono orgânico degradável

assimilado, na ausência de dados; e a adoção de fator de oxidação igual a zero, além de considerar as incertezas associadas ao cálculo. Esse método considera diversas variáveis e é mundialmente aceito.

A CETESB (2006), baseada nas metodologias da USEPA e do IPCC, desenvolveu um programa computacional intitulado: “Biogás, geração e uso energético – aterro 1.0”. O software permite a elaboração de projetos, solicitando informações de identificação do empreendimento, número de drenos, como é realizado o gerenciamento do aterro, demanda de energia interna e externa do aterro, dados sobre a disposição de resíduos e outras informações. Inicialmente o programa cria uma planilha ou um gráfico com a estimativa das emissões de metano no período considerado, onde a precisão desse resultado depende da qualidade das informações fornecidas. No cálculo da quantidade de gás em potência disponível é considerada quanta energia será utilizada e a tecnologia de conversão. O programa ainda permite a realização de um projeto simplificado do sistema de coleta e tratamento do biogás, incluindo quantidades e custos dos componentes que compõem o sistema; apresenta uma análise que inclui os gastos para a geração energética, os ganhos possíveis pela venda de Créditos de Carbono, além de outras informações.

As diferenças entre os métodos normalmente são referentes a complexidade e a quantidade de dados que exigem. Os resultados obtidos com a aplicação de qualquer metodologia consistem apenas de uma análise preliminar. Todos os modelos matemáticos existentes exigem informações que podem conter erros e, portanto, não substituem a necessidade de realização de testes “in loco” (MENDES & SOBRINHO, 2007).

3.8 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO E OS CRÉDITOS DE CARBONO

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) foi instituído pelo Protocolo de Quioto como tentativa de diminuir os efeitos causados pelo efeito estufa e o aquecimento global. Trata-se de uma medida adicional de implementação que permite a redução das emissões ou o aumento da remoção de CO₂, sendo este o

único mecanismo que permite a participação de países em desenvolvimento (VANZIN, 2006).

Em países que não possuem metas de redução de gases do efeito estufa (GEE), quando uma organização diminui suas quantidades de emissão destes gases ou promove a remoção de CO₂, isso pode gerar Reduções Certificadas de Emissões. Esses certificados podem ser comercializados para países que por algum motivo não conseguiram alcançar suas metas, especificados no Protocolo de Quioto, trazendo benefício econômico para que as reduções continuem acontecendo (OLIVEIRA, 2009).

Como o gás metano possui um potencial de aquecimento global (PAG) cerca de 21 vezes maior que o de CO₂, a queima direta deste gás ou seu aproveitamento como fonte de energia se encaixa perfeitamente com as diretrizes do MDL (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, 2009). O PAG é uma das variáveis que são utilizadas na equação que faz o cálculo relativo da diminuição da tonelada equivalente de CO₂ (CO_{2EQ}) que potencialmente poderia ser emitida na forma de CH₄. Pode-se obter uma receita anual de Créditos de Carbono pela diferença das emissões equivalentes totais, as emissões fugitivas e as emissões de CO_{2EQ} que são produzidas por um motor a combustão que é utilizado para converter CH₄ em energia elétrica, multiplicada pelo preço da tonelada de CO_{2EQ} negociadas no mercado de Crédito de Carbono (IPCC, 1996).

3.9 ESTUDOS REALIZADOS DE QUANTIFICAÇÃO DO BIOGÁS

Estudos de quantificação do biogás publicados nos últimos anos apontam a viabilidade de seu aproveitamento para fins energéticos.

A Central de Tratamento de Resíduos de Caieiras – SP, por exemplo, recebe cerca de 10.000 t de resíduos diariamente, sendo que em 2008 a vazão de metano foi estimada em 28.395.784, 08 m³ ano⁻¹, com potência de 8,97 MW e energia disponível de 187,31 MWh dia⁻¹, de acordo com os cálculos baseados na metodologia do IPCC (1996). A geração é considerada suficiente para alimentar os sistemas de geração de energia elétrica (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, 2009). Estudo realizado por Figueiredo (2007) indica resultados semelhantes.

Na Central de Tratamento de Resíduos de Nova Iguaçu – RJ, os resíduos depositados diariamente giram entorno de 2.000 t. Pela metodologia do IPCC (1996), o metano gerado é de 3.750.161 m³ ano⁻¹ em 2007 (BORBA, 2006).

Já no Aterro Sanitário Municipal de Sorocaba – SP, onde são depositados mais de 400 t de resíduos por dia, a utilização dos modelos IPCC (1996) e *First Order Decay* (FOD) indicou que em 2013 a geração seria de 7.500.000 Kg de metano (OLIVEIRA, 2009).

Em 2004, o Aterro Metropolitano Santa Tecla – RS recebeu 134.746,81 toneladas de resíduos durante o ano. Isso corresponde, pelo *software Landfill Gas Emission, version 2.0*, a 9.789.589,83 m³ ano⁻¹ de metano e potência elétrica de 3,010 MW (VANZIN, 2006).

Além dos estudos citados, outras publicações demonstram a grande quantidade de metano gerado pela decomposição dos resíduos e a possibilidade de recuperação para o uso energético.

3.10 APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DE ATERROS

O aproveitamento energético do biogás proveniente de aterros sanitários já acontece em alguns lugares e em outros já existem projetos para a implantação deste sistema.

Em 2004, por exemplo, foi inaugurada a primeira usina de geração de energia elétrica a gás metano do Brasil, localizada no Aterro Sanitário de Bandeirantes – SP, com capacidade para gerar 175.000 MW ano⁻¹. Além da energia, a termoelétrica comercializa créditos de carbono, conforme o Protocolo de Kyoto (DIOGO, 2004). São Paulo conta ainda com a Usina de São João, no Aterro de São João, em funcionamento desde 2008.

No Aterro Sanitário Metropolitano de Salvador foi inaugurada em 2011 a Termoverde Salvador, que utiliza o biogás gerado para a produção de energia elétrica, que será vendida para empresas consumidoras. Além disso, a termoelétrica também vende créditos de carbono (BAHIA, 2011).

No já desativado Aterro Sanitário de Gramacho – RJ, por exemplo, uma empresa privada iniciou em 2013 um projeto de captação e purificação do biogás,

que será canalizado e bombeado até a Refinaria Duque de Caxias – RJ, da Petrobrás, suprimindo 10% de sua demanda energética durante 15 anos (TRIGUEIRO, 2013).

No Paraná, o aterro sanitário municipal de Cascavel recebeu o primeiro motor para conversão de biogás em energia elétrica no final de 2008, operando atualmente com três motores, de responsabilidade da prefeitura. Hoje, o aterro é autossuficiente na geração de energia (SANTOS & TAUCHEN, 2010).

Além das usinas citadas, existem outras em funcionamento ou com projetos. A instalação destas usinas indica o sucesso do aproveitamento do biogás de aterros sanitários para a produção de energia.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCAL E DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado no aterro sanitário do município de Francisco Beltrão – PR, localizado na linha Menino Jesus, interior do município, sob as coordenadas UTM, longitude: 298620 m E e latitude: 7118300 m S, zona 22.

O município está localizado na região Sudoeste do Paraná, sendo delimitado pelas cidades de Marmeleiro, Renascença, Bom Sucesso do Sul, Itapejara d' Oeste, Verê, Enéas Marques, Nova Esperança do Sudoeste, Ampere, Pinhal de São Bento e Manfrinópolis (SECRETARIA DO ESTADO E TURISMO, 2008). O mapa de localização e delimitação do município pode ser observado na Figura 2.

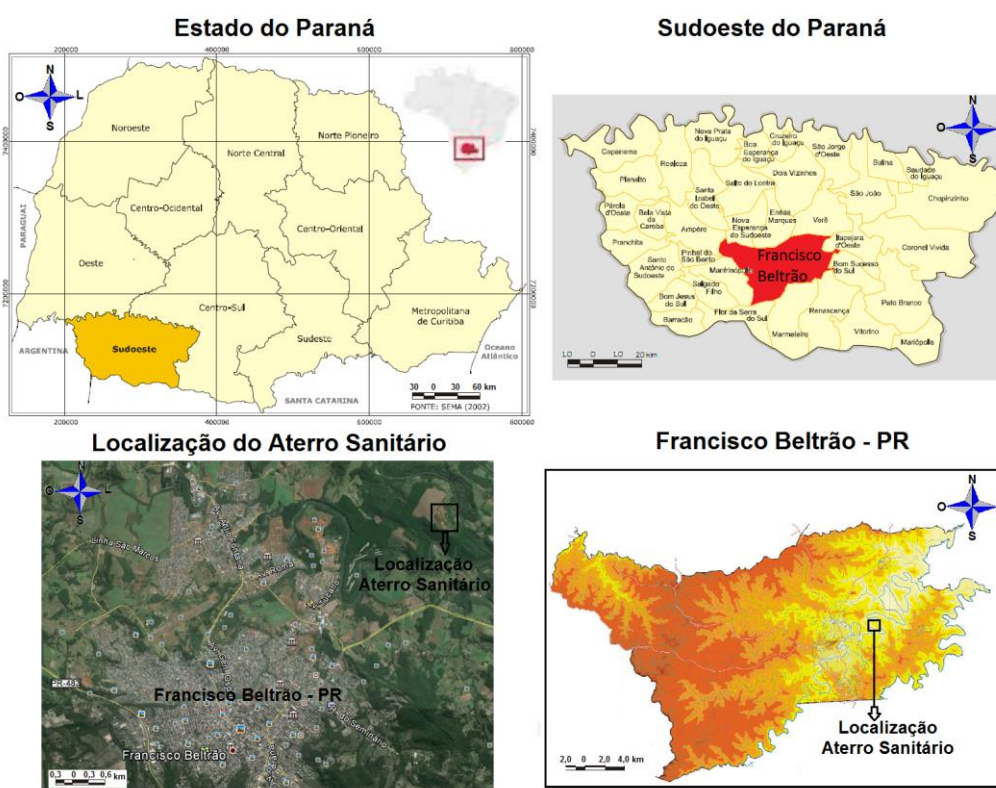


Figura 2. Localização do sudoeste do Paraná, do município de Francisco Beltrão e do aterro sanitário municipal.

Fonte: SEMA, 2002; IPARDES, 2013; Francisco Beltrão, 2006; Google Earth, 2010, adaptado.

A população de Francisco Beltrão, de acordo com o censo 2010, era de 78.957 habitantes, e desses, 67.456 fazem parte da população urbana e 11.501 fazem parte da população rural do município. Sua densidade demográfica é de 107,1 habitantes Km⁻² (IBGE, 2010).

O clima de Francisco Beltrão está classificado como Cfa (clima subtropical úmido) segundo Köppen, portanto, mesotérmico úmido, sem estação seca definida, com verões quentes e chegando a temperaturas acima de 22 °C no mês mais quente (FUNDAÇÃO ABC PESQUISA E DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO, 2013). Já a precipitação média no município varia de 2.000 a 2.500 mm ano⁻¹. O trimestre mais chuvoso corresponde aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, com uma precipitação média variando de 500 a 600 mm no trimestre; o mais seco corresponde aos meses de junho, julho e agosto, com precipitação média de 350 a 450 mm (IAPAR, 2013).

4.2 DESCRIÇÃO DO ATERRO SANITÁRIO

A estrutura do aterro é composta por drenos de gases, drenos de chorume, lagoas de tratamento de efluentes, balança rodoviária, trator de esteiras, pá carregadeira, escavadeira hidráulica e caminhão basculante. Apesar de possuir drenos de gases instalados, não há nenhuma forma de coleta para queima ou aproveitamento do biogás gerado, sendo lançado diretamente na atmosfera, sem o devido tratamento (FRANCISCO BELTRÃO, 2013).

As células de disposição dos resíduos são previamente impermeabilizadas com argila e geomembrana. Esta disposição é realizada em camadas de 2 m de altura, sendo compactado e coberto com solo diariamente.

O aterro sanitário municipal de Francisco Beltrão (Figura 3) recebe lixo de caráter domiciliar. Além do serviço de coleta de resíduos domiciliares, o município oferece a coleta seletiva de resíduos, que é realizada pela Associação de Catadores de Materiais Recicláveis, que semanalmente realiza a coleta nas residências. A coleta seletiva ocorre em todo o território urbano municipal.

Na zona rural, 27 das 69 comunidades existentes possuem pontos de entrega voluntária (PEVs) para resíduos recicláveis e rejeitos. As comunidades restantes acondicionam os resíduos na sede da comunidade para posterior coleta.

A coleta é realizada pela prefeitura por 6 caminhões compactadores no perímetro urbano e um caminhão caçamba para coleta no interior (PROGRAMA CIDADE LIMPA, 2012).



Figura 3. Delimitação do aterro sanitário de Francisco Beltrão – PR.

Fonte: Programa cidade limpa, 2012.

4.3 COLETA DE DADOS

Para obter os dados necessários para execução deste trabalho, foram aplicados os seguintes procedimentos:

- Levantamento de informações, tais como: quantidade de lixo gerado pelo município que chega ao aterro, composição gravimétrica deste lixo e características gerais do aterro.
- Análise dos documentos e projetos do aterro sanitário.
- Coleta de informações com o Responsável Técnico do aterro e a Secretaria do Meio Ambiente de Francisco Beltrão - PR.
- Imagens de satélite e levantamento fotográfico.

4.4 METODOLOGIAS PARA QUANTIFICAÇÃO DO BIOGÁS GERADO

Para o cálculo do potencial de geração de eletricidade do biogás gerado no aterro sanitário, foram utilizadas as metodologia sugeridas pelo IPCC (1996) e pelo software Biogás, geração e uso energético – aterro 1.0 (CETESB, 2006). A utilização deste software, sua reprodução e distribuição são livres.

4.4.1 Quantificação do metano gerado

De acordo com ICLEI (2009), a metodologia sugerida pelo IPCC para a quantificação do metano, consiste nas seguintes equações:

- Cálculo da fração de carbono orgânico no lixo (DOC):

$$\text{DOC} = (0,40.A) + (0,17.B) + (0,15.C) + (0,30.D) \quad (1)$$

Onde:

DOC = Fração de carbono orgânico degradável no lixo.

A = Fração de papel e papelão no lixo (%).

B = Fração de resíduos de parques e jardins no lixo (%).

C = Fração de restos de alimentos no lixo (%).

D = Fração de tecidos no lixo (%).

- Cálculo da fração de carbono orgânico do lixo que pode se decompor (DOC_f):

$$DOC_f = 0,014.T + 0,28 \quad (2)$$

Onde:

T = Temperatura na zona anaeróbia dos resíduos, estimada em 35°C.

DOC_f = Fração do DOC que pode se decompor.

- Cálculo do potencial de geração de metano do resíduo (L_0):

$$L_0 = MCF.DOC.DOC_f.F.16/12 \quad (3)$$

Onde:

L_0 = Potencial de geração de metano do resíduo (m^3 biogás.kgRSD⁻¹).

MCF = Fator de correção de metano = 1 (aterro bem gerenciado).

DOC = Fração de carbono orgânico degradável no lixo.

DOC_f = Fração do DOC que pode se decompor = 0,50 (recomendação do IPCC 2006).

F = Fração de CH₄ no biogás (geralmente a quantidade de CH₄ presente no biogás em aterro sanitário é de 50%).

16/12 = Relação de massas atômicas na conversão de carbono (C) para metano (CH₄).

- Cálculo da emissão de metano (Q):

Aterro em funcionamento:

$$Q = F.R.L_0.(1-e^{-k.t}) \quad (4)$$

Aterro desativado:

$$Q = F.R.L_0.(e^{-k.c} - e^{-k.t}) \quad (5)$$

Onde:

Q = Emissão de metano ($m^3CH_4 \text{ ano}^{-1}$).

F = Fração de metano no biogás (%).

k = Constante de decaimento.

R = Fluxo de resíduo no ano (t_{RSD}).

L_0 = Potencial de geração de biogás ($m^3\text{biogás } t_{RSD}^{-1}$).

c = Tempo decorrido desde o fechamento do aterro (anos).

t = Tempo decorrido desde a abertura do aterro.

De acordo com (IPCC, 2006 apud ICLEI, 2009), o valor de k para clima tropical – resíduo úmido – pode variar da seguinte forma:

- Para papel, k = 0,07.
- Para resíduos orgânicos, k = 0,17.
- Para resíduos têxteis, k = 0,07.
- Para resíduos de jardinagem, k = 0,17.
- Valor médio de k = 0,12.

- Cálculo do fluxo de resíduos no ano (R):

$$R = [(RSD).(N_{hab}).(\text{dias no ano}).(\% \text{ aterro})] \quad (6)$$

Onde:

RSD = Resíduos sólidos gerados por cada habitante por dia (Kg).

N_{hab} = Número de habitantes estimado para cada ano.

% aterro = Porcentagem de resíduos destinados no aterro.

- Estimativa de número de habitantes (P) (NEBEL & WRIGHT, 1993):

$$P = P_0.e^{r.t} \quad (7)$$

Onde:

P = População prevista para um determinado ano.

P_0 = População atual.

r = Taxa de crescimento (%).

t = Número de anos de extrapolação.

O software Biogás, geração e uso energético – aterro 1.0 (CETESB, 2006), considera as seguintes particularidades para seu correto funcionamento:

- Características do aterro.
- Estimativa de geração de biogás no aterro – entrada de dados.
- Estimativa de geração de biogás no aterro – resultados.
- Energia disponível e estimativa de uso.
- Escolha da tecnologia de uso energético.
- Dimensionamento simplificado do preço de uso do biogás.
- Preço da tonelada de Dióxido de Carbono.
- Geração, impressão e armazenamento do relatório.

Para a estimativa de geração do metano calculado através deste software, utiliza-se a seguinte equação:

$$\sum Q_x = K.L_0. \sum (R_x.e^{-k(x-T)}) \quad (8)$$

Onde:

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

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

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).

4.4.2 Determinação da potência e energia elétrica disponível

Para a determinação da potencia elétrica disponível, será utilizado o método sugerido pela CETESB (CETESB, 2006 apud DOMINGUES & SILVA, 2008), conforme a equação a seguir:

$$P_x = [(Q.P_c(CH_4)/31.536.000).E_c.(k/100)] \quad (9)$$

Onde:

P_x = Potência disponível por ano (KW ano⁻¹).

Q = Vazão do CH₄ por ano (m³ ano⁻¹).

P_c = Poder calorífico do CH₄ por ano = 35,53.10⁶ J m⁻³.

31.536.000 = quantidade de segundos por ano (s ano⁻¹).

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

k = 1000.

A metodologia do IPCC (1996) sugere o cálculo da energia elétrica disponível, conforme pode ser observado na equação abaixo:

$$E = P.Rend.\Delta t \quad (10)$$

Onde:

E = Energia disponível por ano (KWh ano⁻¹).

P = Potência disponível por ano (KW ano⁻¹).

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

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

4.4.3 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 (GITMAN & MADURA, 2003).

Para calcular o fluxo de caixa, soma-se as receitas e subtrai as despesas, conforme Equação 11 (GITMAN & MADURA, 2003).

$$FC = \text{Receitas} - \text{Despesas} \quad (11)$$

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 & MADURA, 2003).

A Equação 12 é utilizada para o cálculo do *payback* descontado e a Equação 13, para o cálculo do VPL.

$$\textit{Payback} \text{ descontado} = FC / (1 + K)^n \quad (12)$$

Onde:

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

K = Taxa de desconto (%).

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

$$VPL = [FC / (1 + K)^n] - I_0 \quad (13)$$

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).

I_0 = Investimento inicial (R\$).

4.4.4 Potencial de créditos de carbono

De acordo com ICLEI (2009), a implantação de projetos de aproveitamento energético a partir do biogás, contribui com a redução das emissões de gases do efeito estufa, pois a queima do biogás transforma o metano em dióxido de carbono e vapor d'água. Essa redução do potencial de efeito estufa possibilita que projetos como este se enquadre no MDL e gere créditos de carbono. A metodologia sugerida para a quantificação da tonelada de carbono equivalente consiste na seguinte equação (IPCC, 1996 apud DOMINGUES & SILVA, 2008):

$$CO_{2Eq} = Q_{CH_4} \cdot d_{CH_4} \cdot PAG \quad (14)$$

Onde:

CO_{2Eq} = Quantidade de CO_2 equivalente (ton. de CO_2).

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

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

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

ICLEI (2009) comenta que a tonelada de carbono foi negociada pela Bolsa Mercantil e de Futuros do Brasil, em 2007, a um preço médio de R\$ 33,60 por tonelada equivalente de carbono. Para obter o rendimento anual equivalente a venda de créditos de carbono, a quantidade anual de carbono equivalente é multiplicada pelo preço médio equivalente de venda.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERÍSTICAS DO ATERRO, GERAÇÃO DE RESÍDUOS E COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

A análise dos documentos, juntamente com as visitas realizadas e as informações repassadas pelo engenheiro ambiental responsável pelo local, possibilitaram a reunião das informações necessárias para a realização dos cálculos, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Principais informações coletadas.

Principais informações coletadas	Fonte	
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% (Figura 8).	Programa Cidade Limpa, 2012.
Geração de resíduos sólidos	1.740.000 kg mês ⁻¹	Programa Cidade Limpa, 2012.
Resíduos depositados no aterro	1.440.000 kg mês ⁻¹	Programa Cidade Limpa, 2012.
Produção per capita de resíduos	0,735 kg habitante ⁻¹ dia ⁻¹	Programa Cidade Limpa, 2012.
Número de habitantes no município	78.943 habitantes	IBGE, 2010.
Porcentagem de resíduos depositados no aterro	82,759%	Programa Cidade Limpa, 2012.
Início da operação do aterro	2001	Engenheiro responsável.
Início da operação da célula	Célula 1: 2001 Célula 2: 2009 Célula atual: 2013	Engenheiro responsável.
Previsão de fechamento do aterro	2030	Engenheiro responsável.
Área total do aterro	19,36 hectares	Engenheiro responsável.
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	Engenheiro responsável.

(continua)

(conclusão)

Principais informações coletadas		Fonte
Número de drenos de gás	Célula 1: 20 drenos Célula 2: 12 drenos Célula atual: 11 drenos Célula atual após ampliação: 38 drenos	Visitas no local. Engenheiro responsável.
Uso de energia elétrica mensal do aterro	3.500 kWh mês ⁻¹	Engenheiro responsável
Distâncias	Bairro mais próximo: 2.350 m Indústria mais próxima: 2.475 m Rio mais próximo: 250 m	Google Earth, 2010.

Fonte: Autores, 2013.

De acordo com dados fornecidos pelo responsável técnico do aterro sanitário e pela Secretaria de Meio Ambiente do município de Francisco Beltrão – PR, o mesmo foi instalado no ano de 2000, porém entrou em operação somente em 2001, abrangendo uma área de 19,36 ha, totalmente isolada, que impossibilita a entrada de animais e pessoas estranhas. O aterro tem vida útil projetada para receber resíduos até o ano de 2030 (PROGRAMA CIDADE LIMPA, 2012).

No início da 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 (Figura 4). O lixo era compactado com um trator de esteiras e adicionado uma cobertura de solo para que não ficasse exposto a céu aberto. Esta célula possui 20 drenos instalados para coleta do biogás, em 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 (Figura 4). Esta célula possui 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 possui 12 drenos de gases instalados. O chorume é 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 (Figura 4). Apresenta impermeabilização do solo, drenos de gases e tratamento do chorume. A mesma esta 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.

De acordo com o engenheiro responsável, 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. A situação atual do aterro e a ampliação prevista podem ser visualizadas na Figura 4.

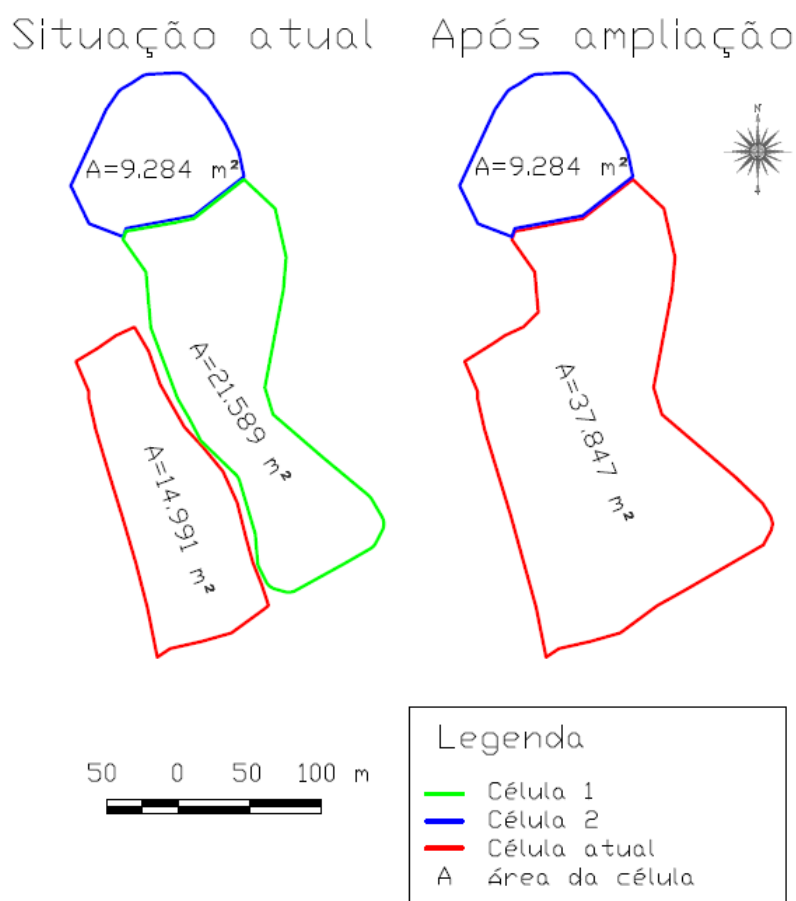


Figura 4. Delimitação das células do aterro sanitário.

Fonte: Autores, 2013.

Segundo o mesmo engenheiro, está prevista a instalação de um dreno de gás para cada 1.000 m². Portanto, após a ampliação prevista, a célula atual contará com aproximadamente 38 drenos de gases.

O lote onde se encontra o aterro sanitário está a uma distância de aproximadamente 250 m do Rio Marrecas e 2.450 m do bairro mais próximo (Figura 5). Apesar de o Rio Marrecas ser responsável pelo abastecimento de água do município de Francisco Beltrão – PR, o aterro encontra-se a jusante do ponto de captação, portanto, não interferindo diretamente neste serviço.

De acordo com o Instituto Ambiental do Paraná (s/d), para uma área comportar um aterro sanitário, o mesmo deve estar fora da área de influência direta do manancial de abastecimento, no mínimo 200 m distante de rios e nascentes, além de 1.500 m longe de núcleos populacionais. Portanto, o aterro em estudo atende os critérios exigidos com relação aos aspectos locacionais.

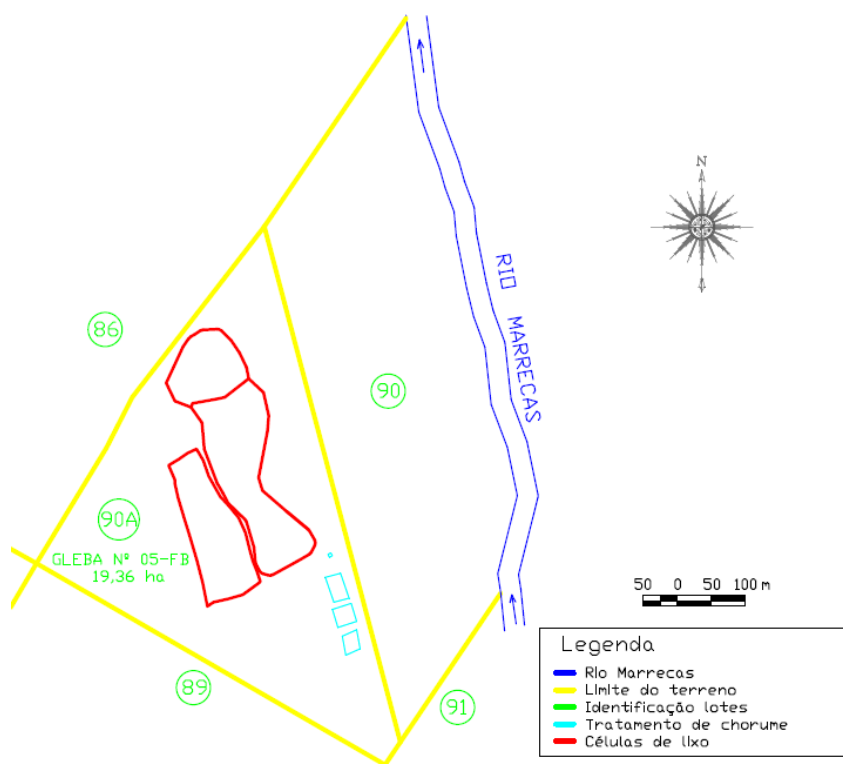


Figura 5. Localização do aterro sanitário.

Fonte: Francisco Beltrão, 2012, adaptado.

Atualmente no aterro são dispostos diariamente 60.000 kg de resíduos sólidos, seis dias por semana, chegando mensalmente a um total de 1.440.000 kg. 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 resíduos sólidos mensais. Deste total, 82,759% são depositados no aterro. A geração per capita no município chega a 0,735 kg hab⁻¹dia⁻¹ (PROGRAMA CIDADE LIMPA, 2012). Segundo ABRELPE (2012), na região Sul, a geração de resíduos sólidos urbanos per capita é 0,905 kg hab⁻¹ dia⁻¹, ficando próximo ao encontrado em Francisco Beltrão – PR.

Os dados referentes a composição gravimétrica dos resíduos podem ser visualizados no Gráfico 4.

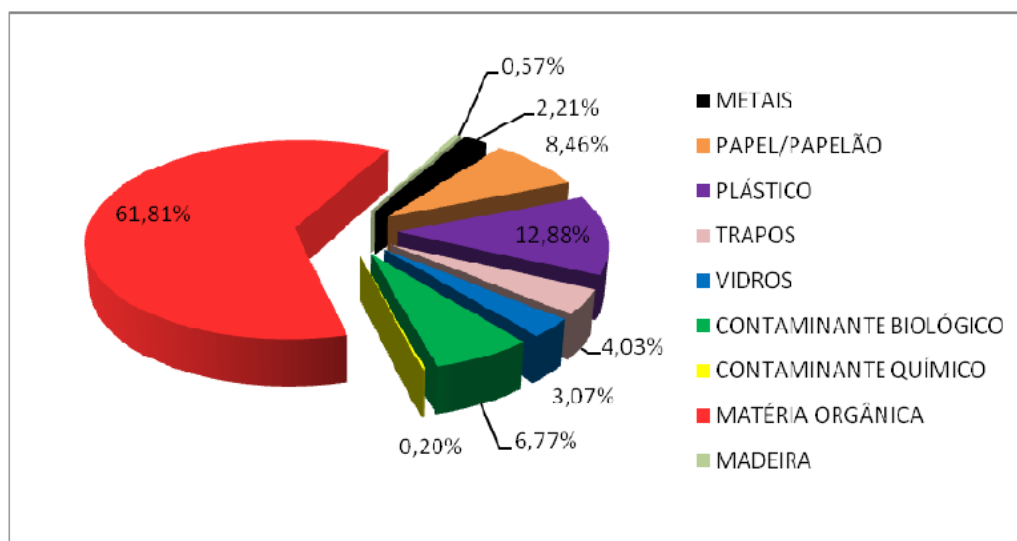


Gráfico 4. Composição gravimétrica dos resíduos destinados no aterro sanitário de Francisco Beltrão.

Fonte: Programa Cidade Limpa, 2012.

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% (Gráfico 4). 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.

A partir dos dados coletados realizaram-se os cálculos de mensuração da vazão de metano da célula atual, considerando a ampliação prevista.

5.2 ESTIMATIVA DO METANO GERADO

Para estimar as emissões de metano e o potencial de energia elétrica disponível através do software Biogás, geração e uso energético – Aterro 1.0 (1996), existe a necessidade de alimentá-lo com todas as informações necessárias. Para a realização desta estimativa, considerou-se a ampliação prevista da célula atual. Os dados fornecidos ao software estão apresentados no Quadro 2.

Principais informações adicionadas		Fonte
Características do aterro		
Nome da unidade	Aterro sanitário de Francisco	Autores.
Endereço	Linha Menino Jesus	
Cidade	Francisco Beltrão	
Estado	Paraná	
Distância do bairro mais próximo	2.350 m	Google Earth, 2010.
Área do aterro	37.847 m	Engenheiro responsável.
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	Autores.
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 k ⁻¹	Software Biogás, 2006.
Potencial de geração de biogás (Lo)	0,12 m ³ CH ₄ kg ⁻¹	
Ano de abertura do aterro	2013	Engenheiro responsável.
Ano de fechamento do aterro	2030	
Taxa de crescimento populacional	1,12 %	Autores.
População atual	82.560 habitantes	Autores.
Taxa de geração de resíduos	0,27 t hab ⁻¹ ano ⁻¹	Programa Cidade Limpa, 2012.
Taxa de coleta de resíduos	82,76 %	Programa Cidade Limpa, 2012.
Estimativa de geração de biogás no aterro – resultados		
Linha de base de queima	20 %	Software Biogás, 2006.
Energia elétrica evitada	0,2782 tCO ₂ MWh _{evit} ⁻¹	
Eficiência de coleta de biogás	75 %	
Eficiência de queima de biogás	95 %	
Energia disponível e estimativa de uso		

Gás utilizado	0 m ³ CH ₄ mês ⁻¹	Software Biogás, 2006.
Rendimento de conversão energética	33 %	
Potência útil desejada	300 kW	Autores. Software Biogás, 2006.
Energia elétrica para venda	194.500 kWh mês ⁻¹	
Escolha da tecnologia de uso energético		
Custo grupo gerador Otto nacional	1.000 R\$ kW _{instalado} ⁻¹	Software Biogás, 2006.
Potência elétrica	300 kW	Autores
Dimensionamento simplificado do projeto de uso de biogás		
Quantidade de queimadores	1	Software Biogás, 2006
Custo por queimador	R\$ 200.000,00	
Custo compressão	500 R\$ m ⁻³ h ⁻¹	
Volume gasômetro	100 m ³	
Custo do gasômetro	90 R\$ m ⁻³ h ⁻¹	
Custo purificação H ₂ O filtro coalescente	0,010 R\$ m ⁻³ h ⁻¹	
Custo purificação H ₂ S/Siloxina	0,010 R\$ m ⁻³ h ⁻¹	
Custo purificação CO ₂	0,010 R\$ m ⁻³ h ⁻¹	
Custo drenos	1.000 R\$ unidade ⁻¹	
Tubulação de coleta	250 R\$ unidade ⁻¹	
Preço da tonelada de dióxido de carbono		
Preço da tonelada de dióxido de carbono	34 R\$ tCO ₂ ⁻¹	ICLEI, 2009

Quadro 2. Dados fornecidos ao software para estimativa do metano gerado e potência elétrica disponível.

Fonte: Autores, 2013.

De acordo com os resultados apresentados pelo software Biogás, geração e uso energético – aterro 1.0 (CETESB, 2006), o fluxo anual de resíduos é de 20.089 t ano⁻¹. Os valores sugeridos pelo mesmo para a constante de decaimento (k) e o potencial de geração de metano do biogás (L₀) são de 0,08 k⁻¹ e 0,12 m³CH₄ kgRSD⁻¹, respectivamente.

Para estimar o metano gerado através da metodologia do IPCC (1996), o primeiro fator calculado foi a fração de carbono orgânico degradável existente no resíduo (DOC). Neste cálculo foram utilizados os valores da composição gravimétrica dos resíduos, conforme o Gráfico 4, com 8,46% para a fração de papel e papelão (A), 61,81% para a fração de resíduos de parques e jardins e restos de alimentos no lixo (B+C) e 0,57% para a fração de tecidos no lixo (D). Estes dados foram utilizados por se tratarem do registro mais atual referente a composição dos resíduos e, principalmente, por serem específicos do aterro em estudo. O valor encontrado para a fração de carbono orgânico degradável no lixo (DOC) foi de 0,134446.

O valor encontrado para a fração de carbono orgânico que pode se decompor (DOC_f) foi de 0,77. Como no aterro não existem dispositivos para a medição *in loco* da temperatura na zona onde ocorre o processo de decomposição do resíduo, levou-se em consideração que a temperatura na zona de degradação anaeróbica pode variar entre 30 e 40°C (BORBA, 2006), sendo adotada para os cálculos o valor médio de 35°C.

O potencial de geração de metano do resíduo (L_0) foi de 0,069156 kg CH_4 kgRSD⁻¹. Contudo, considerando que a densidade do CH_4 (0°C e 1,013 bar) é de 0,0007168 t m⁻³, têm-se um valor de L_0 igual a 96,2829 m³ CH_4 tRSD⁻¹. Esses valores foram obtidos levando-se em consideração as recomendações do IPCC (1996), onde o fator de correção de metano (MCF) para aterro sanitário é igual a 1,0 e a fração de metano no biogás, em média, é de 50%. Utilizou-se um valor médio da fração de metano no biogás devido a impossibilidade de se fazer a medição da emissão deste gás *in loco*.

O Quadro 3 apresenta os valores adotados para cada variável na estimativa da geração de metano.

Variável	Valor utilizado
Fração de carbono orgânico no lixo – DOC	0,1344
Fração de carbono orgânico que pode se decompor – DOC_f	0,7700
Potencial de geração de metano do resíduo – L_0	96,2829 m ³ CH_4 tRSD ⁻¹
Fator de correção do metano – MCF	1,0000
Fração de metano no biogás – F	50%
Constante de decaimento – k	0,1150

Quadro 3. Variáveis utilizadas para o cálculo da geração de metano pela metodologia do IPCC (1996).

Fonte: Autores, 2013.

Os valores encontrados para DOC, DOC_f e L_0 são semelhantes aos observados em estudos realizados na Central de Tratamento de Resíduos de Caieiras – SP (PECORA; FIGUEIREDO; COELHO & VELÁZQUEZ, 2008; FIGUEIREDO, 2007). Isso aconteceu por que a maioria das variáveis utilizadas nos cálculos destes fatores não diferiram muito, sendo apenas a composição gravimétrica uma característica mais específica para cada aterro.

Os anos adotados para os cálculos de emissão de metano (Q) no aterro variaram de 2013 a 2030, ou seja, ano em que a célula atual entrou em funcionamento e ano de desativação do aterro. Após este período, foram realizados os cálculos de cinco em cinco anos, até 2050, para analisar a tendência dos resultados.

O valor da constante de decaimento (k) utilizado foi de 0,115 (IPCC, 2006), já a produção per capita de resíduos por dia foi de 0,735 kg RSD hab⁻¹ dia⁻¹ e a porcentagem de resíduos que vai para o aterro foi de 82,759% (Tabela 4). Na estimativa do R foram considerados ainda os anos bissextos, numa tentativa de obter dados mais próximos aos reais. A taxa de crescimento da população foi calculada com base nos dados de população do IBGE (2010) para os anos de 2010 e 2012.

A Tabela 5 apresenta os resultados de emissão de metano estimada pelo software e pelo método do IPCC (1996) conforme a previsão de população e o fluxo de resíduos depositados a cada ano.

Tabela 5. Estimativa de população, fluxo de resíduos e emissão de metano através da metodologia do IPCC (1996) e pelo software Biogás (2006), entre 2013 e 2050.

Ano	População (habitantes)		Fluxo de resíduos - R (toneladas)		Emissão de metano - Q (m ³ CH ₄ ano ⁻¹)	
	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)
2013	81.604	81.646	18.125,852	18.243,866	94.794	175.000
2014	82.560	82.560	18.330,112	18.448,197	181.311	339.000
2015	83.490	83.485	18.536,592	18.654,817	260.378	492.000
2016	84.430	84.420	18.774,387	18.863,751	333.256	635.000
2017	85.381	85.365	18.956,435	19.075,025	399.071	769.000
2018	86.343	86.321	19.170,020	19.288,665	459.982	895.000
2019	87.315	87.288	19.385,825	19.504,698	516.017	1.014.000
2020	88.299	88.266	19.658,005	19.723,151	569.220	1.125.000
2021	89.293	89.254	19.824,984	19.944,050	615.374	1.230.000
2022	90.299	90.254	20.048,338	20.167,423	659.552	1.329.000
2023	91.316	91.265	20.274,134	20.393,299	700.553	1.423.000
2024	92.344	92.287	20.558,543	20.621,704	740.726	1.511.000
2025	93.385	93.321	20.733,497	20.852,667	774.309	1.595.000
2026	94.436	94.366	20.966,842	21.086,217	807.613	1.675.000
2027	95.500	95.423	21.203,073	21.322,382	838.877	1.751.000
2028	96.576	96.491	21.500,713	21.561,193	870.687	1.823.000
2029	97.663	97.572	21.683,305	21.802,678	896.091	1.892.000
2030	98.763	98.665	21.927,529	22.046,868	922.418	1.959.000
2031	-	-	19.981,010*	20.088,925*	749.224	1.808.000
2035	-	-	19.981,010*	20.088,925*	472.973	1.313.000

(continua)

(conclusão)

Ano	População (habitantes)		Fluxo de resíduos - R (toneladas)		Emissão de metano - Q (m ³ CH ₄ ano ⁻¹)	
	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)
2040	-	-	19.981,010*	20.088,925*	266.144	880.000
2045	-	-	19.981,010*	20.088,925*	149.761	590.000
2050	-	-	19.981,010*	20.088,925*	84.271	389.000

* Média dos resíduos depositados durante os anos de funcionamento do aterro.

Fonte: Autores, 2013.

Conforme observado na Tabela 5, o crescimento populacional aumenta o fluxo de resíduos e conseqüentemente a geração de metano, de 2013 a 2030, anos em que o aterro sanitário esta em funcionamento. A menor taxa de geração, durante a deposição de resíduos, acontece no primeiro ano e a maior no último ano. Com o fechamento do aterro, a geração do metano se dá somente pela decomposição dos resíduos já depositados no local, acontecendo assim um decréscimo na sua geração.

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 (Gráfico 5).

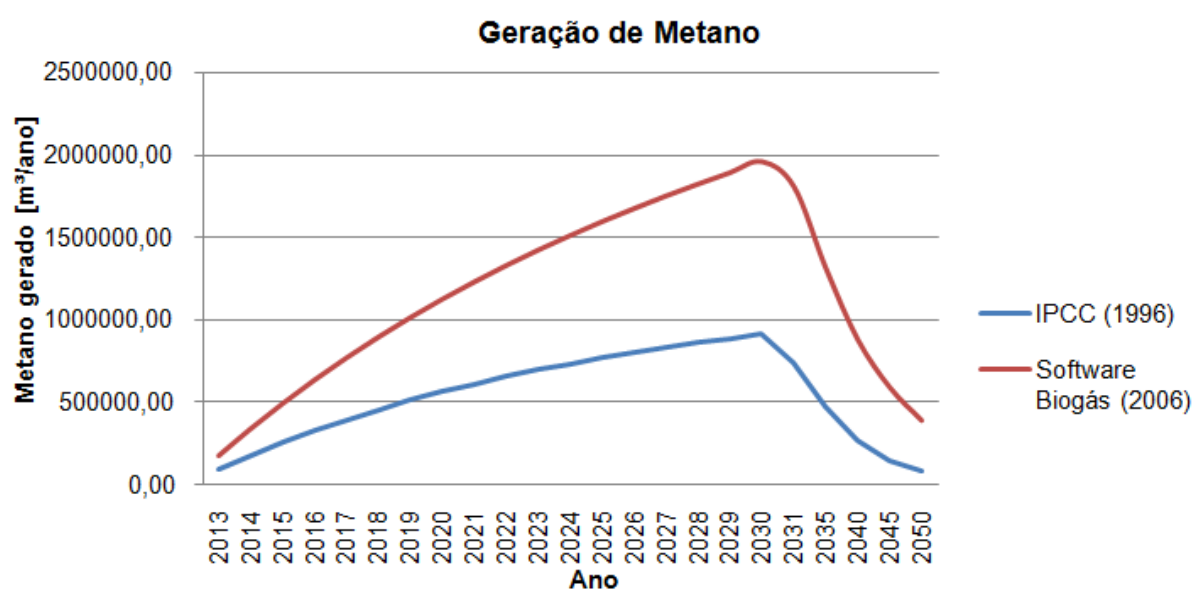


Gráfico 5. Curva estimativa da geração de metano para os anos entre 2013 e 2050.

Fonte: Autores, 2013.

A estimativa da população e o fluxo de resíduos estão muito próximos nas duas metodologias estudadas. Porém, a emissão de metano foi bastante diferente nos dois casos, conforme pôde ser visualizado no Gráfico 5. Esta diferença pode ter ocorrido devido a utilização de alguns dados sugeridos pelo programa, diferente dos calculados pela metodologia do IPCC (1996). Exemplo disso é a constante de decaimento (k) e o fator de geração do metano do biogás (L_0), onde os valores calculados segundo IPCC (1996) foram de, respectivamente, $0,115 \text{ k}^{-1}$ e $0,096 \text{ m}^3\text{CH}_4 \text{ kgRSD}^{-1}$, enquanto que os utilizados pelo software foram de $0,08 \text{ k}^{-1}$ e $0,12 \text{ m}^3\text{CH}_4 \text{ kgRSD}^{-1}$.

Os valores de geração de metano estimados no presente estudo são, em média, inferiores aos observados em estudos semelhantes no Brasil. Nos aterros de Caieiras - SP, Nova Iguaçu – RJ, Sorocaba – SP e de Santa Tecla – RS, por exemplo, a geração de metano é superior a $1.000.000 \text{ m}^3\text{CH}_4 \text{ ano}^{-1}$ já nos primeiros anos. Esta diferença acontece principalmente porque a quantidade de resíduos depositados nestes aterros é bem superior, sendo de $10.000 \text{ t dia}^{-1}$, 780 t dia^{-1} , 400 t dia^{-1} e 950 t ano^{-1} , respectivamente (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, 2009; BORBA, 2006; OLIVEIRA, 2009; VANZIN, 2006). Já o aterro de Francisco Beltrão – PR recebe apenas 60 t dia^{-1} .

No aterro de Caieiras – SP, a estimativa de geração de metano para o ano de 2008 foi proporcionalmente de $2.840 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{ano}^{-1}$ por tonelada diária de resíduos depositados. Já no aterro de Francisco Beltrão, no ano de 2013, essa proporção chegou a $1.580 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{ano}^{-1}$ por tonelada diária de resíduos, obtido pela metodologia do IPCC (1996), e $2.917 \text{ m}^3\text{CH}_4.\text{ano}^{-1}$ por tonelada diária, calculado pelo Software Biogás (2006). Isso mostra que a geração de metano no aterro de Francisco Beltrão, é proporcionalmente próximo ao encontrado em Caieiras – SP.

Mesmo apresentando valores menores de geração de metano em comparação a outros aterros, isso não significa afirmar que a geração de metano será insuficiente para a produção de energia.

5.3 ESTIMATIVA DA POTÊNCIA E DA ENERGIA ELÉTRICA DISPONÍVEIS

Para o cálculo da potência elétrica (P_x) pela metodologia do IPCC (1996) foram utilizados os valores de emissão de metano da Tabela 5. O valor do poder calorífico do metano (P_c) e o da eficiência de coleta de gases (E_c) utilizados foram de $35,53.10^6 \text{ J m}^{-3}$ e de 75%, respectivamente (CETESB, 2006). A eficiência de coleta de gases precisa ser considerada uma vez que nem todo biogás gerado será aproveitado, devido as perdas no próprio sistema de coleta e transporte, chamadas de emissões fugitivas.

Já para o cálculo da energia disponível (E), foram utilizados os valores encontrados para P_x , levando em consideração que o motor opera 24 h dia⁻¹, ou seja, que o sistema vai funcionar de forma ininterrupta. Considerou-se um rendimento de 87% para o motor operando a plena carga. Esse rendimento foi adotado em trabalhos semelhantes, como no aterro de Caieiras – SP, e se refere a eficiência da geração de energia mediante ao gerador acoplado ao motor a combustão (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, 2009).

Pelo uso do software Biogás (2006), os valores de potência e energia disponíveis são dados automaticamente, de acordo com as variáveis de entrada fornecidas no Quadro 2.

A máquina escolhida para geração de energia elétrica foi o motor ciclo Otto, pois o mesmo apresenta maior rendimento elétrico e custo inferior em relação as demais tecnologias, além de ser o equipamento mais utilizado para aproveitamento de biogás de aterros (ICLEI, 2009).

Os valores de potência e energia disponível são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6. Potência e energia disponível para os anos de 2013 a 2050.

Ano	Potência - P_x (kW)		Energia disponível - E [kWh dia ⁻¹]	
	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)
2013	80	148	1.672	3.256
2014	153	286	3.199	6.292
2015	220	416	4.594	9.152
2016	282	537	5.880	11.814
2017	337	650	7.041	14.300
2018	389	757	8.116	16.654

(continua)

(conclusão)

Ano	Potência - P _x (kW)		Energia disponível – E [kWh dia ⁻¹]	
	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)
2019	436	857	9.104	18.854
2020	481	951	10.043	20.922
2021	520	1.039	10.857	22.858
2022	557	1.123	11.637	24.706
2023	592	1.202	12.360	26.444
2024	626	1.277	13.069	28.094
2025	654	1.348	13.661	29.656
2026	682	1.415	14.249	31.130
2027	709	1.480	14.801	32.560
2028	736	1.541	15.362	33.902
2029	757	1.599	15.810	35.178
2030	779	1.655	16.275	36.410
2031	633	1.528	13.219	33.616
2035	400	1.109	8.345	24.398

Fonte: Autores, 2013.

Assim como na geração de metano, a estimativa da potência e de energia elétrica disponíveis (Tabela 6) seguem a mesma tendência, aumentando com o passar dos anos, até 2030, quando começa a declinar. Isso acontece por que a potência elétrica depende, entre outros fatores, da geração de metano, e a energia disponível, por sua vez, depende da potência estimada. A diferença existente para a potência e energia disponível obtida entre os dois métodos, está relacionada as vazões distintas de metano estimadas pelos mesmos. Os Gráficos 6 e 7 permitem a visualização da curva de potência e de energia, respectivamente.

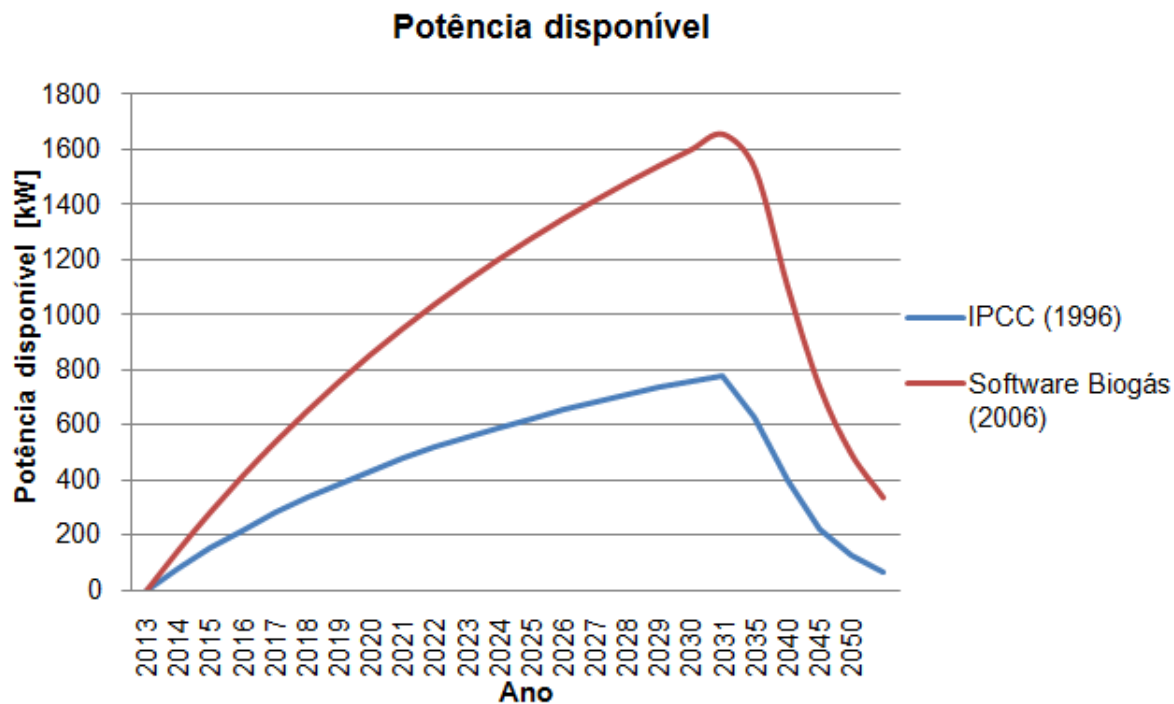


Gráfico 6. Curva estimativa da potência disponível para os anos entre 2013 e 2050.

Fonte: Autores, 2013.

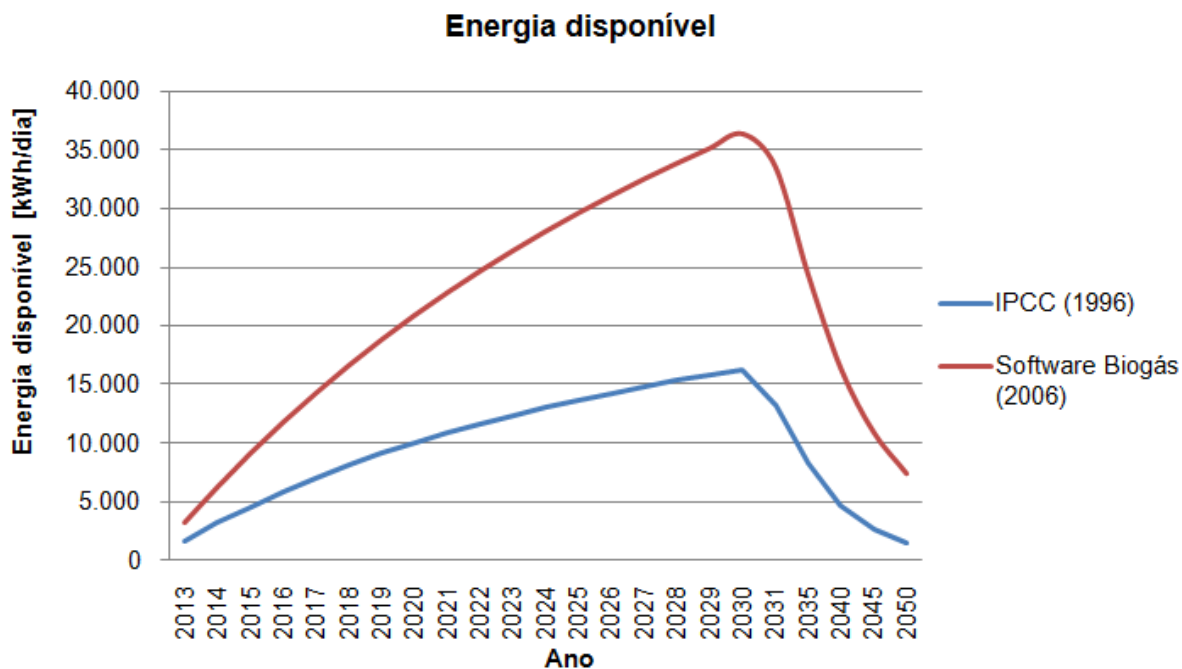


Gráfico 7. Curva estimativa da energia disponível para os anos entre 2013 e 2050.

Fonte: Autores, 2013.

Como já era esperado, na comparação com os aterros de Caieiras - SP, Nova Iguaçu – RJ, Sorocaba – SP e de Santa Tecla – RS, a potência e a energia disponível apresentam valores inferiores em Francisco Beltrão – PR, da mesma forma que aconteceu com o metano gerado (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, 2009; BORBA, 2006; OLIVEIRA, 2009; VANZIN, 2006). A justificativa é a mesma: por se tratar de um aterro menor, recebe menos resíduos e gera menos biogás. Com menos combustível, conseqüentemente a potência e a energia elétrica disponíveis serão menores.

Por outro lado, considerando que a intenção inicial era ter energia suficiente para suprir a demanda do próprio aterro, percebe-se que o biogás gerado é mais do que suficiente para tal finalidade. Sabendo que o consumo médio mensal do aterro sanitário é de 3.500 kWh mês⁻¹ (Tabela 4), que equivale a aproximadamente 117 kWh dia⁻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 ou a venda para a rede de distribuição.

5.4 CRÉDITO DE CARBONO E RENDIMENTO PELA VENDA

Para o cálculo do potencial de crédito de carbono, pela metodologia do IPCC (1996), foram considerados: o volume de metano gerado (Tabela 5), a densidade do metano, $0,7167 \times 10^{-3} \text{ t m}^{-3}$, e o potencial de aquecimento global, 21 vezes maior que o dióxido de carbono. O rendimento anual da venda do crédito de carbono também foi estimado, com o valor de R\$ 33,60 por tonelada de carbono equivalente (tCO_{2Eq}), valor mais atual encontrado (ICLEI, 2009).

Para o cálculo utilizando o software, empregou-se um valor de R\$ 34,00 por tonelada de carbono, pois o mesmo não aceitava casas decimais para este campo, sendo necessário arredondar.

A estimativa da quantidade de carbono equivalente foi realizada considerando a queima de todo o metano coletado, tanto para a geração de eletricidade e quanto pela queima em flare.

Os resultados obtidos para a quantidade de carbono equivalente e rendimento anual pela venda estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. 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	Quantidade de carbono equivalente – CO _{2Eq} (t CO ₂)		Rendimento anual (R\$)	
	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)	IPCC (1996)	Software Biogás (2006)
2013	1.426,722	2.205,40	47.937,87	74.983,69
2014	2.728,863	4.272,18	91.689,81	145.254,12
2015	3.918,869	6.200,33	131.674,00	210.811,29
2016	5.015,729	8.002,46	168.528,48	272.083,67
2017	6.006,302	9.691,17	201.811,75	329.499,75
2018	6.923,048	11.279,06	232.614,40	383.488,01
2019	7.766,337	12.778,73	260.948,92	434.476,92
2020	8.567,166	14.177,59	287.856,78	482.038,00
2021	9.261,812	15.500,00	311.196,89	527.000,00
2022	9.926,722	16.747,76	333.537,85	569.424,00
2023	10.543,817	17.926,91	354.272,25	609.515,00
2024	11.148,448	19.043,03	374.587,86	647.463,00
2025	11.653,892	20.101,26	391.570,77	683.443,00
2026	12.155,138	21.106,38	408.412,63	717.617,00
2027	12.625,688	22.062,82	424.223,12	750.136,00
2028	13.104,456	22.974,59	440.309,72	781.136,00
2029	13.486,803	23.845,47	453.156,59	810.746,00
2030	13.883,043	24.678,94	466.470,24	839.084,00
2031	11.276,350	22.781,53	378.885,36	774.572,00
2035	7.118,575	16.546,82	239.184,13	562.591,91
2040	4.005,657	11.090,02	134.590,07	377.060,84
2045	2.254,003	7.435,36	75.734,49	252.802,15
2050	1.268,338	4.902,29	42.616,17	166.678,03

Fonte: Autores, 2013.

Com a Tabela 7 observa-se que a quantidade de carbono equivalente, pode gerar um rendimento anual bastante significativo. Segundo a metodologia do IPCC (1996) os valores seriam de R\$ 47.937,87 no primeiro ano e alcançando R\$ 466.470,24 no ano de 2030. Pelo software Biogás (2006), os valores seriam de R\$ 74.983,69 para o primeiro ano e R\$ 839.084,00 em 2030. Ao encerrar a disposição de resíduos, os resultados começam a decair. A diferença nos valores da quantidade de carbono equivalente entre os métodos, está relacionada a diferença na estimativa de metano gerado entre eles.

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.

5.5 RETORNO DO INVESTIMENTO

O cálculo do retorno do investimento foi realizado somente para os resultados obtidos pelo software Biogás, geração e uso energético - aterro 1.0 (CETESB, 2006), pois este traz valores relacionados ao investimento inicial e custo da produção da energia elétrica.

Para determinar o tempo necessário para o retorno do investimento, utilizou-se o cálculo do *payback* descontado, pois o mesmo traz o fluxo de caixa a valor presente, considerando o valor do dinheiro no tempo.

O motor de ciclo Otto escolhido tem a potência nominal de 300 kW, pois devido a estimativa de potência realizada pelo software Biogás (2006), a potência máxima disponível, considerando a eficiência do motor de 33%, é 547 kW, porém somente seria possível aproveitar essa potência em 2030, que é o ano de maior produção do biogás. O valor médio da potência disponível entre os anos de 2013 a 2050 é 312 kW, portanto optou-se por um motor de ciclo Otto com potência comercial mais próxima deste valor. De acordo com NREL/TP (2003), as potências comerciais próximas ao valor encontrado são 100 kW, 300 kW e 1.000 kW. Portanto optou-se pelo motor de 300 kW.

Com isso, o aproveitamento só poderá iniciar no ano de 2020, estendendo-se até 2037, que é o período em que possui gás suficiente para movimentar um motor com esta potência. Portanto, para critério de cálculo, definiu-se que os equipamentos seriam instalados em 2019.

Considerou-se que os investimentos foram realizados um ano antes do início do aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, para que possa entrar em operação no ano seguinte.

Como a produção de energia estimada é maior que o consumo interno, estabeleceu-se que a energia elétrica gerada seria utilizada internamente e o excedente vendido. De acordo com os resultados obtidos, descontando-se o uso interno, a energia elétrica disponível para venda é de 2.334 MWh ano⁻¹. De acordo com a ANEEL (2012), o valor da venda da energia é de R\$ 161,94 MWh⁻¹. Segundo o software Biogás (2006), o custo da produção da energia é de R\$ 31,80 MWh⁻¹.

Para a realização do cálculo do fluxo de caixa disponível para os anos em que o empreendimento estará em operação, utilizaram-se as informações apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8. Dados para cálculo do *payback* Descontado e Valor Presente Líquido.

	Principais dados	Fonte
Energia elétrica		
Período de aproveitamento	2020 a 2037	Autores.
Produção de energia	2.334 MWh ano ⁻¹	Autores.
Custo da produção de energia	31,80 R\$ MWh ⁻¹	Sugerido pelo programa.
Valor de venda da energia	161,94 R\$ MWh ⁻¹	ANEEL, 2012.
Economia com energia	16.332 R\$ ano ⁻¹	Engenheiro responsável.
Investimento com equipamentos	R\$ 1.504.781,00	Autores.

Fonte: Autores, 2013.

Na Tabela 9, está apresentado o Fluxo de Caixa anual, considerando a receita da energia elétrica comerciável, a economia com energia elétrica do aterro sanitário e a venda de créditos de carbono.

Tabela 9. Fluxo de Caixa.

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	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	482.038,00	802.416,76
2021	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	527.000,00	847.378,76
2022	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	569.424,00	889.802,76
2023	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	609.515,00	929.893,76
2024	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	647.463,00	967.841,76
2025	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	683.443,00	1.003.821,76
2026	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	717.617,00	1.037.995,76
2027	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	750.136,00	1.070.514,76
2028	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	781.136,00	1.101.514,76
2029	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	810.746,00	1.131.124,76
2030	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	839.084,00	1.159.462,76
2031	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	774.572,00	1.094.950,76
2032	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	715.020,00	1.035.398,76
2033	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	660.047,00	980.425,76
2034	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	609.300,00	929.678,76
2035	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	562.455,00	882.833,76
2036	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	519.211,00	839.589,76
2037	2.334	377.967,96	74.221,20	16.632,00	479.292,00	799.670,76

Fonte: Autores, 2013.

Com o resultado do fluxo de caixa, foi calculado o retorno do investimento, através do *payback* descontado e o Valor Presente Líquido (VPL), conforme Tabela 10.

Tabela 10. Retorno do Investimento.

Ano	Investimento Inicial (R\$)	Fluxo de Caixa Líquido (R\$)	<i>payback</i> descontado (R\$)	Valor Presente Líquido (R\$)
2019	1.504.781,00	-	-	- 1.504.781,00
2020	-	802.416,76	726.826,78	- 777.954,22
2021	-	847.378,76	695.247,49	- 82.706,73
2022	-	889.802,76	661.281,74	578.575,01
2023	-	929.893,76	625.975,07	1.204.550,08
2024	-	967.841,76	590.145,35	1.794.695,43
2025	-	1.003.821,76	554.424,18	2.349.119,61
2026	-	1.037.995,76	519.292,52	2.868.412,13
2027	-	1.070.514,76	485.109,83	3.353.521,96
2028	-	1.101.514,76	452.135,56	3.805.657,52
2029	-	1.131.124,76	420.552,07	4.226.209,59
2030	-	1.159.462,76	390.478,38	4.616.687,97
2031	-	1.094.950,76	334.014,80	4.950.702,77
2032	-	1.035.398,76	286.094,62	5.236.797,39
2033	-	980.425,76	245.384,82	5.482.182,21
2034	-	929.678,76	210.764,18	5.692.946,39
2035	-	882.833,76	181.289,96	5.874.236,35
2036	-	839.589,76	156.168,30	6.030.404,65
2037	-	799.670,76	134.731,11	6.165.135,76

Fonte: Autores, 2013.

Analisando a tabela 10, onde os cálculos se basearam no método *payback* Descontado, o investimento inicial de R\$ 1.504.781,00 realizado em 2019 será totalmente recuperado no ano de 2022, totalizando um período de recuperação de dois anos, um mês e 15 dias, que é bastante curto, já que o período de exploração do negócio é de 18 anos. De acordo com o Fluxo de Caixa, o retorno anual médio deste investimento é de 64,62%, mostrando-se muito atrativo se compararmos há uma taxa de juros de 5,80% ao ano (BCB, 2013), que foi a remuneração das cadernetas de poupança em 2013 no Brasil. Observando o VPL podemos identificar o resultado líquido estimado deste investimento ao término do período exploratório, que é de R\$ 6.165.135,76, equivalente a uma remuneração de 509,7% ao término de 18 anos, em relação ao investimento inicial.

6 CONCLUSÃO

Os cálculos demonstraram que o metano gerado no aterro sanitário de Francisco Beltrão – PR é suficiente para suprir a necessidade energética do local, sobrando ainda um excedente de energia elétrica que pode ser utilizado com outra finalidade, como a comercialização.

Quanto a viabilidade econômica, percebe-se que o valor a ser dispendido com o projeto de aproveitamento energético, se pagaria em menos de três anos, restando ainda quinze anos de lucros, sendo assim, um investimento atrativo.

Além da possibilidade de se obter lucros, a utilização do metano diminuiria a poluição atmosférica existente no aterro e também o desperdício do metano como um combustível, contribuindo tanto com o meio ambiente, quanto com a matriz energética local.

Vale lembrar que os valores apresentados neste trabalho são uma análise preliminar da possibilidade de utilização do biogás para geração de energia, uma vez que a utilização de modelos matemáticos exige informações que podem conter erros, permitindo apenas uma aproximação aos possíveis resultados reais. O próximo passo, antes da execução de um projeto como este, seria a realização de testes no local e orçamento com uma empresa especializada na implementação de sistemas de aproveitamento do biogás.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Ofício nº 004/2012 - SEM/ANEEL**: Valor anual de referência para o ano de 2012. Brasília, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012**. 10 ed. São Paulo, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Resíduos sólidos: classificação – NBR 10004**. São Paulo, 2004.

BAHIA. **Primeira termoelétrica movida a biogás do nordeste é inaugurada em Salvador**. Secretaria de comunicação social, 2011. Disponível em: <<http://www.comunicacao.ba.gov.br/noticias/2011/03/23/primeira-termeletrica-movida-a-biogas-do-nordeste-e-inaugurada-em-salvador>>. Acesso em: 20 de jan. 2014.

BANCO CENTRAL DO BRASIL (BCB). **Relatório de poupança**. 2013. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/?IMPRESARELPOP>>. Acesso em: 01 de fev. 2014.

BANCO MUNDIAL. **Manual para a preparação de gás de aterro sanitário para projetos de energia na América Latina e Caribe**. 2003.

BIOGÁS, GERAÇÃO E USO ENERGÉTICO – ATERRO 1.0. (Software). CETESB, 2006.

BORBA, S. M. P. **Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudo de caso**. 2006. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2006.

BRASIL. **Lei nº 12.305/2010**: Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010.

CASTILHOS JR, A. B. de. et al. Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos. In: CASTILHOS JR, A. B. de. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. 1 ed. Florianópolis: ABES, RIMA, 2003.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Emissões de metano no tratamento e na disposição de resíduos**. Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. São Paulo, 2006.

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

CONSELHO INTERNACIONAL PARA INICIATIVAS AMBIENTAIS LOCAIS (ICLEI). **Estudo técnico sobre o potencial de aproveitamento de biogás gerado no aterro sanitário do município de Campinas – SP**. Governos locais pela sustentabilidade. São Paulo, 2009.

COSTA, D. F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. USP – SP, São Paulo, 2006.

DIOGO, A. **Usina de biogás**. 2004. Disponível em: <<http://www.adrianodiogo.com.br/meioambiente/usinadebiogas/>>. Acesso em: 20 de jan. 2014.

DOMINGUES, E. G.; SILVA, L. R. **Avaliação do potencial de geração do metano, energia elétrica e créditos de carbono a partir do aproveitamento energético do biogás produzido no aterro sanitário da cidade de Goiânia**. CEFET – GO, Goiânia, 2008.

ECOGÁS. **Queimador Especial Flare para Biogás**. 2012. Disponível em: <<http://www.ecogas.com.br/produtos/energias-renovaveis/flare-para-biogas/>>. Acesso em: 22 de fev. 2014.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Methane Emissions**. Disponível em: <<http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/ch4.html>>. Acesso em: 05 de ago. 2013.

FIGUEIREDO, N. J. V. de. **Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás – estudo de caso**. Universidade Presbiteriana Mackenzie. São Paulo. 2007.

FRANCISCO BELTRÃO. **Meio Ambiente: Aterro sanitário**. Secretaria de Meio Ambiente. Francisco Beltrão, 2013. Disponível em: <http://www.franciscobeltrao.pr.gov.br/meio_ambiente/meio/>. Acesso em: 15 de ago. 2013.

FUNDAÇÃO ABC PESQUISA E DESENVOLVIMENTO AGROPECUÁRIO. **Classificação climática do Paraná.** Castro, 2013. Disponível em: <http://sma.fundacaoabc.org.br/climatologia/classificacao_climatica/parana>. Acesso em: 15 de ago. 2013.

FURRIELA, R. B. **Mudanças climáticas globais: desafios e oportunidades.** 2006. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/mudancas_climaticas/artigos/mudancas_climaticas_globais:_desafios_e_oportunidades.html>. Acesso em: 19 de ago. 2013.

GITMAN, L. J.; MADURA, J. **Administração financeira: uma abordagem gerencial.** São Paulo, SP: Pearson Education do Brasil, 2003.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente & desenvolvimento** – 3 ed. rev. ampl. – São Paulo: Editora Universidade de São Paulo: São Paulo, 2008.

GOOGLE EARTH. **Imagens de Francisco Beltrão – PR.** Disponível em: <<http://www.googleearth.com.br>>. Acesso em: 20 de jan. 2014.

HINRICHS, R.; KLEINBACH, M. H. **Energia e meio ambiente.** São Paulo: Cengage Learning, 2010.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAPAR). **Cartas Climáticas do Paraná, Net,** Francisco Beltrão, agosto/2013. Seção de precipitação. Disponível em: <<http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=856>>. Acesso em: 23 ago. de 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro, 2001.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo 2010 Paraná.** Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/tabelas_pdf/total_populacao_parana.pdf>. Acesso em: 15 de ago. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades: Francisco Beltrão.** Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/xtras/perfil.php?codmun=410840>>. Acesso em: 15 de ago. 2013.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro. 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 11 de ago. 2013.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual (Vol.3)**. 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6>>. Acesso em: 25 de ago. 2005.

IPARDES – Instituto Paranaense de Desenvolvimento Econômico e Social. **Perfil do Município de Francisco Beltrão: área social**. 2013.

MENDES, L. G. G.; SOBRINHO, P. M. **Comparação entre métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário**. Revista Biotecnologia, Taubaté, v.13, n.3-4, jul/dez. 2007.

NEBEL, B.J; WRIGHT, R.T. **Environmental Science: the way the world works**. Prince Hall, 1993.

NREL (National Renewable Energy Laboratory). **Gas-fired distributed energy resource- technology characterizations**. U.S.-Department of Energy. V.A., USA. 2003. Disponível em: <http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0295_05.pdf>. Acesso em: 02 de fev. 2013.

OLIVEIRA, B. P. de. **Estimativa de emissões de gases de efeito estufa provenientes da disposição de resíduos sólidos municipais em Sorocaba – SP e a potência disponível nessas emissões**. Unesp. Sorocaba, 2009.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. **Potência de geração de energia elétrica e iluminação a gás por meio do aproveitamento de biogás proveniente de aterro sanitário**. 2008.

PECORA, V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: estudo de caso em São Paulo**. São Paulo. 2009.

PROGRAMA CIDADE LIMPA. **Plano de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Volume 1 – Diagnóstico. 2012.

RUSSO, M. A. T. **Tratamento de resíduos sólidos**. Coimbra, 2003.

SANTOS, A. H. M. et al. **Conservação de energia**: eficiência energética de equipamentos e instalações. 3 ed. FUPAI: Itajubá, 2006.

SANTOS, L. O. DOS.; TAUCHEN, J. A. **Uso do biogás proveniente de um aterro sanitário para geração de energia elétrica**: estudo de caso do aterro municipal de Cascavel – PR. 2010.

SECRETARIA DO ESTADO E TURISMO. PARANÁ. **Regiões turísticas do Paraná**. 2008. Disponível em: <http://www.setu.pr.gov.br/arquivos/Image/mapas/mapa_pr_regioes_turisticas_jpg.jpg>. Acesso em: 15 de ago. 2013.

SEMA. **Bacias Hidrográficas do Paraná**. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA. Curitiba, 2002

TRIGUEIRO, A. **Aterro de Gramacho será reaproveitado ao gerar energia do lixo**. 2013. Disponível em: <<http://g1.globo.com/jornal-da-globo/noticia/2013/02/aterro-de-gramacho-sera-reaproveitado-ao-gerar-energia-do-lixo.html>>. Acesso em: 20 de jan. 2014.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Emerging Technologies for the Management and Utilization of Landfill Gas**. 1998. Disponível em: <www.epa.gov/ttn/catc/dir1/etech_pd.pdf>. Acesso em: 25 de ago. 2005.

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. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, 2006.

ZANTA, V. M.; FERREIRA, C. F. A. Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos. In: CASTILHOS JR, A. B. de. **Resíduos sólidos urbanos**: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. 1 ed. Florianópolis: ABES, RIMA, 2003.

APÊNDICE

APÊNDICE A – Relatório gerado pelo software Biogás, geração e uso energético.



Estudo de geração, recuperação e uso energético de biogás Aterro sanitário de Francisco Beltrão - PR Francisco Beltrão / PR

1. Avaliador

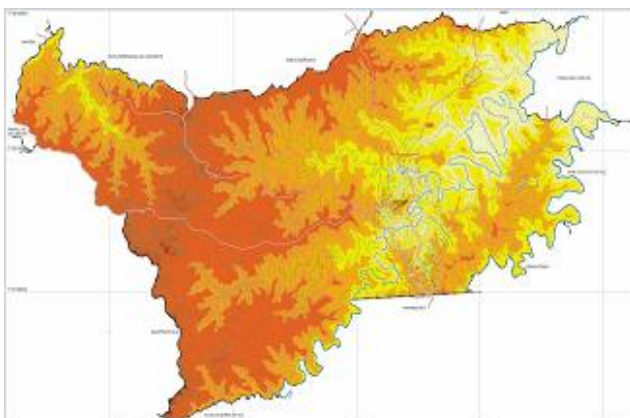
Renato Grassi e Andriele Rimoldi Mello
UTFPR

2. Localização

Endereço: Linha Menino Jesus

Mapa

3. Comentários de gerenciamento



3.1 - Localização

O Aterro Sanitário de Francisco Beltrão localiza-se na Linha Menino Jesus, no interior do Município

3.2 - Gestão do local

Para o funcionamento desta estrutura, o Aterro Sanitário Municipal conta com a ajuda de dois colaboradores permanentes, e equipamentos como: uma escavadeira hidráulica, uma pá carregadeira e um caminhão caçamba.

3.3 - Recebimento do lixo municipal

Em média, 10 cargas de resíduos são descarregadas diariamente no Aterro Sanitário, totalizando em média 60 toneladas de resíduos diários.

4. Contatos

Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.



Realização
Secretaria de Estado
do Meio Ambiente



Apoio
Ministério da
Ciência e Tecnologia





Nome: Gustavo de Moura Baczinski - Engenheiro Ambiental
 Endereço: Octaviano Teixeira dos Santos, 1000 - Francisco Beltrão / PR
 Email: gustavobaczinski@hotmail.com
 CEP:
 Telefone Comercial:
 Telefone Celular:

5. Dados do aterro

Tabela 5.1 - Dados do Aterro sanitário de Francisco Beltrão - PR

Nome do aterro	Aterro sanitário de Francisco Beltrão - PR
Ano de abertura	2.013
Ano de fechamento	2.030
Área disponível para a deposição dos resíduos (m ²)	37.847
Total de resíduos aterrados (t)	18.244
Fluxo diário de resíduos (t/dia)	50
Número de drenos	39
Distância ao bairro mais próximo (m)	2350
Distância à indústria mais próxima (m)	2475
Distância ao Gasoduto mais próximo (m)	0

6. Registo fotográfico

6. 1. Área interna do aterro

Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.



Realização
Secretaria de Estado
do Meio Ambiente



Apoio
Ministério da
Ciência e Tecnologia





6. 2. Vizinhança do aterro

7. Análise energética

7.1 Potenciais usos do biogás como gás combustível

Gás combustível para uso interno (m ³ CH ₄ /mês)	nada consta
Gás combustível para uso externo (m ³ CH ₄ /mês)	nada consta
Gás combustível para venda (m ³ CH ₄ /mês)	nada consta
Total de gás combustível (m³ CH₄/mês)	nada consta

7. 2 Potenciais usos do biogás - Eletricidade

Eletricidade para uso interno (kW.h/mês)	3.500
Eletricidade para uso externo (kW.h/mês)	nada consta
Eletricidade para venda (kW.h/mês)	194.500
Total de eletricidade (kW.h/mês)	198.000
ou	
Total de gás combustível para geração de eletricidade (m³ CH₄/mês) @33%	66.320

Necessidades totais de gás combustível (m³CH /mês): 66.320

Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.



Realização
Secretaria de Estado
do Meio Ambiente



Apoio
Ministério da
Ciência e Tecnologia





8. Método de estimativa

8.1 Estimativa de geração de resíduo

$$R_x = Pop_x \cdot i \cdot T_{RSD} \cdot T_{coleta}$$

onde:

R _x : fluxo de resíduos no ano x	[t/ano]
Pop _x : População urbana no ano x	[hab]
i: taxa de crescimento populacional no período considerado	[%]
T _{RSD} : taxa de geração de resíduos	[t/hab.ano]
T _{coleta} : taxa de coleta de RSD	[%]
RSD: resíduo sólido doméstico	

8.2 Estimativa de geração de metano

Com os dados da tabela 5.1, são estimadas as vazões de metano nos anos considerados empregando a equação abaixo:

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

onde:

Q _x : são as n estimativas da vazão de metano no ano considerado	[m ³ CH ₄ /ano]
k: constante de decaimento	[1/ano]
R _x : fluxo de resíduos no ano x	[t/ano]
L ₀ : potencial de geração de metano	[m ³ CH ₄ /kgRSD]
T: ano de deposição do resíduo no aterro	[ano]
x: ano atual	[ano]

Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.



Realização
Secretaria de Estado
do Meio Ambiente



Apoio
Ministério da
Ciência e Tecnologia



8.3 Estimativa de potência disponível:

A vazão de metano é convertida na potência disponível no aterro, empregando-se a equação abaixo:

$$P_x = \frac{Q_x P_{c(\text{metano})}}{31.536.000} E_c \frac{k}{1000}$$

onde:

Px:	Potência disponível a cada ano	[kW]
Qx:	Vazão de metano a cada ano	[m ³ CH ₄ /ano]
Pc(metano):	Poder calorífico do metano	[J/m ³ CH ₄]
Ec:	Eficiência de coleta de gases	[%]
31.536.000:	31.536.000s = 1 ano	[s/ano]
k:	k = 1.000	[adimensional]

e:

Qx é calculada pelo programa em [m³CH₄/ano],

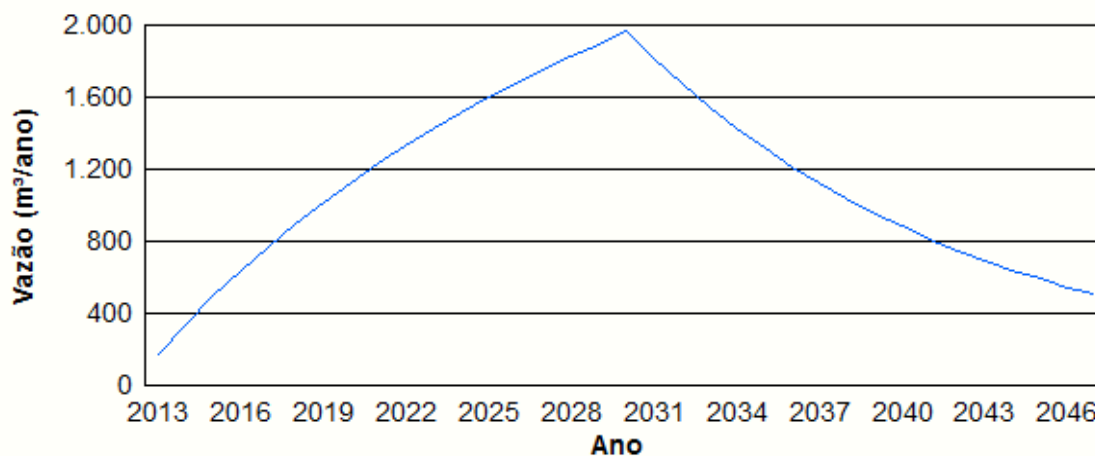
Pc empregado pelo programa é igual a 35.530 [J/m³CH₄] e

Ec empregado pelo programa é igual a 75%

9. Resultados

9.1 Vazão de metano

Aplicando-se a equação de 8.2 tem-se o gráfico a seguir:

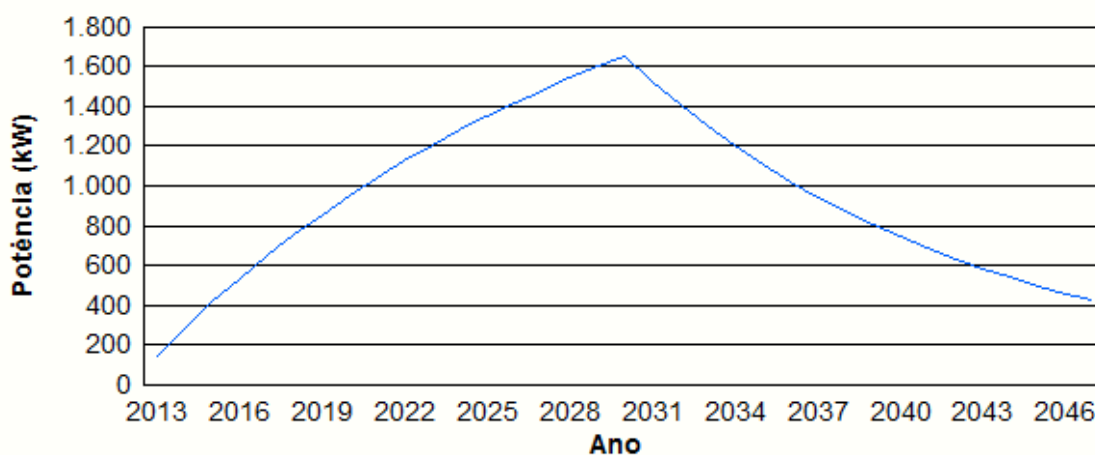


Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.



9.2 Potência disponível

Aplicando-se a equação de 8.3 tem-se o gráfico a seguir:



9.3 Tecnologia de uso energético

9.3.1. Uso do biogás como gás combustível

Tipo	Quantidade	Estado	Custo (R\$/unidade)	Consumo (m ³ CH ₄ /mês)
Cocção	0	--	0,00	0
Caldeira a vapor	0	--	0,00	0
Uso veicular	0	--	0,00	0
Iluminação a gás	0	--	0,00	0
Tratamento do chorume	0	--	0,00	0
Outro	0	--	0,00	0

Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.



Realização
Secretaria de Estado
do Meio Ambiente









Apoio
Ministério da
Ciência e Tecnologia





Gás combustível

	Cocção	0,0%
	Caldeira a vapor	0,0%
	Uso Veicular	0,0%
	Iluminação a gás	0,0%
	Tratamento de chorume	0,0%
	Outros	0,0%
Total:		100,0%

9.3.2. Uso do biogás para geração de eletricidade

Tipo	Custo (R\$/kW instalado)	Potência Elétrica (kw)
Grupo gerador otto nacional	1.000,00	300
Grupo gerador diesel nacional	0,00	0
Grupo gerador motor a gás	0,00	0
Micro turbina	0,00	0
Turbina a gás	0,00	0
Outro	0,00	0

Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.



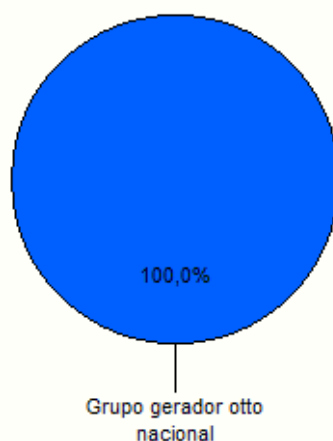
Realização
Secretaria de Estado
do Meio Ambiente



Apoio
Ministério da
Ciência e Tecnologia



Biogás para geração de eletricidade



9.4 Implantação do uso de biogás

9.4.1. Coleta

Coleta	Unidade	Custo (R\$/unidade)	Custo (R\$)
Número de drenos	39 und.	39.000 R\$/und.	39.000,00
Tamanho da tubulação	1.900 m	250 R\$/m	475.000,00
			514.000,00

9.4.2. Tratamento

Purificação	Vazão (m ³ /h)	Custo (R\$/m ³)	Custo (R\$)
H ₂ O filtro coalescente	92	0,010	145.065,60
H ₂ S / Siloxina	92	0,010	145.065,60
CO ₂	92	0,010	145.065,60
			435.196,80

Período de 18 anos

Custo anual do tratamento (R\$/ano): 24.177,60

Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.



9.4.3. Compressão

Equipamento	Vazão (m ³ /h)	Custo (R\$/m ³ /h)	Custo (R\$)
Compressão Baixa	92	500,00	46.000,00
			46.000,00

9.4.4. Gasômetro

Equipamento	Volume (m ³)	Custo (R\$/m ³)	Total (R\$)
Gasômetro	100	90,00	9.000,00
			9.000,00

9.4.5. Transporte

	Distância (m)	Custo (R\$/metro)	Custo (R\$)
Bairro	2.350	0,00	0,00
Indústria	2.475	0,00	0,00
Gasoduto	0	0,00	0,00
Outro	0	0,00	0,00
			0,00

9.4.6. Queimador

Equipamento	Quantidade	Custo (R\$/unidade)	Total (R\$)
Queimador	1	200.000,00	200.000,00
			200.000,00

Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.



Realização
Secretaria de Estado
do Meio Ambiente



Apoio
Ministério da
Ciência e Tecnologia





10. Resumo de custos e rendimentos

Geração de energia elétrica de 2.020 até 2.037 - Período 17 anos

Custo de coleta (R\$)	514.000,0
Purificação - H ₂ S / Siloxina (R\$)	145.242,0
Purificação - H ₂ O/Resfriamento (R\$)	145.242,0
Purificação - CO ₂ (R\$)	145.242,0
Custo de compressão (R\$)	46.056,0
Gasoduto do aterro (R\$)	0,0
Gasômetro (R\$)	9.000,0
Queimador (R\$)	200.000,0
Custo do equipamento para uso de gás (R\$)	0,0
Custo do equipamento para geração elétrica (R\$)	300.000,0
Investimento para geração elétrica (R\$)	1.504.781,0
Investimento para uso direto de gás (R\$)	0,0
Custo da eletricidade (R\$/MW.h)	31,8
Custo do uso do gás (R\$/m ³ CH ₄)	0,0

Crédito de Carbono de 2.020 até 2.037 - Período de 17 anos

Total de CH ₄ (t)	9.592,00
Total CH ₄ (10 ³ m ³ CH ₄)	14.315.692,00
Total de tCO ₂ eq (t)	201.422,00
Potencial útil (kW)	300
Crédito de carbono pela queima (R\$)*	6.848.341,00
Crédito de carbono pela eletricidade (R\$)*	422.581,35

* Preço do Crédito de Carbono (R\$/tCO₂): 34,00

Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.



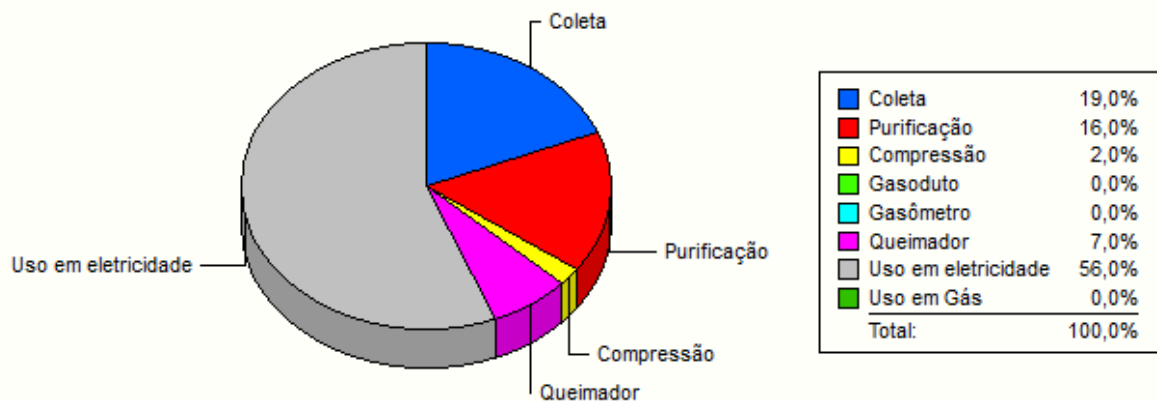
Realização
Secretaria de Estado
do Meio Ambiente



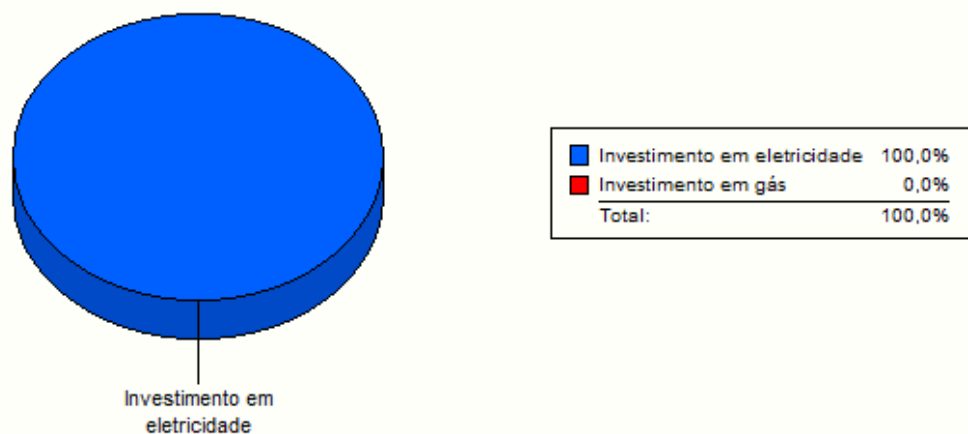
Apoio
Ministério da
Ciência e Tecnologia



Investimento por atividade do projeto

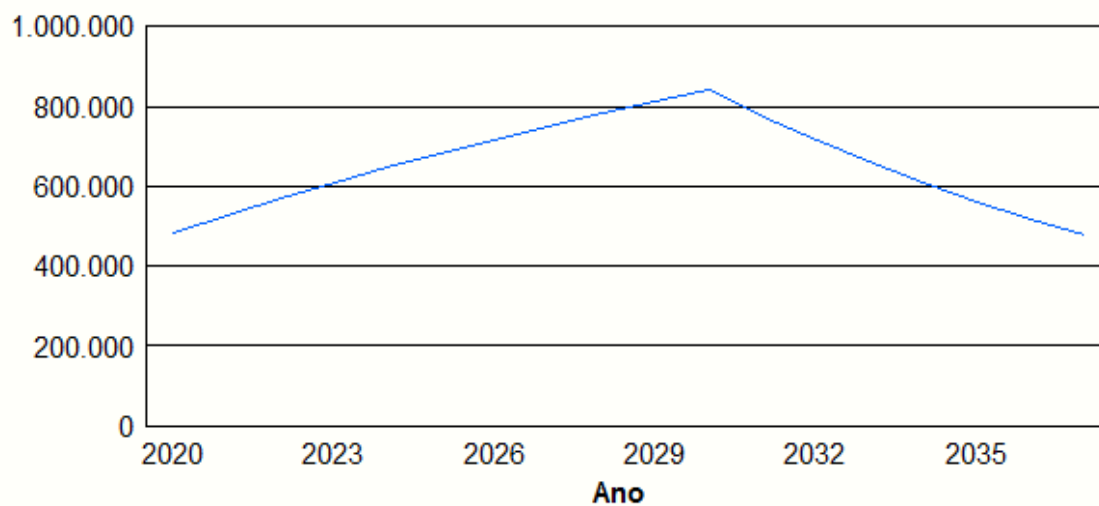


Investimento entre eletricidade e gás

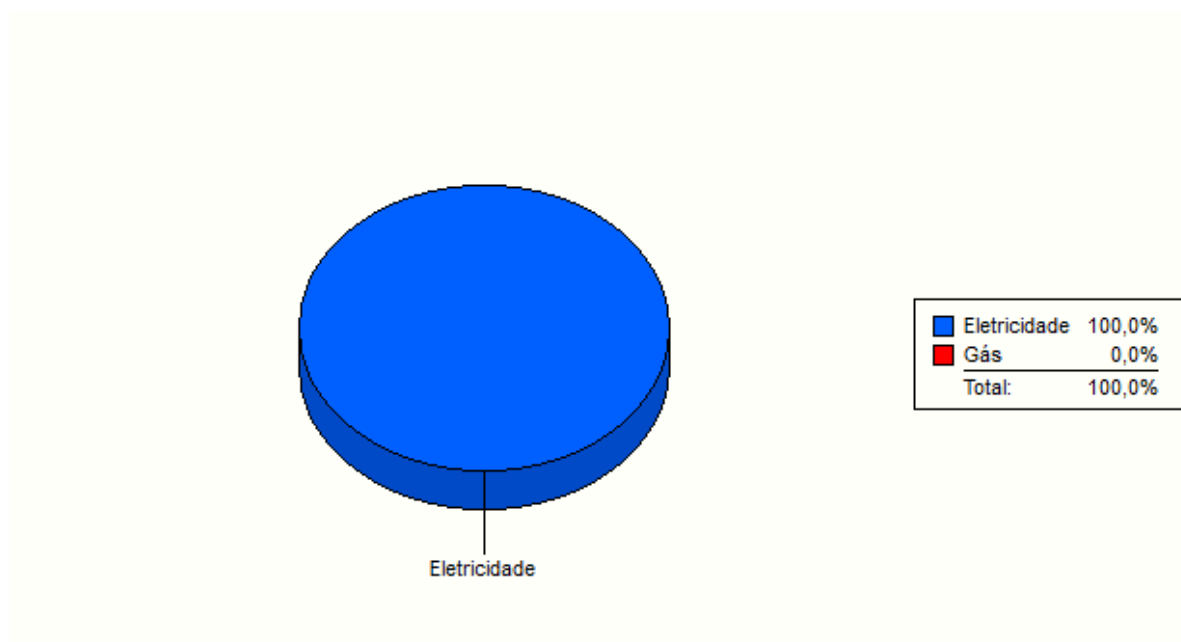


Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.

Crédito de Carbono disponível (R\$)

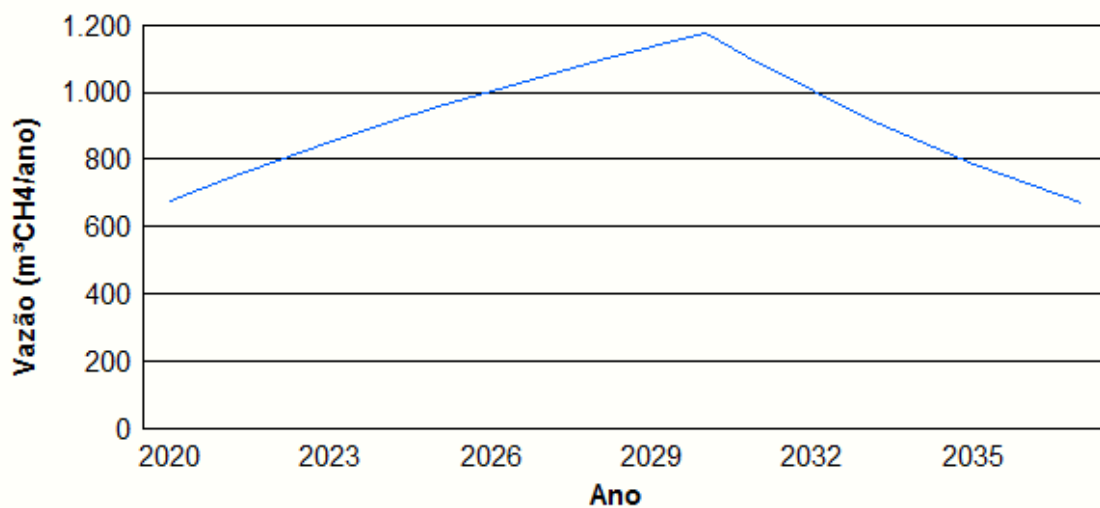


Divisão por uso



Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.

Emissão evitada de CH₄



Estudo realizado com emprego do programa Biogás. As presentes informações e resultados são de inteira responsabilidade do técnico avaliador.