

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA – NÍVEL DE
MESTRADO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO
EM ATERROS SANITÁRIOS QUE ATENDEM DIFERENTES FAIXAS
POPULACIONAIS**

ANDRIELE RIMOLDI MELLO

TOLEDO – PR – BRASIL
FEVEREIRO DE 2016

ANDRIELE RIMOLDI MELLO

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO
EM ATERROS SANITÁRIOS QUE ATENDEM DIFERENTES FAIXAS
POPULACIONAIS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Bioenergia em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis.

Orientador: Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza

TOLEDO – PR – BRASIL

Fevereiro de 2016

Catálogo na Publicação elaborada pela Biblioteca Universitária
UNIOESTE/Campus de Toledo.

Bibliotecária: Marilene de Fátima Donadel - CRB – 9/924

M527a

Mello, Andriele Rimoldi

Avaliação do potencial energético do biogás gerado em
aterros sanitários que atendem diferentes faixas populacionais /
Andriele Rimoldi Mello. -- Toledo, PR : [s. n.], 2016.

109 f. : il. (algumas color.), figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual
do Oeste do Paraná. Campus de Toledo. Centro de Engenharias e
Ciências Exatas. Programa de Pós-Graduação “Stricto sensu” em
Bioenergia, 2015.

Inclui Bibliografia

1. Bioenergia – Dissertações 2. Biogás 3. Resíduos sólidos 4. Aterro
sanitário 5. Energia elétrica - Produção 6. Energia – Fontes alternativas I.
Souza, Samuel Nelson Melegari de, orient. II.T

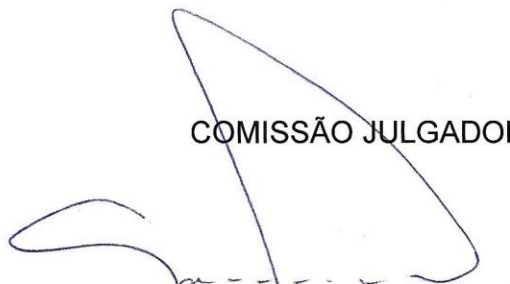
CDD 20. ed. 665.776

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CENTRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOENERGIA

Esta é a versão final da dissertação de Mestrado apresentada por ANDRIELE RIMOLDI MELLO a Comissão Julgadora do Curso de Mestrado em Bioenergia em

01 de abril de 2016

COMISSÃO JULGADORA



Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Orientador



Prof. Dr. Carlos Eduardo Camargo Nogueira
Membro



Profª. Drª. Tatiana Rodrigues da Silva Baumgartner
Membro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa.....	14
1.2 Objetivos	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Reservas energéticas	16
2.2 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).....	17
2.3 Formação do biogás	20
2.4 Sistemas de aproveitamento do biogás de aterro sanitário	22
2.4.1 Sistema de extração e tratamento do biogás	23
2.4.2 Queima em flare.....	24
2.4.3 Sistema de geração de energia elétrica	24
2.5 Utilização do biogás.....	25
2.6 Fatores regulamentários para uso e comercialização de energia na geração distribuída	26
2.6.1 Leilões de energia elétrica.....	28
2.6.2 Comercialização na microgeração e minigeração distribuída	29
2.7 Contribuição ambiental.....	32
2.8 Sistemas implantados para aproveitamento energético do biogás de aterros	33
3 METODOLOGIA	35
3.1 Delimitação do estudo	35
3.2 Quantificação do biogás gerado	37
3.3 Índice de Recuperação de Biogás (IRB).....	41
3.4 Potencial de geração de energia elétrica	42
3.5 Cálculo do custo de geração de energia elétrica com biogás de aterro .	43

3.6 Determinação da viabilidade econômica da geração de energia elétrica com biogás de aterro	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 Estudo 1	50
4.1.1 Geração de resíduos sólidos urbanos	50
4.1.2 Potencial de produção de biogás	52
4.1.3 Índice de recuperação do biogás (IRB)	56
4.1.4 Potencial de geração de energia elétrica	59
4.1.5 Custo de geração de energia elétrica.....	62
4.1.6 Análise de viabilidade econômica	66
4.2 Estudo 2	74
4.2.1 Geração de resíduos sólidos urbanos	74
4.2.2 Potencial de produção de biogás	75
4.2.3 Índice de recuperação do biogás (IRB)	79
4.2.4 Potencial de geração de energia elétrica	81
4.2.5 Custo de geração de energia elétrica.....	84
4.2.6 Análise de viabilidade econômica	88
4.3 Viabilidade nos casos em que a comercialização pode ser feita por compensação ou venda de energia.....	96
5 CONCLUSÃO	102
REFERÊNCIAS.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais materiais coletados junto aos resíduos sólidos urbanos no Brasil em 2012	18
Tabela 2. Fases de degradação dos resíduos e geração do biogás	20
Tabela 3. Populações atendidas pelos aterros em estudo	36
Tabela 4. Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduo	38
Tabela 5. Fator de correção de metano segundo os tipos de aterro	39
Tabela 6. Cenários de análise de custo de geração de eletricidade com biogás de aterros	45
Tabela 7. Cenários considerados para o cálculo da viabilidade econômica de geração de eletricidade com biogás para aterros de diferentes tamanhos	49
Tabela 8. Quantidade anual média de Resíduos Sólidos Urbanos gerados em 15 anos de vida útil de um aterro para o Estudo 1	51
Tabela 9. Variáveis utilizadas na estimativa da vazão de metano nos Estudos 1 e 2	52
Tabela 10. Geração anual de biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) para o Estudo 1.....	53
Tabela 11. Índice de recuperação de biogás (IRB) para o Estudo 1	57
Tabela 12. Equações de correlação para produção de biogás em função da capacidade do aterro – Estudo 1.....	58
Tabela 13. Estudo 1 - Potência de geração de eletricidade para 20%, 25% e 30% de eficiência (kW).....	59
Tabela 14. Correlação de potência em função da capacidade do aterro para Estudo 1	62
Tabela 15. Estudo 1 – Custo de geração de energia elétrica.....	63
Tabela 16. Correlações de custo de produção de eletricidade para capacidades do Estudo 1	66
Tabela 17. Estudo 1. Análise de viabilidade econômica	67
Tabela 18. Quantidade anual média de Resíduos Sólidos Urbanos gerados em 15 anos de vida útil de um aterro para o Estudo 2	75
Tabela 19. Geração anual de biogás ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) para o Estudo 2.....	76
Tabela 20. Índice de recuperação de biogás (IRB) para o Estudo 2	79

Tabela 21. Correlação de produção de biogás em função da capacidade do aterro para o Estudo 2	81
Tabela 22. Estudo 2 - Potência de geração de eletricidade para 20%, 25% e 30% de eficiência (kW).....	81
Tabela 23. Correlação de potência em função da capacidade do aterro para Estudo 2	84
Tabela 24. Estudo 2 – Custo de geração de energia elétrica.....	85
Tabela 25. Correlações de custo de produção de eletricidade para capacidades do Estudo 2	88
Tabela 26. Análise de viabilidade econômica para o Estudo 2	89
Tabela 27. Análise de viabilidade econômica para populações de 2.000.000 e 4.000.000 de habitantes considerando a compensação de energia e a venda nos ambientes de contratação	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Oferta interna de energia para 2012	17
Figura 2. Estrutura básica de um aterro sanitário.....	19
Figura 3. Sistema de aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário...	22
Figura 4. Quatro tempos de um motor de combustão interna	25
Figura 5. Sistema de compensação de energia elétrica.....	31
Figura 6. Fluxograma do estudo.....	37
Figura 7. Curvas de geração de biogás para o Estudo 1	56
Figura 8. Gráfico de recuperação de biogás para o Estudo 1	58
Figura 9. Estudo 1 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de biogás (IRB) de 50%	60
Figura 10. Estudo 1 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de biogás (IRB) de 70%	61
Figura 11. Estudo 1 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de biogás (IRB) de 100%	61
Figura 12. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 50%	64
Figura 13. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 70%	65
Figura 14. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 100%	65
Figura 15. Fluxo de caixa para 100.000 habitantes e IRB de 50%.....	68
Figura 16. Fluxo de caixa para 100.000 habitantes e IRB de 70%.....	68
Figura 17. Fluxo de caixa para 100.000 habitantes e IRB de 100%.....	69
Figura 18. Fluxo de caixa para 200.000 habitantes e IRB de 50%.....	70
Figura 19. Fluxo de caixa para 200.000 habitantes e IRB de 70%.....	70
Figura 20. Fluxo de caixa para 200.000 habitantes e IRB de 100%.....	71
Figura 21. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 50%.....	71
Figura 22. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 70%.....	72
Figura 23. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 100%.....	72
Figura 24. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 50%.....	73
Figura 25. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 70%.....	73
Figura 26. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 100%.....	74
Figura 27. Curva de geração de biogás para o Estudo 2	78
Figura 28. Gráfico de recuperação de biogás para o Estudo 2	80

Figura 29. Estudo 2 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de biogás (IRB) de 50%	82
Figura 30. Estudo 2 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de biogás (IRB) de 70%	83
Figura 31. Estudo 2 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de biogás (IRB) de 100%	83
Figura 32. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 50%	86
Figura 33. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 70%	87
Figura 34. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 100%	87
Figura 35. Fluxo de caixa para 5.000.000 habitantes e IRB de 50%.....	90
Figura 36. Fluxo de caixa para 5.000.000 habitantes e IRB de 70%.....	90
Figura 37. Fluxo de caixa para 5.000.000 habitantes e IRB de 100%.....	91
Figura 38. Fluxo de caixa para 10.000.000 habitantes e IRB de 50%.....	91
Figura 39. Fluxo de caixa para 10.000.000 habitantes e IRB de 70%.....	92
Figura 40. Fluxo de caixa para 10.000.000 habitantes e IRB de 100%.....	92
Figura 41. Fluxo de caixa para 15.000.000 habitantes e IRB de 50%.....	93
Figura 42. Fluxo de caixa para 15.000.000 habitantes e IRB de 70%.....	93
Figura 43. Fluxo de caixa para 15.000.000 habitantes e IRB de 100%.....	94
Figura 44. Fluxo de caixa para 20.000.000 habitantes e IRB de 50%.....	94
Figura 45. Fluxo de caixa para 20.000.000 habitantes e IRB de 70%.....	95
Figura 46. Fluxo de caixa para 20.000.000 habitantes e IRB de 100%.....	95
Figura 47. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 50% nos ambientes ACR e ACL.....	98
Figura 48. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 70% nos ambientes ACR e ACL.....	98
Figura 49. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 100% nos ambientes ACR e ACL.....	99
Figura 50. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 50% nos ambientes ACR e ACL.....	99
Figura 51. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 70% nos ambientes ACR e ACL.....	100
Figura 52. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 100% nos ambientes ACR e ACL.....	100

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DO BIOGÁS GERADO EM ATERROS SANITÁRIOS QUE ATENDEM DIFERENTES FAIXAS POPULACIONAIS

AUTORA: ANDRIELE RIMOLDI MELLO

ORIENTADOR: PROF. DR. SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA

Dissertação de Mestrado; Programa de Pós-Graduação em Bioenergia; Universidade Estadual do Oeste do Paraná; Rua da Faculdade, 645; CEP: 85903-000 – Toledo – PR, Brasil, fevereiro de 2016, 109 p.

RESUMO

Este trabalho objetiva avaliar o potencial energético do biogás gerado em aterros sanitários brasileiros que recebem resíduos sólidos urbanos de populações entre 100 mil e 20 milhões de habitantes, para geração e comercialização de eletricidade. A revisão de literatura apresenta os principais conceitos referentes ao assunto abordado, tratando das questões energéticas, dos resíduos sólidos urbanos e sua destinação em aterramentos sanitários, da geração e aproveitamento do biogás, da comercialização de energia oriunda de biomassa, entre outros. A metodologia apresenta os procedimentos de cálculo adotados a fim de alcançar os objetivos específicos. A quantificação do biogás gerado foi realizada de acordo com o modelo sugerido pelo IPCC e com estas informações foram realizados os demais cálculos de índice de recuperação do metano, potencial de geração de energia elétrica, custo de geração de energia elétrica com biogás de aterro e análise da viabilidade econômica do investimento em projetos de aproveitamento energético do biogás. A organização destes cálculos foi feita através de dois estudos considerando a capacidade atendida pelos aterros sanitários e a potência disponível para comercialização. O estudo 1 refere-se a aterros com capacidade para atender entre 100.000 e 4.000.000 de habitantes, com potência de geração de até 5.000 kW e que podem comercializar a energia gerada por meio de compensação. O estudo 2 abrange populações entre 5.000.000 e 20.000.000 de habitantes e potência entre 1.000 kW e 30.000 kW, cuja a comercialização da energia deve ser feita nos ambientes de comercialização livre ou ambientes de comercialização regulada. Os aterros com potência entre 1.000 kW e 5.000 kW podem comercializar a energia de ambas as formas. Os resultados obtidos demonstram grande geração de metano para todas as capacidades estudadas, sendo superior nos cenários com maior índice de recuperação e população atendida. O potencial energético apresentou melhores resultados para as situações com maior recuperação de metano e eficiência de conversão, com quantidade suficiente para a produção de energia. O custo de geração decresceu com o aumento da capacidade em função da

economia de escala, com valores entre US\$ 0,10 por kWh a US\$ 0,03 kWh. Ambos os estudos demonstram viabilidade econômica e atratividade em todos projetos a partir de 100 mil habitantes, garantindo retorno do investimento em no máximo 13 anos. Nos casos em que a comercialização de energia pode ser feita tanto por compensação quanto nos ambientes de contratação, a primeira alternativa se mostrou mais vantajosa, oferecendo um retorno de investimento maior em um tempo inferior. Por fim, o estudo atingiu seus objetivos com resultados favoráveis quanto ao aproveitamento do potencial energético do biogás proveniente de aterros sanitários.

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos. Aproveitamento do biogás. Energia elétrica.

ENERGY POTENTIAL EVALUATION OF BIOGAS GENERATED IN LANDFILLS THAT CATER DIFFERENT POPULATION GROUPS

AUTHOR: ANDRIELE RIMOLDI MELLO

SUPERVISOR: PROF. DR. SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA

Master Thesis; Post Graduate Program in Bioenergy; Western Paraná State University; Rua da Faculdade, 645; CEP: 85903-000 – Toledo – PR, Brazil, February of 2015. 109 p.

ABSTRACT

This study aims to evaluate the energy potential of biogas generated in Brazilian landfills that receive municipal solid waste of populations between 100,000 and 20 million inhabitants for generation and sale of electricity. The literature review presents the main concepts related to the subject matter, dealing with energy issues, municipal solid waste and its disposal in landfill, the generation and use of biogas, energy sales coming from biomass, among others. The methodology presents calculation procedures adopted in order to achieve specific objectives. The quantification of the generated biogas was performed according to the model suggested by the IPCC and this information was made other calculations of methane recovery rate, potential for electricity generation cost of electricity generation from landfill biogas and analysis the economic viability of the investment in biogas energy exploitation projects. The organization of these calculations was made by two studies considering the capacity served by landfills and the power available for sale. Study 1 refers to landfills with capacity for between 100,000 and 4,000,000 inhabitants, with power generation up to 5,000 kW and can market the energy generated by means of compensation. The study covers two populations between 5,000,000 and 20,000,000 inhabitants and power from 1,000 kW to 30,000 kW, whose marketing of energy should be made in free trading environments or regulated trading environments. Landfills with power of 1,000 kW and 5,000 kW can market the energy of both forms. The results show great generation of methane for all studied capabilities, higher than in scenarios with higher recovery rate and population served. The energy potential showed better results for cases with greater recovery of methane and conversion efficiency with sufficient quantity to produce energy. The generation cost decreased with increased capacity due to economies of scale, ranging from \$ 0.10 per kWh to \$ 0.03 kWh. Both studies demonstrate economic viability and attractiveness in all projects from 100 thousand inhabitants, ensuring return on investment in no more than 13 years. Where the marketing of energy can be made either by compensation for the contracting environments, the first alternative was more advantageous, providing a greater return on investment

in a shorter period. Finally, the study achieved its objectives with favorable results regarding the use of the potential of biogas from landfills.

Keywords: Municipal solid waste. Biogas exploitation. Electricity.

1 INTRODUÇÃO

Dentre os problemas causados pela rápida urbanização, a geração de resíduos sólidos merece destaque, pois somados aos impactos ambientais referentes a poluição do solo, da água e do ar, existem ainda o impacto social pela utilização destes resíduos como meio de sobrevivência e também o perigo à saúde pública, caso não haja manejo apropriado dos resíduos.

Dentre os processos utilizados para o tratamento e disposição final dos resíduos sólidos, a utilização de áreas para aterramento é a mais comum. 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 e tratamento do chorume, além da captação e queima do biogás (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, 2009).

Em paralelo a isto, o desenvolvimento dos países exige uma demanda energética cada vez maior. Assim, a utilização de fontes de energia renovável para atender esta demanda deve ser preferível para aumentar a oferta ou até mesmo para substituir os combustíveis de origem fóssil, pois são inesgotáveis e representam menor impacto ao meio ambiente.

Estudos sugerem a criação de mecanismos alternativos para reduzir ou minimizar ambos os problemas. Um exemplo é o aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários, pois além de contribuir com a oferta de energia pode também gerar fundos com sua comercialização e cobrir custos para a destinação final dos resíduos sólidos urbanos de forma correta (LINO; ISMAIL, 2011, GONÇALVES; TANAKA; AMEDOMAR, 2013).

O biogás gerado pela decomposição dos resíduos depositados nos aterros sanitários tem como constituinte mais importante o metano, que é um gás combustível. Visando diminuir a poluição atmosférica, este gás é queimado, resultando em dióxido de carbono. A liberação de dióxido de carbono é preferível uma vez que este gás representa impacto de efeito estufa aproximadamente 21 vezes menor que o metano, se encaixando no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) sugerido pelo Protocolo de Quioto (EPA, 2011).

Por tudo isso, estudos sugerindo o aproveitamento energético do biogás apresentam relevância principalmente do ponto de vista ambiental e econômico. Este trabalho propõe a quantificação do biogás de aterros sanitários que atendem populações variadas, entre 100 mil e 20 milhões de habitantes, a fim de estimar o potencial energético dos mesmos, os custos de geração de energia elétrica e a viabilidade econômica dos sistemas de aproveitamento do biogás.

1.1 Justificativa

O uso inconsciente dos recursos naturais para suprir as necessidades da sociedade acarreta em sérios prejuízos ao meio ambiente, como o aquecimento global, apontado como consequência do excessivo lançamento de gases do efeito estufa na atmosfera. Esse assunto ganhou destaque nas conferências internacionais, sendo o Protocolo de Quioto um importante marco na tentativa de reduzir as emissões de carbono.

Neste sentido, a diversificação da matriz energética pelo uso de fontes alternativas, como o biogás proveniente de aterros sanitários, consiste de uma tentativa de reduzir a poluição atmosférica causada pelos gases provenientes da degradação dos resíduos, atendendo ainda, a crescente demanda de energia.

A quantificação do biogás gerado através de modelos matemáticos permite uma análise preliminar sobre a quantidade de metano disponível nos aterros sanitários e a viabilidade econômica de projetos para aproveitamento energético. A utilização do biogás de aterro além de aumentar oferta de energia elétrica e reduzir os impactos associados a geração de energia, concilia o desenvolvimento econômico com atitudes ambientalmente corretas, além de diversificar a matriz energética nacional.

1.2 Objetivos

O trabalho tem como objetivo geral avaliar o potencial de aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários que atendam populações entre

100 mil e 20 milhões de pessoas. Para atender este objetivo, alguns objetivos específicos devem ser atingidos, são eles:

- Estimar o crescimento populacional e a geração de resíduos sólidos urbanos associados a cada aterro sanitário.
- Mensurar a geração de biogás nos aterros sanitários, considerando índices de recuperação de biogás de 50, 70 e 100%.
- Quantificar a potência disponível nos aterros para eficiências de 20, 25 e 30%.
- Determinar o custo de geração de energia elétrica para os aterros em estudo.
- Verificar a viabilidade econômica de projetos de aproveitamento energético do biogás.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Reservas energéticas

Para um país garantir o desenvolvimento de sua economia, o provimento de energia com segurança, competitividade e de forma ambientalmente sustentável é condição básica, já que todas as atividades humanas requerem energia na forma de fluxos energéticos, como calor e eletricidade, ou na forma de produtos e serviços, que de forma indireta também necessitam destes fluxos para serem obtidos (SANTOS et al, 2006).

As reservas de fontes de energias disponíveis na natureza podem ser classificadas como recursos fósseis ou como recursos renováveis. Os recursos fósseis correspondem aos estoques de materiais que armazenam energia química acumulada por radiação solar em épocas geológicas, como o petróleo, carvão mineral, turfa, gás natural, xisto betuminoso, ou que acumularam energia atômica na forma de material físsil, como o urânio e o tório. Já os recursos renováveis são fornecidos por fluxos naturais, como é o caso da energia hidráulica, eólica, das ondas do mar e da biomassa que provem da energia solar, e pelos fluxos de energia que dependem do movimento planetário, como a energia talassomotriz e geotérmica (SANTOS et al., 2006).

Para Goldemberg (1998) é preciso se precaver quanto a disponibilidade dos combustíveis, já que com o passar dos anos as reservas nacionais de combustíveis fósseis se tornarão escassas. Para ele, a palavra chave para o desenvolvimento sustentado permanente é a utilização de fontes renováveis de energia.

No setor energético, o Brasil é destaque especialmente na produção de petróleo em águas profundas, etanol de cana de açúcar e hidroeletricidade, sendo um país rico em alternativas de produção de fontes variadas (TOMALSQUIM, 2012). Na Figura 1 é apresentada a divisão da oferta de energia no Brasil.

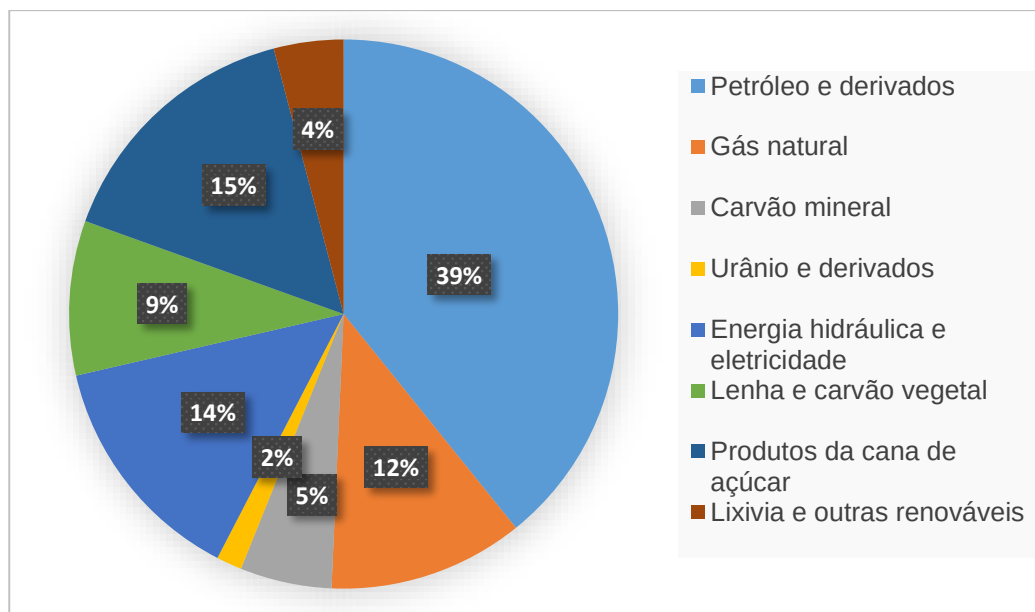


Figura 1. Oferta interna de energia para 2012

Fonte: EPE, 2013, adaptado.

Sendo a energia fundamental para a sociedade moderna, as tentativas de diversificar as fontes energéticas, integrando com fontes mais limpas, mais eficientes e tecnologias de conversão de ponta, tornaram-se um imperativo para a sustentabilidade (BIDART, 2013).

A utilização de biomassa para fins energéticos pode desempenhar um papel relevante no caminho para um provimento energético seguro. Há evidências de que as metodologias para avaliar o potencial técnico da biomassa são relativamente bem desenvolvida. No Brasil, o biogás proveniente da decomposição dos resíduos sólidos urbanos dos quase 160 milhões de brasileiros que residem em áreas urbanas poderia contribuir com 42 MW na matriz energética, energia suficiente para abastecer aproximadamente 480 mil habitantes de classe média. No entanto, a contribuição da bioenergia na matriz energética continua a ser modesto, devido principalmente a uma falta de investigação sobre a sua viabilidade (BIDART, 2013; LINO; ISMAIL, 2011).

2.2 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

A gestão da grande quantidade de resíduos sólidos urbanos gerada causa preocupações devido ao impacto ambiental associado à sua destinação final, sendo

um dos grandes desafios a ser encarado nas próximas décadas (SANTIAGO; DIAS, 2012). Para isto, as estratégias de gestão e gerenciamento destes resíduos devem buscar principalmente evitar ou reduzir a geração de resíduos e poluentes. Deste 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).

Os resíduos sólidos urbanos, classificados pela sua origem na Política Nacional dos Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), compreendem os resíduos domiciliares, originários das atividades domésticas em residências urbanas, e os resíduos de limpeza urbana, provenientes da variação, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana.

Estes resíduos são compostos basicamente por frações orgânicas e inorgânicas que contemplam resto de alimentos, vegetais, papel, madeira, plástico, vidro, metal e outros materiais inertes (MANNA; ZANETTI; GENON, 1999).

No Brasil, os tipos e taxas de produção de resíduos sólidos variam devido à grande extensão do território e as diferenças regionais, sociais e econômicas, com geração por habitante entre 0,4 e 0,7 kg.habitante⁻¹.dia⁻¹ (CETESB, 2006). A participação e quantidade dos principais materiais coletados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Principais materiais coletados junto aos resíduos sólidos urbanos 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.

Depois de recolhidos, os resíduos são destinados em lixões, aterros controlados ou aterros sanitários. Os aterros sanitários (Figura 2) são considerados a forma correta de aterramento, pois, diferentemente das demais, possuem mecanismos de impermeabilização de fundo, cobertura dos resíduos, coleta e

tratamento de lixiviado e coleta e queima dos gases (THEMELIS; ULLOA, 2007). Segundo Borba (2006), o aterro sanitário é um reator biológico cuja as principais entradas são os resíduos e a água e as principais saídas são os gases e o chorume.



Figura 2. Estrutura básica de um aterro sanitário

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

Na Figura 2 visualiza-se um esquema da estrutura básica de um aterro sanitário. Alguns critérios técnicos devem ser considerados na sua operação, tais como a disposição de resíduos em camadas compactadas, com espessura controlada e inclinação definida para drenagem do chorume. Além disso, conforme as camadas de resíduos formam as células, os drenos internos de drenagem dos gases e chorume devem ser interligados (SANTOS & TAUCHEN, 2010).

Por tudo isso, o manejo de resíduos sólidos urbanos é um tema importante na gestão e planejamento das sociedades modernas, pois implica tanto no meio ambiente quanto para saúde da população. Adicionalmente, uma maior sensibilização do público para as questões ambientais resulta em exigências às entidades de controle mais rigorosas e estratégias ambientalmente saudáveis para abordar este problema (BIDART, 2013).

2.3 Formação do biogás

O biogás é formado pela decomposição anaeróbica da biomassa, de resíduos, lodos, efluentes e resíduos sólidos urbanos (TSAI, 2005).

Em aterros sanitários, a deposição de diferentes resíduos ocasiona uma grande diversidade microbiana, abrangendo bactérias hidrolíticas, fermentativas, acidogênicas, acetogênicas e archeas metanogênicas, além de bactérias redutoras de sulfato e protozoários (CASTILHOS JR et al., 2003).

Quando os resíduos são dispostos no aterro, estes microrganismos fazem com que os componentes orgânicos sofram reações bioquímicas. Enquanto estão próximos a superfície ocorre a presença de ar atmosférico e os compostos orgânicos são oxidados em condição aeróbica, resultando em dióxido de carbono e água. Sem a presença do ar, em camadas mais profundas de resíduos, acontece a digestão anaeróbica em três etapas. Na primeira, bactérias fermentativas hidrolisam a matéria orgânica solúvel em um complexo de moléculas, que na segunda etapa, são convertidas por bactérias e formam ácidos simples, ácidos orgânicos, dióxido de carbono e hidrogênio. Na terceira etapa, bactérias metanogênicas quebram os ácidos formando metano e dióxido de carbono ou ocorre a redução do dióxido de carbono com o hidrogênio (THEMELIS; ULLOA, 2007). A Tabela 2 explica as fases de degradação dos resíduos para a geração de biogás.

Tabela 2. Fases de degradação dos resíduos e geração do biogás

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. – 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 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 podem ser encontradas no gás.

Fonte: Vanzin, 2006, adaptado.

Alguns fatores podem influenciar na atividade microbiana que acontece nos aterros, interferindo assim na formação do biogás. Os fatores relacionados aos resíduos sólidos são a sua composição, o tamanho das partículas e a idade dos resíduos. A estrutura do aterro também é importante, sendo necessário que o projeto contemple todos os elementos básicos (impermeabilização de fundo, drenagem do chorume e dos gases, e cobertura dos resíduos). Junto a estrutura é necessária também a correta operação do aterro, já que os mesmos interferem em fatores fundamentais para a degradação, como a umidade, temperatura e pH (BORBA, 2006, OLIVEIRA, 2009).

O metano é o principal componente do biogás e sua emissão deve ser controlada, já que em altas concentrações pode provocar misturas explosivas e levar a acidentes (CETESB, 2006). A produção de metano em quantidade significativa acontece entre seis meses e dois anos após a disposição dos resíduos e a atividade no interior do aterro 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; ZANETTE, 2009).

O biogás gerado pode ser coletado, tratado e posteriormente utilizado como um biocombustível.

2.4 Sistemas de aproveitamento do biogás de aterro sanitário

Com o crescimento da população mundial ocorre o acúmulo de resíduos sólidos e com isto, uma grande quantidade de biogás é gerada, causando preocupação ambiental. No entanto, o excesso neste caso pode ser visto como uma oportunidade, já que 20 kg de lixo produz 1 m³ de biogás, que pode ser utilizado como combustível (SANTOS & TAUCHEN, 2010).

Para o aproveitamento energético do biogás proveniente de aterro sanitário, a usina precisa basicamente de três sistemas, sendo eles captura e extração do biogás, análise e tratamento do biogás e produção de eletricidade (CARESANA et al, 2011).

A Figura 3 representa um esquema de um sistema de aproveitamento de biogás.

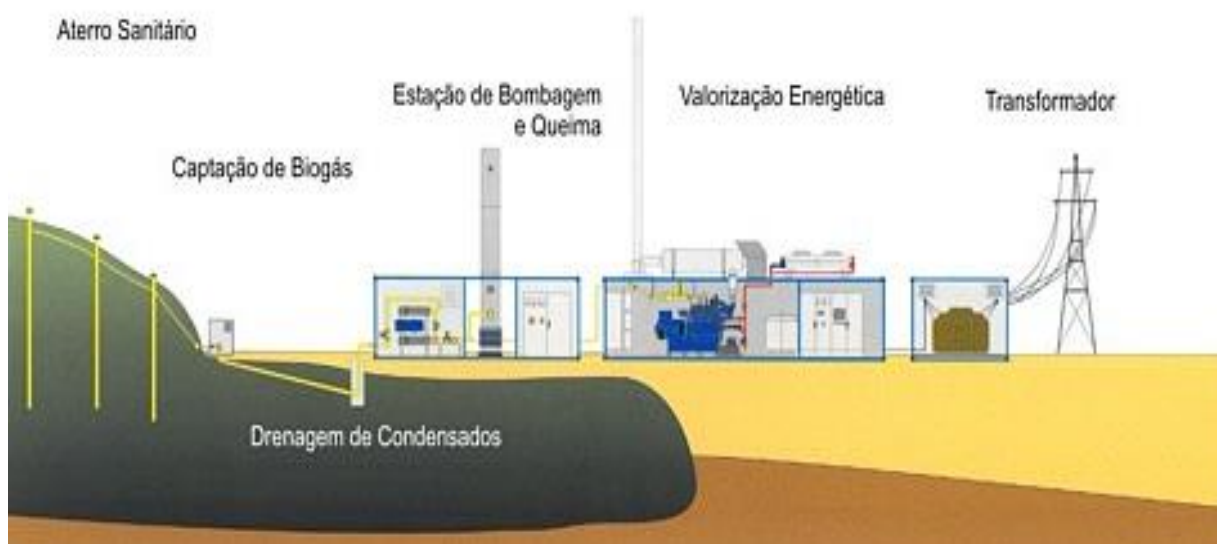


Figura 3. Sistema de aproveitamento energético do biogás de aterro sanitário

Fonte: BBF Tecnologias do ambiente, 2003.

A extração e o tratamento do biogás são feitos por um sistema de drenos horizontais e verticais, sopradores, filtros para material particulado e tanques

separadores de condensado, que servem para purificar o biogás e encaminhá-lo para a conversão em energia elétrica (OLIVEIRA, 2009). A conversão em energia elétrica pode ser realizada em motores ou turbinas, sendo os motores de ciclo Otto a tecnologia mais utilizada atualmente (COSTA, 2006).

Pesquisa realizada em Marche, Itália, para a substituição das máquinas de um sistema de aproveitamento do biogás em funcionamento desde 1998 demonstrou que a produção de eletricidade a partir do biogás de aterro sanitário é rentável tanto com a produção de eletricidade através de microturbinas, quanto com a utilização de motores de combustão (CARESANA et al, 2011).

Segundo Zanette (2009), o aproveitamento do biogás é viável em aterros sanitários que atendem população superior a 200 mil habitantes. Contudo, Romero; Jiménez; Arquillos (2013) consideram que o correto dimensionamento das centrais de aproveitamento energético do biogás é vital para garantia da viabilidade econômica deste tipo de exploração, sendo que a renda gerada pela central poderia ajudar na sua manutenção e também na instalação de novas usinas.

2.4.1 Sistema de extração e tratamento do biogás

O sistema de extração do biogás possui drenos horizontais e verticais, sopradores, filtros de remoção do material particulado e tanques separadores de condensado. O número de drenos de extração é calculado através de ensaios de permeabilidade e extração, onde geralmente um dreno vertical tem um raio de influência de 30 a 40 metros (OLIVEIRA, 2009).

Os drenos são ligados a pontos de regularização do fluxo por tubulações, sendo o biogás conduzido até os sistemas de queima em flare ou aproveitamento energético. O biogás é extraído por 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 (FIGUEIREDO, 2007).

A etapa de pré-tratamento remove 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 (OLIVEIRA, 2009).

2.4.2 Queima em flare

O sistema para queima em flare consiste de um sistema que canaliza o biogás e o queima antes de liberar na atmosfera. Este sistema é necessário mesmo em unidades que promovem o aproveitamento do biogás, pois se ocorrer alguma falha ou for necessário realizar manutenção, o metano não será emitido para a atmosfera (FIGUEIREDO, 2007).

2.4.3 Sistema de geração de energia elétrica

A geração de energia elétrica a partir do biogás pode ser feita em motores ciclo Otto, microturbinas a gás ou outras tecnologias. 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 (ICLEI, 2009). Estes motores podem apresentar eficiência elétrica de até 40% (BIDART, 2013).

O motor ciclo Otto é um motor de combustão interna onde uma mistura de ar e combustível é inflamada e queimada liberando calor que aumenta a pressão interna nos cilindros. Esta pressão é transformada em trabalho mecânico pelo movimento dos pistões, forçando um movimento rotativo que é transmitido ao gerador. O esquema de funcionamento do motor de combustão interna é apresentado na Figura 4.

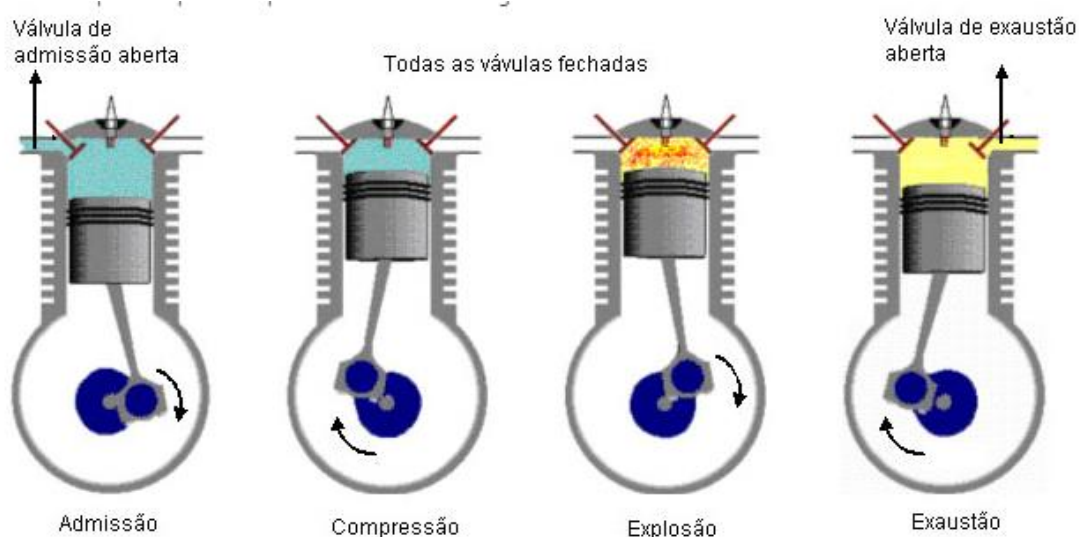


Figura 4. Quatro tempos de um motor de combustão interna

Fonte: Lima, 2008.

Dentre as vantagens da utilização dos motores ciclo Otto na geração de energia elétrica pelo biogás, estão a maior vida útil técnica, menor necessidade de manutenção do sistema e a alta eficiência total (FNR, 2010, apud BIDART, 2013). Para o aproveitamento do biogás neste tipo de motor, as principais modificações que devem ser feitas são a regulação do carburador para uma mistura de biogás e ar e alteração no nível dos tempos de ignição (SANTOS & TAUCHEN, 2010).

2.5 Utilização do biogás

A utilização do biogás gerado em aterros sanitários é financeiramente atrativa principalmente para aterros que atendem população superior a 200 mil habitantes (BARROS; FILHO; SILVA, 2014).

Entre as possíveis aplicações do biogás estão a 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, aquecimento de granjas e iluminação a gás (ICLEI, 2009). Porém, sua maior utilização é como combustível na geração de eletricidade, pois seu uso é vantajoso devido ao valor agregado (CETESB, 2006).

Para a estimativa de custos de projetos envolvendo o biogás normalmente são utilizadas técnicas baseadas na utilização de dados históricos de plantas, processos e operações unitárias de projetos de tamanhos diferentes. Quando estas informações estão disponíveis para um caso específico, o custo ou investimento pode ser atualizado ou ajustado para a situação atual. Assim, alguns fatores responsáveis pela atualização do passado para o presente, como tamanho ou capacidade distintos, devem ser considerados (BIDART, 2013).

Por tudo isto e pela importância da produção de energia próximo aos centros urbanos se justifica a implementação de políticas públicas apoiando as iniciativas relacionadas ao uso do biogás gerado em aterros sanitários, contribuindo tanto para a disponibilidade de energia quanto para a melhoria da qualidade ambiental (BARROS; FILHO; SILVA, 2014).

2.6 Fatores regulamentários para uso e comercialização de energia na geração distribuída

A Geração Distribuída de Energia Elétrica (GD) remete a geração de energia próximo ao centro de consumo, reduzindo a necessidade de estrutura de transmissão elétrica e evitando perdas. Dentre seus benefícios está o predomínio do uso de fontes limpas e renováveis modernas, como a biomassa, a solar fotovoltaica e a eólica, que contribuem para a redução da emissão dos gases de efeito estufa. Além disso, incentivar a geração distribuída pode ajudar a gerar empregos e renda em todo o país, com a estruturação de novas cadeias produtivas industriais e de novos serviços para atender à demanda por equipamentos (MME, 2015).

A produção de energia elétrica depende de concessão ou autorização, por Produtor Independente de Energia (PIE) ou por Autoprodutor de Energia Elétrica (APE), conforme indicado na legislação. O Decreto nº 2.003/1996, tendo em vista o disposto na Lei 9.074/1995, regulamenta a produção de energia elétrica, sendo o PIE ou o APE os responsáveis pela geração distribuída no país.

O decreto descreve o PIE como a pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao comércio de toda ou parte da energia produzida, por sua conta e risco.

Quanto ao APE é a pessoa física ou jurídica ou empresas reunidas em consórcio que recebam concessão ou autorização para produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo.

Em relação aos consumidores de energia elétrica no Brasil, a Lei 9.074/1995 classifica, de acordo com a demanda, como consumidores livres, especiais ou cativos. Os consumidores livres apresentam demanda superior a 3 MW e tensão superior a 69 kV, ou qualquer tensão, se conectados após 08/07/1995. Os consumidores especiais são aqueles que demandam carga superior a 500 kW, qualquer tensão e que podem adquirir energia de fontes incentivadas. São chamados de cativos os demais consumidores.

A venda de energia é regulamentada pela Lei 10.848/2004 que dispõe sobre a comercialização de energia elétrica e o Decreto 5.163/2004 que estabelece que as transações de energia elétrica sejam realizadas em dois ambientes de contratação, sendo eles o Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e o Ambiente de Contratação Livre (ACL).

No ACR a comercialização de energia elétrica pelas distribuidoras a fim de atender os consumidores finais é feita em leilões realizados pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) conforme estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O Contrato de Comercialização de Energia Elétrica no Ambiente Regulado (CCEAR) tem vigência mínima de 15 anos e máxima de 35 anos. O ACR tem incentivado o uso de fontes renováveis de energia, com a expansão de usinas eólicas, pequenas centrais hidrelétricas e a biomassa.

No ACL a contratação é realizada por operações de compra e venda envolvendo agentes concessionários, permissionários e autorizados de geração, comercializadores, importadores, exportadores de energia elétrica e consumidores livres. As contratações são pactuadas e regidas por contratos bilaterais de compra e venda, que estabelecem, entre outros, os prazos e volumes. Os consumidores interessados cuja carga seja superior a 500 kW podem adquirir a energia nesse ambiente, conforme a Lei nº 9.427/1996, Lei nº 9.648/1998 e Lei nº 10.762/2003.

Para as fontes incentivadas os contratos são divididos em Contratos de compra de energia especial e Contratos de compra de energia convencional especial. Os contratos de compra de energia especial abrangem pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) com potência instalada entre 1.000 e 30.000 kW, empreendimentos hidrelétricos com potência instalada de até 1.000 kW e o

aproveitamento da energia solar, eólica ou da biomassa para potência de até 30.000 kW. Os Contratos de compra de energia convencional especial englobam empreendimentos com potencial hidrelétrico entre 1.000 e 50.000 kW (exceto pequenas centrais hidrelétricas - PCHs) e as fontes de energia eólica, solar e biomassa com potência entre 30.000 e 50.000 kW (MAGALHÃES, 2009).

Dentre as fontes de energia renovável para a geração distribuída, a geração termoelétrica a biomassa foi a escolhida neste trabalho, sendo considerado como combustível o biogás gerado em aterros sanitários, considerando faixas de potência que pode ser comercializada nos ACR e ACL.

A comercialização da energia elétrica proveniente de usinas termoelétricas a biogás é diferente nos ambientes de contratação. No ACR as opções são os Processos de chamada pública da concessionária distribuidora, a Licitação pública na forma de leilão promovido pela ANEEL e as Chamadas públicas do PROINFA. No ACL as alternativas são a Geração distribuída existente no contrato de concessão de distribuidora e a Negociação de fontes incentivadas com os contratos de compra de energia incentivada.

2.6.1 Leilões de energia elétrica

Os leilões de energia elétrica são processos licitatórios que constituem a principal forma de contratação de energia no Brasil. Por meio deles, concessionárias, permissionárias e autorizadas de serviço público de distribuição de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) suprem a demanda de seu mercado no Ambiente de Contratação Regulada (ACR). A realização dos leilões é feita pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica por delegação da ANEEL, tendo como critério a menor tarifa para definir os vencedores (CCEE, 2016).

Existem diferentes tipos de leilões podendo ser classificados de acordo com os horizontes de contratação e leilões especiais, conforme listado abaixo (MME, 2015):

Horizontes de Contratação:

- Leilão A-5: é o processo licitatório que visa a contratação de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração realizado

com cinco anos de antecedência do início do suprimento. Busca viabilizar empreendimentos de longa maturação, como os hidrelétricos.

- Leilão A-3: licitação para contratação de energia elétrica proveniente de empreendimentos de geração novos, sendo realizada com três anos de antecedência do início do suprimento. Busca viabilizar empreendimentos de médio prazo, como os termelétricos.
- Leilão A-1: processo licitatório para contratação de empreendimentos já existentes, com antecedência de um ano do início do suprimento.
- Leilão de ajuste: processo de licitação para complementar a carga de energia necessária para atender o mercado consumidor dos agentes de distribuição, até o limite de 1% do mercado de cada distribuidora.

Leilões Especiais:

- Leilão de projeto estruturante: preveem a compra de energia proveniente de projetos de geração de caráter estratégico e de interesse público, que asseguram o atendimento à demanda nacional de energia elétrica a longo, médio e curto prazo.
- Leilão de Fontes Alternativas (LFA): tem como objetivo incentivar a diversificação da matriz de energia elétrica, introduzindo fontes renováveis e ampliando a participação de energia eólica e da bioeletricidade.
- Leilão de Energia de Reserva (LER): buscam assegurar o fornecimento de energia elétrica ao Sistema Interligado Nacional (SIN) com energia proveniente de usinas especialmente contratadas para este fim.

2.6.2 Comercialização na microgeração e minigeração distribuída

Com o intuito de estimular o uso de fontes de energia renovável ou cogeração com elevada eficiência energética e incentivar a conexão de pequenas centrais distribuidoras na rede de distribuição, a ANEEL publicou a Resolução

Normativa nº 482/2012 e, em sequência, a Resolução Normativa nº 517/2012 que altera a anterior.

A micro e minigeração distribuída consistem na geração de eletricidade em pequenas centrais que utilizam fontes de energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, sendo estas centrais ligadas a rede de distribuição através de instalações de unidades consumidoras. De acordo com as normativas, o que diferencia ambas as gerações é a potência instalada (ANEEL, 2014).

Em novembro de 2015 a diretoria da ANEEL aprovou aprimoramentos da Resolução Normativa nº 482/2012 criando a Resolução Normativa nº 687/2015, que passa a vigorar a partir de 1º de março de 2016. De acordo com as novas regras, o uso de qualquer fonte renovável será permitido, além da cogeração qualificada, denominando microgeração distribuída aquela com potência instalada de até 75 quilowatts (kW) e minigeração distribuída a central com potência acima de 75 kW e inferior ou igual a 5 MW, com exceção da fonte hídrica, cujo o limite de potência é de 3 MW. Na resolução anterior os limites eram de menos de 100 kW na microgeração e superior a 100 kW e inferior a 1.000 kW para a minigeração.

A Resolução Normativa nº 687/2015 determina ainda que o excedente de energia gerado em determinado mês gere créditos ao consumidor que podem ser utilizados para diminuir a fatura nos meses seguintes. A validade dos créditos passou de 36 para 60 meses com as novas regras, sendo possível usar estes créditos para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular em outro local atendido pela mesma distribuidora. Esse tipo de utilização dos créditos é chamado de autoconsumo remoto.

A Figura 5 esquematiza o processo de compensação.

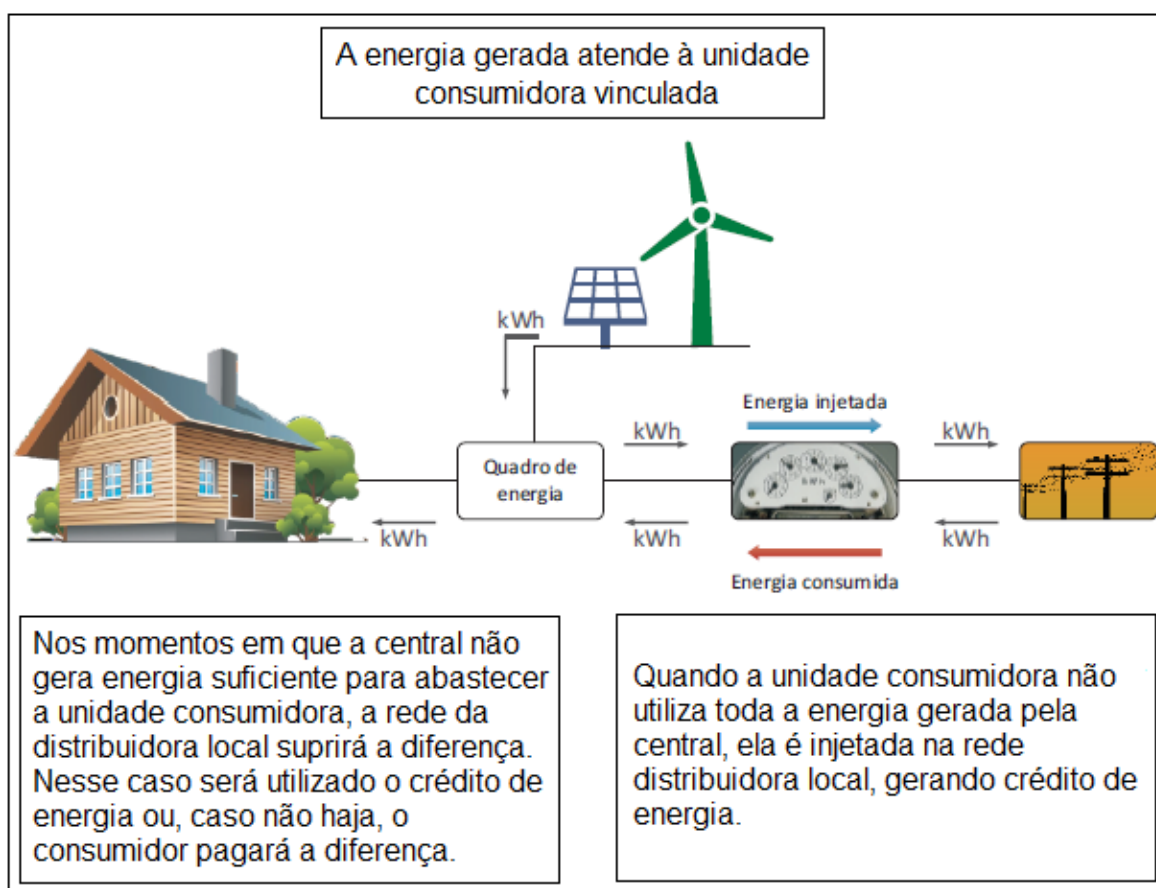


Figura 5. Sistema de compensação de energia elétrica

Fonte: ANEEL, 2014, adaptado.

A resolução traz como novidade a possibilidade de instalação de geração distribuída em condomínios, onde a energia gerada pode ser repartida entre os condôminos em porcentagens determinadas pelos consumidores. Além disso, criou a geração compartilhada, que possibilita a união de diversos interessados, na forma de consórcio ou cooperativa, para instalação de uma micro ou minigeradora distribuída, a fim de que a energia gerada reduza as faturas dos consorciados ou cooperados.

A ANEEL também simplificou as regras para o processo de conexão da micro ou minigeração distribuída, instituindo formulários padrão para a realização da solicitação de acesso pelo consumidor. O prazo total para a conexão de usinas de até 75 kW diminuiu de 82 dias para 34 dias, sendo que a partir de 2017 a solicitação e acompanhamento do pedido junto à distribuidora poderá ser realizado pela internet.

Em relação a microgeração e minigeração de energia elétrica com biogás de aterros sanitários, a Resolução Normativa nº 687/20125 permite potenciais de até

5.000 kW para unidades de concessão municipal, sendo possível utilizar os excedentes para atender outros postos tarifários do município, como a iluminação pública, escolas municipais, hospitais e outras autarquias.

2.7 Contribuição ambiental

A possibilidade de utilizar os recursos de forma a não comprometer o desenvolvimento das gerações futuras, ao mesmo tempo em que oferecem benefícios além dos meramente econômicos, ganhou maior interesse nas últimas décadas. As energias renováveis, como a biomassa, devem desempenhar um papel fundamental no futuro, sendo o seu desenvolvimento e integração vistos como um sistema pivô para os sistemas de energia das sociedades pós-modernas (BIDART, 2013).

A construção de aterros sanitários deve sempre levar em consideração todos os critérios de engenharia conhecidos para impedir a degradação ambiental devido a poluição da água, do solo e também do ar, sendo que as emissões de biogás podem representar um sério problema de poluição atmosférica se não forem minimizadas (MARIANO; JUCÁ, 2010).

Entre os gases emitidos nos aterros sanitários, os principais são o metano e o dióxido de carbono. A grande quantidade desses gases, de acordo com Furriela (2006), eleva a temperatura média do planeta, causando problemas como o derretimento de geleiras, elevação do nível do mar e fenômenos climáticos extremos.

A relação entre a geração de energia e o aquecimento global reflete na utilização de fontes renováveis de energia, pensando no desenvolvimento econômico sustentável (TSAI, 2005). As fontes de energia renováveis além de serem inesgotáveis proporcionam a conveniência de não conterem impurezas de enxofre que contaminam o ar e de não contribuírem para o acréscimo de dióxido de carbono na atmosfera (GOLDEMBERG, 1998).

Segundo Zamorano et al (2007), a utilização do biogás como uma fonte de combustível pode ser considerada ambientalmente saudável, uma vez que

aumenta o uso de fontes de energia renovável, reduzindo o efeito estufa causado pelas emissões de metano e dióxido de carbono.

Por tudo isto, o interesse na geração de energia elétrica derivada de resíduos é fortemente motivado pela possibilidade de implementação de uma estratégia mais sustentável para a gestão destes resíduos, já que o problema ambiental pode ser também considerado uma questão energética, oferecendo significativamente mais vantagens do que uma estratégia de tratamento de resíduos isolado (BIDART, 2013).

2.8 Sistemas implantados para aproveitamento energético do biogás de aterros

No Brasil, o aproveitamento energético do biogás é realizado em alguns aterros e em outros já existem projetos para a implantação de sistemas.

No aterro de Bandeirantes foi inaugurada em 2004 a primeira usina de geração de energia elétrica a gás metano do país, localizada no Aterro Sanitário de Bandeirantes – SP, com capacidade para gerar 175.000 MW.h⁻¹ por ano. 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.

Em Salvador foi inaugurada em 2011 a Termoverde Salvador, que utiliza o biogás gerado para a produção de energia elétrica, que é vendida para empresas consumidoras. Além disso, a termoelétrica também vende créditos de carbono (BAHIA, 2011).

No Aterro Sanitário de Gramacho – RJ, já desativado, 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).

O aterro sanitário municipal de Cascavel – PR 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.

3 METODOLOGIA

3.1 Delimitação do estudo

No estudo foram utilizados dados sobre resíduos sólidos urbanos disponíveis em documentos e relatórios, a nível nacional, para aterros sanitários que atendem populações entre 100 mil e 20 milhões de pessoas.

Os aterros com potência de instalação de até 5.000 kW, de acordo com a Resolução Normativa nº 687/2015, podem comercializar a energia gerada por meio de compensação, se enquadrando na micro e na minigeração de energia.

Por outro lado, os aterros com biogás disponível para potências de geração entre 1.000 kW e 30.000 kW, com fins de comercialização, se enquadram nos ambientes de comercialização livre (ACL) ou ambiente de comercialização regulada (ACR).

Baseado nas formas de comercialização da energia gerada com o biogás de aterros sanitários, este estudo foi dividido em dois intervalos. O primeiro intervalo, denominado Estudo 1, contemplou aterros em que a comercialização é feita por meio de compensação, abrangendo assim aterros que atendem populações entre 100.000 e 4.000.000 habitantes. O segundo intervalo, designado como Estudo 2, compreendeu aterros com potência suficiente para a venda nos ambientes de ACL e ACR, referentes as populações entre 5.000.000 e 20.000.000 de habitantes. As situações em que a comercialização pode ser realizada de ambas as formas (capacidades entre 2.000.000 e 4.000.000 de habitantes) foram analisadas separadamente.

A divisão dos intervalos de acordo com a forma de comercialização de energia e a população relacionada foi apresentada na Tabela 3.

Tabela 3. Populações atendidas pelos aterros em estudo

Estudo 1	Estudo 2
100.000	5.000.000
150.000	6.000.000
200.000	7.000.000
250.000	8.000.000
300.000	9.000.000
350.000	10.000.000
400.000	11.000.000
450.000	12.000.000
500.000	13.000.000
1.000.000	14.000.000
1.500.000	15.000.000
2.000.000	16.000.000
2.500.000	17.000.000
3.000.000	18.000.000
3.500.000	19.000.000
4.000.000	20.000.000

Fonte: Autor, 2015.

Os cálculos para a quantificação do biogás e os cálculos adicionais necessários até a análise de viabilidade econômica foram realizados para cada população, considerando a vida útil do aterro de 15 anos.

A Figura 6 representa um breve esquema das etapas do estudo.

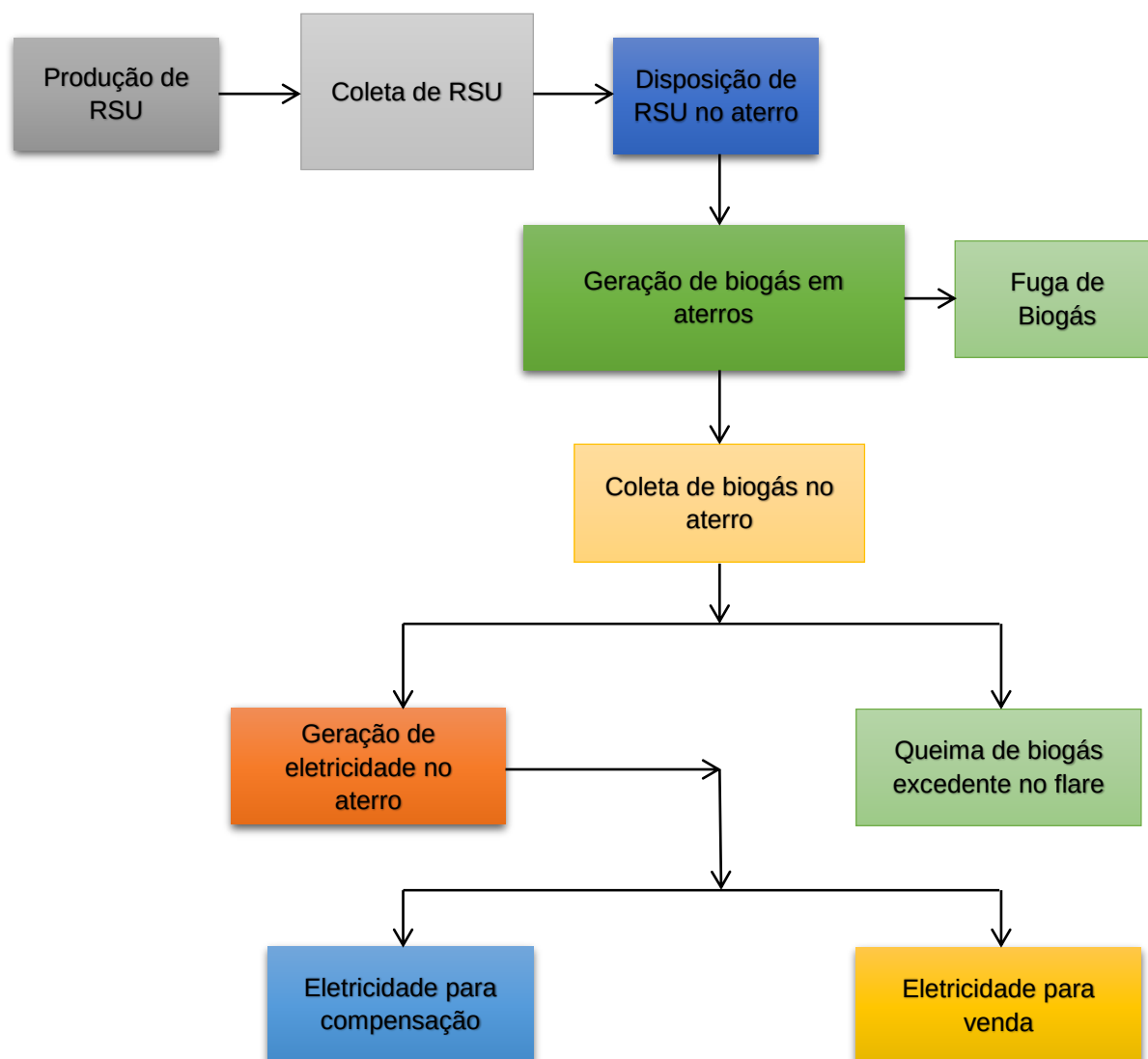


Figura 6. Fluxograma do estudo

Fonte: Autor, 2015.

3.2 Quantificação do biogás gerado

Para o cálculo de quantificação do biogás gerado nos aterros sanitários, será utilizada a metodologia sugerida pelo IPCC (1996). Esta metodologia compreende uma série de equações, separadas em etapas, onde diversas variáveis são consideradas. Este método é o mais empregado neste tipo de estudo uma vez que é mundialmente aceito.

A primeira etapa consiste no cálculo da fração de carbono orgânico no lixo (DOC), utilizando a composição gravimétrica dos resíduos, conforme a Equação 1.

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

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 (%).

Nos casos em que a composição gravimétrica dos resíduos não é conhecida, adota-se os dados fornecidos pelo IPCC (1996) para a América do Sul, já que estes incluem o Brasil, conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do resíduo

Componente	Porcentagem DOC (em massa)	Composição gravimétrica (%)
A) Papel e papelão	40	17,1
B) Restos de alimentos	15	46,9
C) Resíduos de parques e jardins	17	-
D) Tecidos	40	2,6
E) Madeiras	30	4,7

Fonte: IPCC, 1996.

A fração de carbono orgânico do lixo que pode se decompor de forma anaeróbia (DOC_f) considera entre outros fatores, a temperatura, o pH, a umidade e a composição dos resíduos na zona de degradação anaeróbia (Equação 2):

$$\text{DOC}_f = 0,014.T + 0,28 \quad (2)$$

Onde:

T: Temperatura na zona anaeróbia dos resíduos ($^{\circ}\text{C}$).

DOC_f: Fração do DOC que pode se decompor.

O potencial de geração de metano do resíduo (L_0) considera o DOC, DOC_f, fração de metano no biogás (F) e o fator de correção de metano (MCF), de acordo com o gerenciamento do aterro (Equação 3):

$$L_0 = \text{MCF} \cdot \text{DOC} \cdot \text{DOC}_f \cdot F \cdot 16/12 \quad (3)$$

Onde:

L_0 : Potencial de geração de metano do resíduo ($\text{m}^3 \text{ metano} \cdot \text{kg}_{\text{RSD}}^{-1}$).

MCF: Fator de correção de metano (%).

DOC: Fração de carbono orgânico degradável no lixo ($\text{kg}_c \cdot \text{kg}_{\text{RSD}}^{-1}$).

DOC_f: Fração do DOC que pode se decompor ($\text{kg}_c \cdot \text{kg}_{\text{RSD}}^{-1}$).

F: Fração de CH₄ no biogás.

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

A Tabela 5 apresenta os valores de correção de metano para os tipos de aterro.

Tabela 5. Fator de correção de metano segundo os tipos de aterro (MFC)

Tipos de aterros	Valores de correção de metano
Gerenciamento – anaeróbico	1,0
Gerenciamento – semi-aeróbico	0,5
Não gerenciado – profundidade (> 5 m de resíduos) e ou camada freática elevada	0,8
Não gerenciado – pouco profundo (< 5 m de resíduos)	0,4
Aterro não categorizado (sem controle)	0,6

Fonte: IPCC, 1996

O cálculo da quantidade de metano gerado (LFG) é realizado para cada ano, uma vez que a vazão deste gás varia principalmente com fluxo de resíduos e tempo de deposição, conforme Equação 4.

$$LFG = K.Rx.L_0.(1-e^{-K.T}) \quad (4)$$

Onde:

LFG: Quantidade de metano gerado ($m^3CH_4 \text{ ano}^{-1}$).

K: Constante de decaimento.

Rx: Fluxo de resíduo no ano (t_{RSD}).

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

T: Ano de deposição dos resíduos no aterro (início de operação).

A constante de decaimento (K) varia com a disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e umidade, sendo o último o fator principal. De acordo com (IPCC, 2006 apud ICLEI, 2009), o valor de K para clima tropical – resíduo úmido – é de 0,115.

Para estimar o fluxo de resíduos anual utiliza-se a Equação 5 e, para isso, calcula-se a população em cada ano, pela Equação 6:

$$Rx = [(RSD).(N_{hab}).(\text{dias no ano}).(\% \text{ aterro})] \quad (5)$$

Onde:

RSD: Resíduos sólidos gerados por habitante por dia (Kg).

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

% aterro: Porcentagem de resíduos destinados no aterro.

$$P = P_0.e^{r.t} \quad (6)$$

Onde:

P: População prevista para um determinado ano.

P₀: População atual.

r: Taxa de crescimento (%).

t: Número de anos de extrapolação.

A partir da quantificação do metano gerado, determina-se a produção anual de biogás pela Equação 7.

$$B_i = \frac{LFG}{F} \quad (7)$$

Onde:

B_i: Quantidade de biogás gerado no ano atual (m³.ano⁻¹).

LFG: Quantidade de metano gerado no ano atual.

F: Fração de metano no biogás.

3.3 Índice de Recuperação de Biogás (IRB)

Do volume total de biogás gerado nos aterros sanitários, apenas uma parte consegue ser captada e canalizada para aproveitamento. Estudos demonstram que o índice de recuperação de biogás varia entre 50 e 75% de eficiência, quando se realiza a cobertura de terra adequadamente, podendo chegar a 100% quando for utilizada cobertura com camadas de solo argiloso ou mantas de polietileno de alta densidade (PEAD) (ABREU, 2009; ENSINAS, 2003).

Assim, neste trabalho adotou-se cenários com índices de recuperação de biogás de 50%, 70% e 100% para avaliação do potencial de geração de energia elétrica e análise de viabilidade econômica.

3.4 Potencial de geração de energia elétrica

A potência de geração de eletricidade pode ser determinada em função da produção de biogás pela Equação 8.

$$PT_E = P_B \cdot \eta_e \cdot PCI \quad (8)$$

Onde:

PT_E : Potência de geração de eletricidade (kW).

P_B : Quantidade média de biogás captada no aterro ($m^3 \cdot h^{-1}$).

PCI : Poder calorífico do biogás ($kWh \cdot m^{-3}$).

η_e : Eficiência de conversão de biogás em energia elétrica.

O Poder Calorífico Inferior (PCI) do metano é de $37,2 \text{ MJ} \cdot m^{-3}$ (GÓMEZ et al., 2010). Assim, o biogás composto por aproximadamente 50% de metano tem um PCI de $19,34 \text{ MJ} \cdot m^{-3}$, ou aproximadamente $5,4 \text{ kWh} \cdot m^{-3}$.

A partir dos resultados alcançados pela Equação 8, obtém-se a equação linear em função da capacidade do aterro, conforme Equação 9.

$$PT_E = f(\pi) \Rightarrow PT_E = a + b\pi \Rightarrow a, b \text{ constantes de correlação} \quad (9)$$

A eficiência de conversão de biogás em energia elétrica em motores geradores, segundo a literatura, varia entre 20 e 30%. Assim, as eficiências adotadas no estudo serão de 20, 25 e 30% (PECORA, 2006; BOVE & LUNGHI, 2006; SOUZA et al., 2013).

A quantidade média de biogás captado no aterro é a média anual de biogás para cada capacidade considerada no estudo, considerando ainda o índice de recuperação de biogás. A média é calculada de acordo com a Equação 10.

$$P_B = \frac{\left(\frac{\sum_{i=0}^n P_i}{n} \right)}{8760} \quad (10)$$

Sendo:

P_B : Quantidade média de metano captado no aterro ($m^3.h^{-1}$).

P_i : Produção de metano no ano ($m^3.h^{-1}$).

n : número de anos de produção de biogás no aterro (ano).

8760: quantidade de horas em um ano.

Pela relação de dados entre P_B e a capacidade do aterro (π) para cada índice de recuperação de biogás obtém-se a equação de correlação linear (Equação 11).

$$P_B = f(\pi) \Rightarrow P_B = c + d \cdot \pi \Rightarrow c, d \text{ constantes de correlação} \quad (11)$$

3.5 Cálculo do custo de geração de energia elétrica com biogás de aterro

O custo de geração de energia elétrica depende de vários fatores, como o tamanho da planta e custos fixos e variáveis. Neste estudo, os ganhos obtidos com a venda de créditos de carbono não foram considerados devido a indefinição deste mercado no momento. O cálculo do custo de produção de energia elétrica a partir de biogás de aterro foi estimado a partir da Equação 12, considerando o motor gerador de combustão interna como tecnologia (BIDART, 2013, adaptado).

$$P_{TE} \cdot C \cdot \tau = I_0 \cdot (F_R + O^M) \quad (12)$$

Onde:

P_{TE} : Potência de geração de eletricidade (kW).

C : Custo de geração de eletricidade (US\$. kWh^{-1}).

τ : Disponibilidade da planta de geração (horas. ano^{-1}).

I_0 : Investimento fixo (US\$).

F_R : Fator de recuperação de capital (ano^{-1}).

O_M : Fração ou taxa do investimento fixo investido anualmente em operação e manutenção da planta (%/100).

O investimento fixo (I_0) depende do investimento específico no sistema de captação de biogás e geração de eletricidade (I_e) e da potência de geração. A Equação 13 é obtida pela aplicação de um modelo de economia de escala que relaciona o investimento específico com a capacidade de produção. Para isto, utilizou-se a Equação 14 juntamente com o investimento específico, que foi obtido através de dados de estudos realizados por Kumar & Sharma (2014), Leme et al. (2014), Esmap (2004) e EPA (1997) considerando plantas de geração de biogás em aterros com características técnicas similares, mas com diferentes escalas de produção.

$$I_e = 2598 \left(\frac{P_{TE}}{500} \right)^{-0,1873} \quad (13)$$

Sendo:

I_e : Investimento específico no sistema de captação de biogás e geração de eletricidade (US\$.kW⁻¹).

P_{TE} : Potência de geração de eletricidade (kW).

A abordagem utilizada para estimar o custo de capital é baseada em elementos de referência ou plantas de características semelhantes. Esta técnica é baseada na utilização dos dados históricos de plantas, processos, operações unitárias ou itens de tamanhos diferentes, onde possuindo as informações disponíveis para um caso específico, o custo ou investimento pode ser atualizado ou ajustado para a situação atual. Nestes termos, o custo pode ser calculado pela aplicação normal de uma correlação exponencial como apresentado na Equação 14 (BIDART, 2013).

$$C = C_0 \left(\frac{Q}{Q_0} \right)^\alpha \quad (14)$$

Onde:

C : Investimento específico para a capacidade Q .

C_0 : Investimento referência para uma capacidade conhecida Q_0 .

α : Índice de correlação.

A Equação 15 apresenta o fator de recuperação de capital, que é baseado na série uniforme de pagamento, taxa de desconto e vida útil do empreendimento.

$$F_R = \left[\frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \right] \quad (15)$$

Onde:

F_R : Fator de recuperação de capital.

d : Taxa de desconto.

n : Número de anos de vida do empreendimento.

A taxa de desconto considerada é a taxa Selic para o mês de fevereiro de 2016, no valor de 14,15% (BCB, 2016). Para a taxa de operação e manutenção o valor fixado foi de 4%, valor superior ao encontrado em outros estudos com a intenção de aplicar um valor mais conservador em relação as taxas. Já o número de anos de vida do empreendimento é de 15 anos, que é o tempo mínimo necessário para viabilidade de projetos de recuperação de biogás para produção de energia em aterros sanitários (PNUD, 2010). A Tabela 6 mostra os cenários analisados no estudo.

Tabela 6. Cenários de análise de custo de geração de eletricidade com biogás de aterros

Cenários		d	O ^M	N
IRB 50%	$\eta_e = 20\%$	14,15%	4%/100	15 anos
	$\eta_e = 25\%$			
	$\eta_e = 30\%$			
IRB 70%	$\eta_e = 20\%$	14,15%	4%/100	15 anos
	$\eta_e = 25\%$			
	$\eta_e = 30\%$			
IRB 100%	$\eta_e = 20\%$	14,15%	4%/100	15 anos
	$\eta_e = 25\%$			
	$\eta_e = 30\%$			

IRB – índice de recuperação do biogás; η_e – eficiência; d – taxa de desconto; O^M – taxa de operação e manutenção; n – tempo de vida da planta.

Fonte: Autor, 2015.

O custo de geração de energia, assim como o potencial de geração varia de acordo com a capacidade do aterro. Tendo determinado o custo em função do potencial de geração, correlaciona-se os dados com a capacidade do aterro, obtendo-se a Equação 16.

$$C^e = e\pi^{-f} \Rightarrow e, f \text{ constantes} \quad (16)$$

3.6 Determinação da viabilidade econômica da geração de energia elétrica com biogás de aterro

A análise da viabilidade econômica de projetos aproveitamento de biogás para geração de eletricidades é de suma importância para a fase de tomada de decisão. No estudo são calculados o valor presente líquido (VPL), o payback e a taxa interna de retorno (TIR), considerando como hipótese a venda de energia por meio de compensação, o que se enquadra na mini geração de energia, conforme a Resolução Normativa da ANEEL nº 687/2015.

O Valor Presente Líquido da planta de geração de eletricidade durante o período de operação foi obtido pela Equação 17.

$$VPL = -I_0 + \sum_{n=1}^N \frac{F_n}{(1+d)^n} \quad (17)$$

Onde:

I_0 : Investimento na planta (US\$).

F_n : Fluxo de caixa.

n : Tempo de operação.

d : Taxa de desconto.

O fluxo de caixa é a receita obtida com a venda de energia. Quando o produtor se enquadra na venda de energia incentivada, o cálculo é feito pela Equação 18.

$$F_n = (P_e \cdot PT_E \cdot \tau - \alpha \cdot I_0) \left(1 - \frac{\partial}{100}\right) \quad (18)$$

Onde:

F_n : Fluxo de caixa.

P_e : Preço da energia (US\$.kWh⁻¹).

PT_E : Potência de geração (kW).

τ : Disponibilidade da planta (horas.ano⁻¹).

α : Taxa de operação e manutenção (%/100).

I_0 : Investimento na planta (US\$).

$\hat{o}$: Taxa de imposto sobre o lucro líquido (%).

Como imposto considerou-se o PIS e o COFINS que correspondem a 0,65% e 3% da receita de venda; o IRPJ, que foi considerado de 1,20% uma vez que se utiliza a base de cálculo de 8% da receita de venda com uma alíquota de 15%; a CSLL, onde a base de cálculo é de 12% da receita de venda e a alíquota de 9%, a percentagem a ser utilizada fica em 1,08%. Logo tem-se aproximadamente 6% de impostos sobre o fluxo de caixa (RECEITA FEDERAL, 2015).

O preço de venda da energia foi estipulado em 0,05 US\$/kWh, o que corresponde a 0,200 R\$/kWh (Dólar a 4,00 R\$). Esse valor foi adotado em função do valor de venda de energia atingida por usinas de biomassa no Leilão de Energia Nova (A-5), edital 30 de Abril de 2015, da ANEEL.

Para a micro e mini geração, o fluxo de caixa é a receita obtida com a compensação de energia, conforme a Equação 19.

$$F_n = (T_e \cdot PT_E \cdot \tau - \alpha \cdot I_0 - 12D_M \cdot T_E) \quad (19)$$

Onde:

F_n : Fluxo de caixa.

T_e : Preço da energia (US\$.kWh⁻¹).

PT_E : Potência de geração (kW).

τ : Disponibilidade da planta (horas.ano⁻¹).

α : Taxa de operação e manutenção (%/100).

I_0 : Investimento na planta (US\$).

D_M : Disponibilidade mensal (kWh).

T_E : Custo de disponibilidade anual do sistema de distribuição (US\$.kWh).

Para consumidores conectados na rede em baixa tensão, ainda que a energia injetada na rede seja superior ao consumo, será devido o pagamento

referente ao custo da disponibilidade, o qual equivale ao valor de 100 kWh por mês de energia no trifásico, segundo a Resolução Normativa nº 687/2015 da ANEEL.

Admitiu-se neste estudo que a energia gerada em aterros que se enquadram na micro e mini geração, são de responsabilidade dos municípios. Logo a energia gerada poderia ser utilizada na iluminação pública. Com isso a tarifa adotada para fins de análise financeira para este estudo foi a tarifa convencional B4a – Rede de Distribuição, a qual segundo a Resolução nº 1.897/2015 da ANEEL corresponde a 0,42911 R\$/kWh, incluindo os impostos ICMS/PIS e CONFINS, o que equivale a 0,107 US\$/kWh.

Quanto ao custo anual de operação e manutenção ($C_{O\&M}$), inclui pessoal, manutenção e serviços de apoio, o consumo interno de eletricidade e calor e contingências. O custo anual com operação e manutenção ($C_{O\&M}$) pode ser expresso pela Equação 20 (HOOGWIJK, 2004).

$$C_{O\&M} = \beta \cdot I \quad (20)$$

Onde:

β : Fração fixa do investimento.

I: Investimento total.

A fração fixa para operação e manutenção foi fixada neste estudo em 4%, ou seja, um valor superior a 2,5% estabelecido em outros projetos, procurando neste caso ser mais conservador na aplicação de taxas.

Quando o VPL for igual a zero, calcula-se o tempo de retorno ou payback para uma taxa de desconto fixa. A TIR seria a remuneração obtida pelo empreendedor na planta e é obtida anulando-se o VPL e mantendo-se o tempo de vida da planta constante. A Tabela 7 expõe os cenários financeiros assumidos para a determinação do VPL, payback e TIR.

Tabela 7. Cenários considerados para o cálculo da viabilidade econômica de geração de eletricidade com biogás para aterros de diferentes tamanhos

Cenário		Capacidade do Aterro (habitantes)	
		Estudo 1	Estudo 2
IRB 50%			
IRB 70%	$\eta_e = 25\%$	100.000	5.000.000
IRB 100%			
IRB 50%			
IRB 70%	$\eta_e = 25\%$	200.000	10.000.000
IRB 100%			
IRB 50%			
IRB 70%	$\eta_e = 25\%$	2.000.000	15.000.000
IRB 100%			
IRB 50%			
IRB 70%	$\eta_e = 25\%$	4.000.000	20.000.000
IRB 100%			

IRB – índice de recuperação do biogás; η_e – eficiência.

Fonte: Autor, 2015.

Em todos os cenários utilizou-se a eficiência média do estudo de 25%.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A gestão dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) municipais deve ser bem planejada a fim de minimizar danos ao meio ambiente e a saúde pública. A garantia de que estes resíduos tenham destinação adequada exige altos custos a administração, uma vez que grandes quantidades são geradas diariamente e de forma constante.

No Brasil, a Lei nº 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e contém ferramentas importantes para o enfrentamento dos principais problemas relacionados ao manejo inadequado dos resíduos sólidos como, por exemplo, a substituição dos lixões a céu aberto por aterros sanitários, forma mais adequada de destinação final.

Os resíduos depositados nos aterros sanitários possuem potencial energético, uma vez que, ao sofrerem decomposição, geram um gás combustível – o biogás. A vazão de biogás gerada nos aterros depende da quantidade de resíduos que ele recebe, que por sua vez, depende da população atendida por este aterro.

A seguir são apresentados os resultados obtidos desde a geração de resíduos até a análise de viabilidade econômica para o Estudo 1, que compreende aterros sanitários que atendem populações entre 100.000 e 4.000.000 de habitantes e para o Estudo 2, com populações entre 5.000.000 e 20.000.000 de habitantes.

4.1 Estudo 1

4.1.1 Geração de resíduos sólidos urbanos

Ao estimar a quantidade de resíduos depositados em um aterro é necessário considerar o crescimento populacional previsto para os anos de funcionamento do local que, segundo dados do IBGE (2010), tem um crescimento de aproximadamente 1,122% ao ano para a população brasileira.

Partindo da previsão da população que deverá ser atendida, o fluxo anual de resíduos é determinado, levando em conta a porcentagem de resíduos que vai para

o aterro e a geração per capita. Dados divulgados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), no ano de 2016, referentes ao ano de 2014, revelam que cada pessoa gera 1,05 quilo de resíduos a cada dia e que 80% de todo o resíduo gerado é coletado e tem no aterramento sua destinação final.

A Tabela 8 apresenta a quantidade média de resíduos gerados, calculada a partir das Equações 5 e 6, para as populações abordadas no Estudo 1, considerando o período de vida útil do aterro de 15 anos.

Tabela 8. Quantidade anual média de Resíduos Sólidos Urbanos gerados em 15 anos de vida útil de um aterro para o Estudo 1

População (habitantes)	Geração anual média de Resíduos Sólidos Urbanos (toneladas.ano⁻¹)
100.000,00	32.124,09
150.000,00	48.186,14
200.000,00	64.248,18
250.000,00	80.310,23
300.000,00	96.372,27
350.000,00	112.434,32
400.000,00	128.496,36
450.000,00	144.558,41
500.000,00	160.620,45
1.000.000,00	321.240,91
1.500.000,00	481.861,36
2.000.000,00	642.481,82
2.500.000,00	803.102,27
3.000.000,00	963.722,73
3.500.000,00	1.124.343,18
4.000.000,00	1.284.963,64

Fonte: Autor, 2015

As quantidades de resíduo gerado acompanham o crescimento da população. Logo, quanto maior a população atendida pelo aterro, maior será a destinação de lixo no mesmo.

Segundo Bidart (2013), os resíduos sólidos urbanos oferecem grande atratividade potencial e econômico, pois os aterros podem fornecer biometano de baixo custo e, por isso, a transformação de resíduos em energia deve ser considerada uma alternativa de nova tecnologia.

Sendo os resíduos a matéria prima para a geração do biogás, conseqüentemente, quanto maior a população que o aterro atende, maior será a quantidade de resíduos e, assim, de biogás.

4.1.2 Potencial de produção de biogás

Para estimar a vazão de biogás nos aterros, além da quantidade de resíduos, é necessário considerar sua composição gravimétrica, a temperatura média na zona de degradação anaeróbia e demais variáveis. A Tabela 9 apresenta os valores utilizados para os cálculos e resultados parciais obtidos, sendo estes mesmos valores utilizados no Estudo 2.

Tabela 9. Variáveis utilizadas na estimativa da vazão de metano nos Estudos 1 e 2

Variáveis	Valor	Fonte
Composição gravimétrica	Fração de papel e papelão: 13,1% Fração de restos de alimentos: 51,4% Fração de tecidos: 16,7%	IBGE, 2010
Temperatura na zona anaeróbia dos resíduos (T)	35°C	BORBA, 2006
Fator de correção de metano (MCF)	1	IPCC, 2006
Fração de carbono orgânico degradável no lixo (DOC)	0,168745	Valor calculado (Equação 1)
Fração de DOC que pode se decompor (DOC _f)	0,77	Valor calculado (Equação 2)
Fração de metano no biogás (F)	50%	IPCC, 2006
Potencial de geração de metano do resíduo (L ₀)	120,8460286 m ³ .tRSD ⁻¹	Valor calculado (Equação 3)
Constante de decaimento (k)	0,115	IPCC, 2006

Fonte: Autor, 2015.

Na Tabela 9, os valores adotados foram os mais recentes divulgados a nível nacional. Os valores calculados de 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.

O potencial de geração de metano no resíduo (L_0) foi de $120,8 \text{ m}^3.\text{tRSD}^{-1}$, valor dentro da faixa mencionada por Kumar & Shrama (2014) em seus estudos, que foi de 108 a $190 \text{ m}^3.\text{tRSD}^{-1}$. O potencial de geração também está de acordo com o descrito por Pecora; Figueiredo; Coelho & Velázquez (2008) e Figueiredo (2007).

Estudos de quantificação do biogás publicados nos últimos anos apontam uma grande quantidade de metano gerado pela decomposição dos resíduos sólidos urbanos nos aterros sanitários brasileiros e, a partir da disponibilidade deste combustível, a possibilidade de sua recuperação para uso energético, principalmente em aterros de grande porte (PECORA; VELÁZQUEZ; COELHO, 2009; BORBA, 2006; OLIVEIRA, 2009; VANZIN, 2006).

Assim, partindo da quantidade de resíduos sólidos gerada anualmente e dos valores informados na Tabela 9 obteve-se pela Equação 4 a vazão anual de metano para o Estudo 1, conforme a Tabela 10, a fim de verificar a quantidade disponível deste combustível para transformação em energia elétrica.

Tabela 10. Geração anual de metano ($\text{m}^3.\text{h}^{-1}$) para o Estudo 1

População Ano	100.000	150.000	200.000	250.000	300.000	350.000	400.000	450.000
1	22,35	33,52	44,70	55,87	67,04	78,22	89,39	100,57
2	42,75	64,12	85,49	106,86	128,24	149,61	170,98	192,35
3	61,39	92,08	122,77	153,47	184,16	214,85	245,55	276,24
4	78,45	117,67	156,90	196,12	235,35	274,57	313,80	353,02
5	94,09	141,13	188,18	235,22	282,27	329,31	376,36	423,40
6	108,45	162,68	216,90	271,13	325,36	379,58	433,81	488,03
7	121,67	182,50	243,33	304,16	365,00	425,83	486,66	547,50
8	133,85	200,77	267,69	334,62	401,54	468,46	535,39	602,31

9	145,10	217,65	290,20	362,75	435,30	507,85	580,40	652,95
10	155,52	233,28	311,04	388,80	466,56	544,31	622,07	699,83
11	165,19	247,78	330,38	412,97	495,57	578,16	660,76	743,35
12	174,19	261,28	348,38	435,47	522,57	609,66	696,76	783,85
13	182,59	273,88	365,18	456,47	547,76	639,06	730,35	821,64
14	190,45	285,67	380,89	476,12	571,34	666,56	761,79	857,01
15	197,82	296,73	395,64	494,56	593,47	692,38	791,29	890,20
16	162,32	243,48	324,64	405,79	486,95	568,11	649,27	730,43
17	144,68	217,03	289,37	361,71	434,05	506,40	578,74	651,08
18	128,97	193,45	257,93	322,42	386,90	451,38	515,87	580,35
19	114,96	172,43	229,91	287,39	344,87	402,35	459,83	517,30
20	102,47	153,70	204,94	256,17	307,41	358,64	409,87	461,11
21	91,34	137,01	182,67	228,34	274,01	319,68	365,35	411,02
22	81,41	122,12	162,83	203,54	244,24	284,95	325,66	366,37
23	72,57	108,86	145,14	181,43	217,71	254,00	290,28	326,57
24	64,69	97,03	129,37	161,72	194,06	226,40	258,75	291,09
25	57,66	86,49	115,32	144,15	172,98	201,81	230,64	259,47
26	51,40	77,09	102,79	128,49	154,19	179,89	205,58	231,28
27	45,81	68,72	91,62	114,53	137,44	160,34	183,25	206,16
28	40,84	61,25	81,67	102,09	22,51	142,92	163,34	183,76
29	36,40	54,60	72,80	91,00	109,20	127,40	145,60	163,80
30	32,45	48,67	64,89	81,11	97,34	113,56	129,78	146,00
31	28,92	43,38	57,84	72,30	86,76	101,22	115,68	130,14
32	25,78	38,67	51,56	64,45	77,34	90,23	103,12	116,00
33	22,98	34,47	45,96	57,45	68,94	80,42	91,91	103,40
34	20,48	30,72	40,96	51,21	61,45	71,69	81,93	92,17
35	18,26	27,39	36,51	45,64	54,77	63,90	73,03	82,16

Fonte: Autor, 2015.

Tabela 10. Geração anual de metano (m³.h⁻¹) para o Estudo 1 (continuação)

População	500.000	1.000.000	1.500.000	2.000.000	2.500.000	3.000.000	3.500.000	4.000.000
Ano								
1	111,74	223,48	335,22	446,96	558,70	670,44	782,18	893,92
2	213,73	427,45	641,18	854,91	1.068,63	1.282,36	1.496,09	1.709,81
3	306,93	613,87	920,80	1.227,74	1.534,67	1.841,61	2.148,54	2.455,48
4	392,24	784,49	1.176,73	1.568,98	1.961,22	2.353,46	2.745,71	3.137,95
5	470,45	940,89	1.411,34	1.881,79	2.352,24	2.822,68	3.293,13	3.763,58
6	542,26	1.084,52	1.626,78	2.169,04	2.711,30	3.253,56	3.795,82	4.338,09
7	608,33	1.216,66	1.824,99	2.433,31	3.041,64	3.649,97	4.258,30	4.866,63
8	669,23	1.338,46	2.007,70	2.676,93	3.346,16	4.015,39	4.684,62	5.353,86

9	725,50	1.450,99	2.176,49	2.901,98	3.627,48	4.352,97	5.078,47	5.803,97
10	777,59	1.555,18	2.332,78	3.110,37	3.887,96	4.665,55	5.443,15	6.220,74
11	825,95	1.651,90	2.477,84	3.303,79	4.129,74	4.955,69	5.781,64	6.607,59
12	870,95	1.741,90	2.612,84	3.483,79	4.354,74	5.225,69	6.096,63	6.967,58
13	912,94	1.825,88	2.738,81	3.651,75	4.564,69	5.477,63	6.390,57	7.303,50
14	952,23	1.904,46	2.856,69	3.808,93	4.761,16	5.713,39	6.665,62	7.617,85
15	989,11	1.978,22	2.967,33	3.956,44	4.945,55	5.934,66	6.923,77	7.912,88
16	811,59	1.623,18	2.434,76	3.246,35	4.057,94	4.869,53	5.681,12	6.492,70
17	723,42	1.446,84	2.170,27	2.893,69	3.617,11	4.340,53	5.063,95	5.787,38
18	644,83	1.289,67	1.934,50	2.579,34	3.224,17	3.869,00	4.513,84	5.158,67
19	574,78	1.149,57	1.724,35	2.299,13	2.873,92	3.448,70	4.023,48	4.598,27
20	512,34	1.024,68	1.537,03	2.049,37	2.561,71	3.074,05	3.586,40	4.098,74
21	456,68	913,37	1.370,05	1.826,74	2.283,42	2.740,11	3.196,79	3.653,48
22	407,07	814,15	1.221,22	1.628,29	2.035,37	2.442,44	2.849,51	3.256,59
23	362,85	725,70	1.088,55	1.451,40	1.814,26	2.177,11	2.539,96	2.902,81
24	323,43	646,87	970,30	1.293,73	1.617,17	1.940,60	2.264,03	2.587,47
25	288,30	576,59	864,89	1.153,19	1.441,49	1.729,78	2.018,08	2.306,38
26	256,98	513,96	770,94	1.027,91	1.284,89	1.541,87	1.798,85	2.055,83
27	229,06	458,12	687,19	916,25	1.145,31	1.374,37	1.603,43	1.832,50
28	204,18	408,36	612,53	816,71	1.020,89	1.225,07	1.429,25	1.633,43
29	182,00	363,99	545,99	727,99	909,99	1.091,98	1.273,98	1.455,98
30	162,23	324,45	486,68	648,91	811,13	973,36	1.135,58	1.297,81
31	144,60	289,21	433,81	578,41	723,02	867,62	1.012,22	1.156,82
32	128,89	257,79	386,68	515,58	644,47	773,37	902,26	1.031,15
33	114,89	229,78	344,68	459,57	574,46	689,35	804,24	919,14
34	102,41	204,82	307,23	409,64	512,05	614,47	716,88	819,29
35	91,29	182,57	273,86	365,14	456,43	547,71	639,00	730,28

Fonte: Autor, 2015.

A Tabela 10 quantifica o metano gerado para cada população do Estudo 1, durante 35 anos. A quantidade de metano é crescente para todas as populações até o ano 15. Este ano limita a vida útil do aterro sanitário, sendo o metano gerado a partir do ano 16 proveniente apenas dos resíduos já depositados no local. Mesmo sem acréscimo de resíduos, o aterro continuará a gerar metano por alguns anos, diminuindo a vazão com o decorrer dos anos, conforme indicado por Russo, 2003 e Zanette, 2009. A Figura 7 ilustra este comportamento.

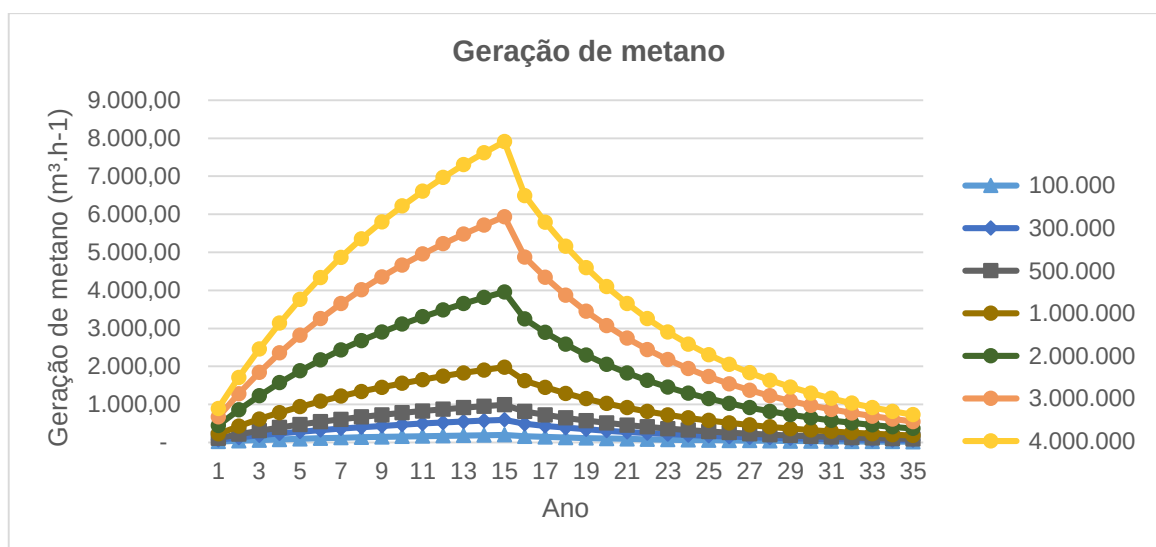


Figura 7. Curvas de geração de metano para o Estudo 1

Fonte: Autor, 2015.

As linhas da Figura 7 demonstram o crescimento anual do nível de produção do metano para as populações até o ano 15, decaindo em seguida. Os valores aqui indicados se referem a geração total de biogás nos aterros sanitários. Como não é possível captar e utilizar todo metano produzido, se faz necessário considerar as perdas no processo.

4.1.3 Índice de recuperação do metano (IRB)

De todo o metano gerado no aterro sanitário, apenas uma parte é recuperada para a utilização como combustível. Segundo estudos de Abreu (2009), cenários com índices de recuperação de 50% são considerados baixos, de 70% médios e de 90% altos. Considerando estes cenários, neste estudo adotou-se índices de recuperação de metano de 50%, 70% e 100%, onde a recuperação total de metano representaria uma condição ideal de aproveitamento. Segundo Ensinas (2003), o aproveitamento pode representar 100% quando a cobertura dos resíduos é feita com mantas de polietileno de alta densidade ou camadas de solo argiloso. A Tabela 11 indica os índices de recuperação de metano para o Estudo 1.

Tabela 11. Índice de recuperação de metano (IRB) para o Estudo 1

Índice de recuperação de metano (m ³ CH ₄ .h ⁻¹)			
População	IRB 50%	IBR 70%	IBR 100%
100.000	45,97	64,36	91,95
150.000	68,96	96,55	137,92
200.000	91,95	128,73	183,90
250.000	114,94	160,91	229,87
300.000	137,92	193,09	275,85
350.000	160,91	225,27	321,82
400.000	183,90	257,46	367,79
450.000	206,88	289,64	413,77
500.000	229,87	321,82	459,74
1.000.000	459,74	643,64	919,49
1.500.000	689,61	965,46	1.379,23
2.000.000	919,49	1.287,28	1.838,97
2.500.000	1.149,36	1.609,10	2.298,72
3.000.000	1.379,23	1.930,92	2.758,46
3.500.000	1.609,10	2.252,74	3.218,20
4.000.000	1.838,97	2.574,56	3.677,95

Fonte: Autor, 2015.

Baseando-se nos valores de geração do metano, a Tabela 11 registra a captação total do metano gerado no aterro, que seria uma recuperação de 100% do metano e índices de 50% e 70% de recuperação. O índice de 50% é representativo para aterros que não possuem um gerenciamento com os devidos cuidados para a captação e canalização do biogás, sendo grande parte do potencial perdido. Aterros com bons sistemas de gerenciamento do metano diminuem as perdas fugitivas e com isso permitem um índice de recuperação maior, sendo representado neste estudo por 70%. Por fim, um sistema com gerenciamento do metano e impermeabilização eficientes representam um sistema de aproveitamento ideal, com recuperação total do gás, ou muito próximo a isso. Assim, quanto maior o índice de recuperação do metano, maior será a quantidade disponível deste combustível para a geração de energia elétrica.

Para Tsagarakis (2007) é vital que todo o metano produzido seja plenamente utilizado sempre que possível, por razões econômicas e ambientais, porém, a precariedade dos aterros muitas vezes não permite um aproveitamento tão satisfatório.

As Figura 8 mostra o gráfico com os índices de recuperação indicados acima para o Estudo 1.

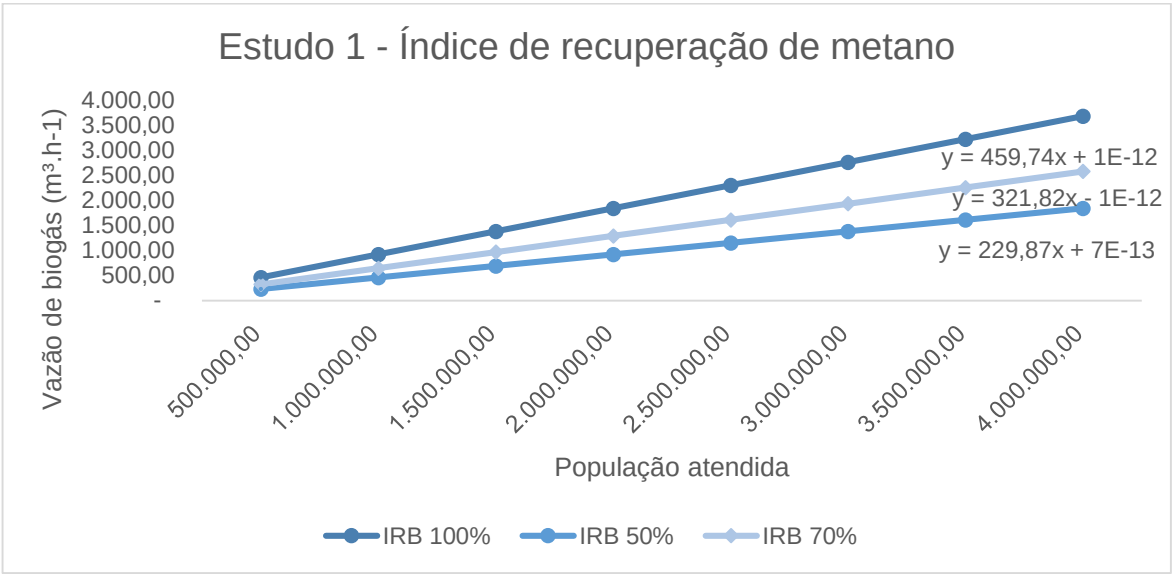


Figura 8. Gráfico de recuperação de metano para o Estudo 1

Fonte: Autor, 2015.

As retas representadas na Figura 8 foram obtidas com a vazão de metano e a capacidade do aterro para os índices de recuperação utilizados. Com base nestas informações foram construídas as equações de correlação dessa produção, indicadas na Tabela 12, para cada cenário de recuperação do metano.

Tabela 12. Equações de correlação para produção de metano em função da capacidade do aterro – Estudo 1

Cenário	Equação	Capacidade do Aterro x (habitantes)
IRB 50%	$P_B = 459,74.x + 1.10^{-12}$	$100.000 \leq x \leq 4.000.000$
IRB 70%	$P_B = 321,82.x - 1.10^{-12}$	$100.000 \leq x \leq 4.000.000$
RB 100%	$P_B = 229,87.x + 7.10^{-13}$	$100.000 \leq x \leq 4.000.000$

Fonte: Autor, 2015.

As equações de correlação de produção de metano em função da capacidade do aterro são dadas em função da variável x , que representa o número de habitantes atendidos. Através destas equações é possível estimar a geração de metano para populações entre 100.000 e 4.000.000 habitantes.

4.1.4 Potencial de geração de energia elétrica

A Tabela 13 mostra o potencial de geração de eletricidade em função da população atendida pelo aterro para o Estudo 1, calculado pela Equação 8, considerando os índices de recuperação de metano citados na Tabela 11.

Tabela 13. Estudo 1 - Potência de geração de eletricidade para 20%, 25% e 30% de eficiência (kW)

População	IRB	IRB	IRB	IRB	IRB	IRB	IRB	IRB	IRB
	50%	70%	100%	50%	70%	100%	50%	70%	100%
	η_1 20%			η_2 25%			η_3 30%		
100.000	49,65	69,51	99,30	62,07	86,89	124,13	74,48	104,27	148,96
150.000	74,48	104,27	148,96	93,10	130,34	186,20	111,72	156,40	223,44
200.000	99,30	139,03	198,61	124,13	173,78	248,26	148,96	208,54	297,91
250.000	124,13	173,78	248,26	155,16	217,23	310,33	186,20	260,67	372,39
300.000	148,96	208,54	297,91	186,20	260,67	372,39	223,44	312,81	446,87
350.000	173,78	243,30	347,57	217,23	304,12	434,46	260,67	364,94	521,35
400.000	198,61	278,05	397,22	248,26	347,57	496,52	297,91	417,08	595,83
450.000	223,44	312,81	446,87	279,29	391,01	558,59	335,15	469,21	670,31
500.000	248,26	347,57	496,52	310,33	434,46	620,65	372,39	521,35	744,78
1.000.000	496,52	695,13	993,05	620,65	868,91	1.241,31	744,78	1.042,70	1.489,57
1.500.000	744,78	1.042,70	1.489,57	930,98	1.303,37	1.861,96	1.117,18	1.564,05	2.234,35
2.000.000	993,05	1.390,26	1.986,09	1.241,31	1.737,83	2.482,61	1.489,57	2.085,40	2.979,14
2.500.000	1.241,31	1.737,83	2.482,61	1.551,63	2.172,29	3.103,27	1.861,96	2.606,74	3.723,92
3.000.000	1.489,57	2.085,40	2.979,14	1.861,96	2.606,74	3.723,92	2.234,35	3.128,09	4.468,70
3.500.000	1.737,83	2.432,96	3.475,66	2.172,29	3.041,20	4.344,57	2.606,74	3.649,44	5.213,49
4.000.000	1.986,09	2.780,53	3.972,18	2.482,61	3.475,66	4.965,23	2.979,14	4.170,79	5.958,27

Fonte: Autor, 2015.

A eficiência de conversão de gás metano em eletricidade utilizando motores de combustão interna varia entre 20 e 30% (PECORA, 2006; BOVE & LUNGHI, 2006; SOUZA et al., 2013). Assim, as eficiências utilizadas nos cálculos foram de 20, 25 e 30%. Quanto ao poder calorífico inferior do metano, considerou-se 37,2 MJ.m⁻³ (GÓMEZ et al, 2010).

Quanto aos resultados de potencial de geração de energia apresentados na Tabela 13, a potência disponível é maior quanto maior a capacidade do aterro, o índice de recuperação de metano e a eficiência do motor. Assim, o pior cenário do Estudo 1, com IRB de 50%, eficiência de 20% e capacidade de 100.000 habitantes teve potência de 49,65 kW, enquanto o melhor cenário, com IRB de 100%, eficiência de 30% e capacidade de 4.000.000 de habitantes apresentou potência de 5.958,27 kW.

Com base nas informações da Tabela 13 temos os gráficos de potência em função do tamanho do aterro sanitário para os índices de recuperação do metano de 50%, 70% e 100%, sendo apresentados nas Figuras 9, 10 e 11, respectivamente.

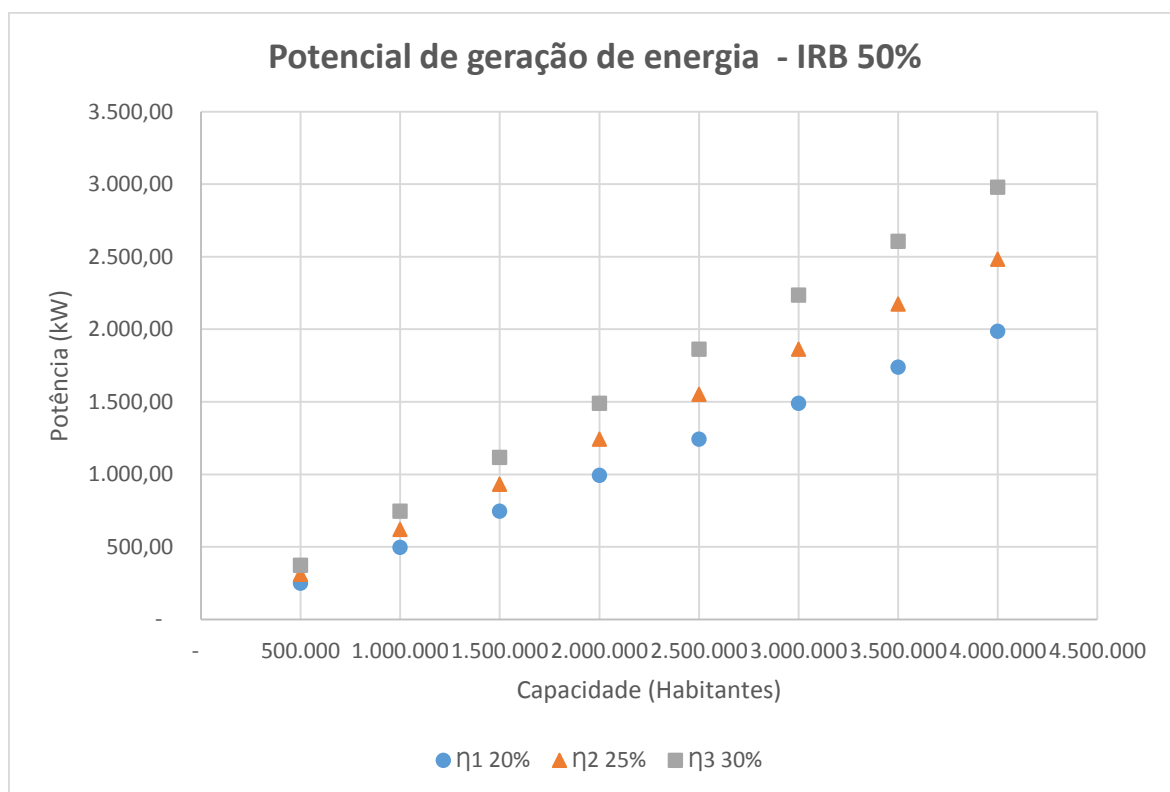


Figura 9. Estudo 1 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de metano (IRB) de 50%
 Fonte: Autor, 2015.

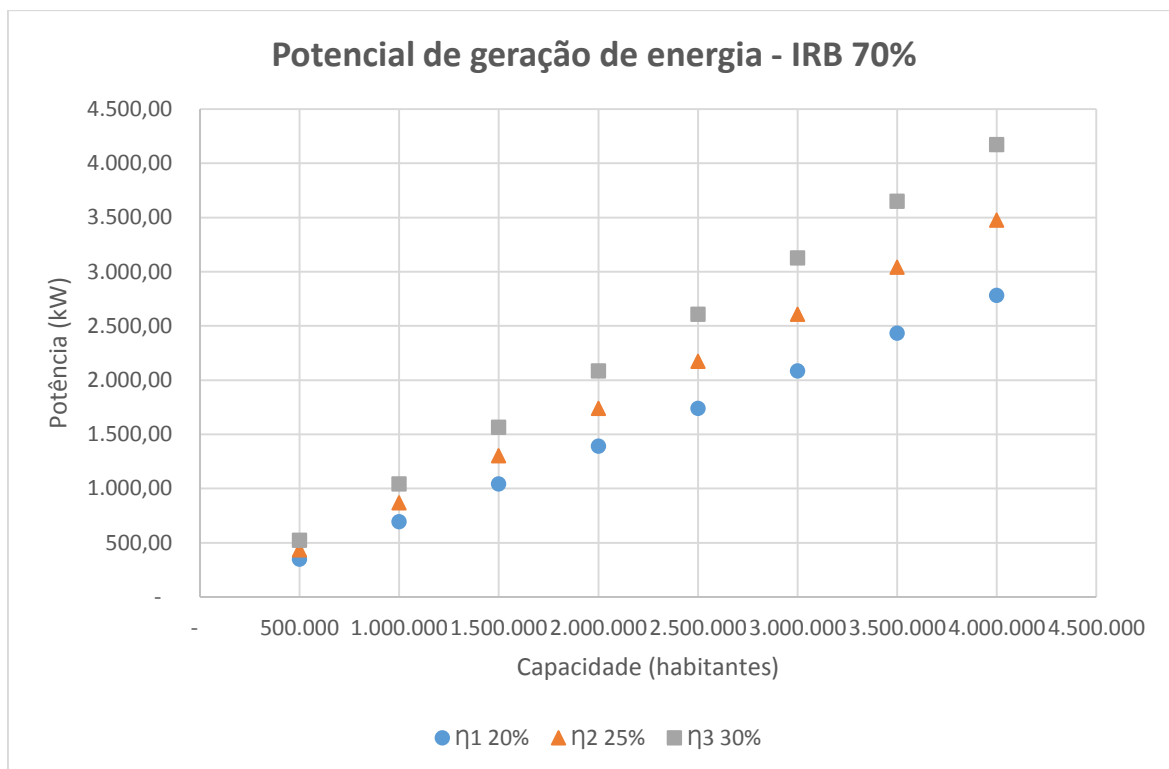


Figura 10. Estudo 1 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de metano (IRB) de 70%
 Fonte: Autor, 2015.

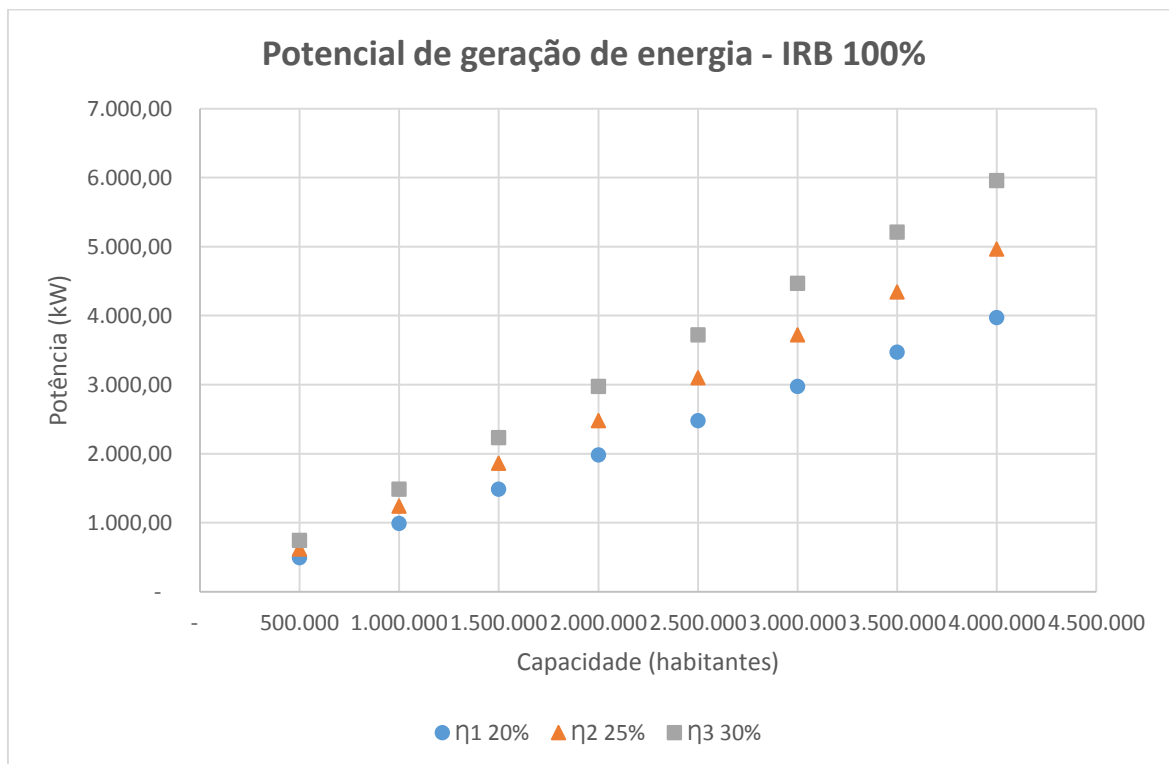


Figura 11. Estudo 1 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de metano (IRB) de 100%
 Fonte: Autor, 2015.

O potencial energético apresentado permitiu ainda a obtenção das equações de correlação do potencial de energia em função da capacidade dos aterros (x), conforme Equação 9, indicado na Tabela 14.

Tabela 14. Correlação de potência em função da capacidade do aterro para Estudo 1

Cenário		Equação	Capacidade do Aterro x (habitantes)
IRB 50%	n= 20%	$P_B = 48,398.x - 1.10^{-13}$	$100.000 \leq x \leq 4.000.000$
	n= 25%	$P_B = 60,497.x$	
	n= 30%	$P_B = 72,597.x - 3.10^{-13}$	
IRB 70%	n= 20%	$P_B = 0,0014.x + 2.10^{-13}$	$100.000 \leq x \leq 4.000.000$
	n= 25%	$P_B = 0,0017.x + 2.10^{-13}$	
	n= 30%	$P_B = 0,002.x + 5.10^{-13}$	
IRB 100%	n= 20%	$P_B = 496,52.x - 1.10^{-12}$	$100.000 \leq x \leq 4.000.000$
	n= 25%	$P_B = 620,65.x$	
	n= 30%	$P_B = 744,78.x$	

Fonte: Autor, 2015.

A partir das equações apresentadas na Tabela 13 pode-se determinar a potência disponível para os cenários adotados e capacidades do aterro entre 100.000 e 4.000.000 de habitantes.

4.1.5 Custo de geração de energia elétrica

Para o cálculo do custo de geração de energia elétrica, foi utilizada como taxa de desconto a taxa Selic referente ao mês de fevereiro de 2016, com valor de 14,15%, segundo o Banco Central do Brasil. Quanto a taxa de operação e manutenção considerou-se 4%, ou seja, uma taxa conservadora se comparada aos 2,5% comumente utilizada. O período de vida útil foi de 15 anos para os cálculos de custo de eletricidade e também para os demais parâmetros financeiros, já que de acordo com dados da PNUD (2010), em seus estudos sobre o potencial de geração de energia a partir de resíduos de saneamento, o uso do biogás como uma

fonte alternativa e renovável de energia apenas é viável em projetos com vida útil mínima de 10 a 15 anos.

O custo estimado de geração de energia elétrica considera ainda os índices de recuperação de metano e as eficiências já citadas. A Tabela 15 traz o custo de geração de energia elétrica para o Estudo 1, calculado de acordo com a Equação 12.

Tabela 15. Estudo 1 – Custo de geração de energia elétrica

Custo de geração (US\$.kWh ⁻¹)									
IRB 50%				IRB 70%			IRB 100%		
Eficiência									
População	20%	25%	30%	20%	25%	30%	20%	25%	30%
100.000	0,102	0,098	0,095	0,096	0,092	0,089	0,090	0,086	0,083
150.000	0,095	0,091	0,088	0,089	0,085	0,082	0,083	0,080	0,077
200.000	0,090	0,086	0,083	0,084	0,081	0,078	0,079	0,076	0,073
250.000	0,086	0,082	0,080	0,081	0,077	0,075	0,076	0,072	0,070
300.000	0,083	0,080	0,077	0,078	0,075	0,072	0,073	0,070	0,068
350.000	0,081	0,077	0,075	0,076	0,073	0,070	0,071	0,068	0,066
400.000	0,079	0,076	0,073	0,074	0,071	0,069	0,069	0,066	0,064
450.000	0,077	0,074	0,071	0,072	0,069	0,067	0,068	0,065	0,063
500.000	0,076	0,072	0,070	0,071	0,068	0,066	0,066	0,064	0,061
1.000.000	0,066	0,064	0,061	0,062	0,060	0,058	0,058	0,056	0,054
1.500.000	0,061	0,059	0,057	0,058	0,055	0,054	0,054	0,052	0,050
2.000.000	0,058	0,056	0,054	0,055	0,052	0,051	0,051	0,049	0,047
2.500.000	0,056	0,054	0,052	0,052	0,050	0,049	0,049	0,047	0,045
3.000.000	0,054	0,052	0,050	0,051	0,049	0,047	0,047	0,045	0,044
3.500.000	0,052	0,050	0,049	0,049	0,047	0,046	0,046	0,044	0,043
4.000.000	0,051	0,049	0,047	0,048	0,046	0,045	0,045	0,043	0,042

Fonte: Autor, 2016.

Os valores presentes na Tabelas 15 demonstram que o custo de produção de energia elétrica decresce de acordo com o tamanho do aterro sanitário em função da chamada economia de escala, sendo que, quanto maior for a planta, menor serão os custos específicos com investimento em equipamentos.

Para o menor aterro considerado no Estudo 1, que atende a demanda de 100.000 habitantes, o custo de geração de eletricidade seria de US\$ 0,092 para cada kWh, considerando a eficiência média de 25% e o índice de recuperação do metano intermediário de 70%, com potência instalada de aproximadamente 87 kW.

Já para o maior aterro, com 4.000.000 de habitantes, o custo seria de US\$ 0,046 a cada kWh, considerando a mesma eficiência e índice de recuperação, com potência instalada de aproximadamente 3.500 kW.

Se considerarmos que a tarifa convencional de energia, segundo a Resolução Aneel nº 1.897 de 16 de junho de 2015 é de R\$ 0,42911 por kWh incluindo os impostos e que o dólar em fevereiro de 2016 foi de R\$ 4,00, temos que o custo da energia é de US\$ 0,107 por kWh. Assim, o custo da energia produzida pelo biogás de aterro sanitário, nas capacidades abordadas no Estudo 1, está abaixo do valor do mercado, sendo, portanto, uma alternativa econômica para prefeituras municipais, conforme proposto neste trabalho.

As Figuras 12, 13 e 14 mostram o custo de geração de eletricidade em função da capacidade do aterro para os índices de recuperação do metano de 50%, 70% e 100%, respectivamente.

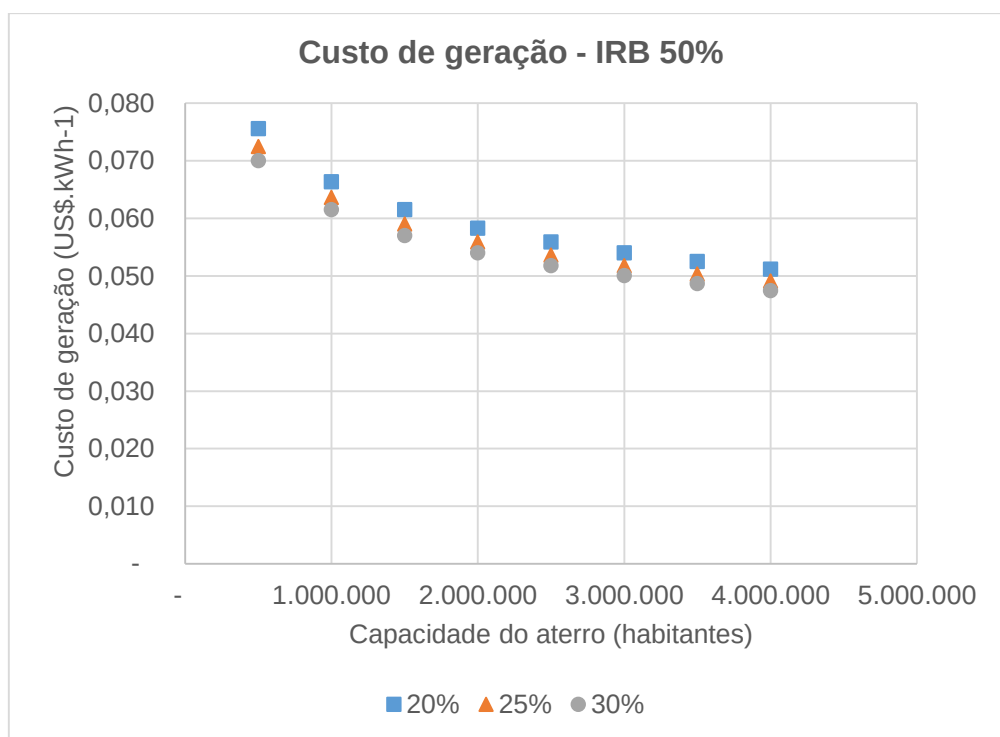


Figura 12. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 50%

Fonte: Autor, 2016.

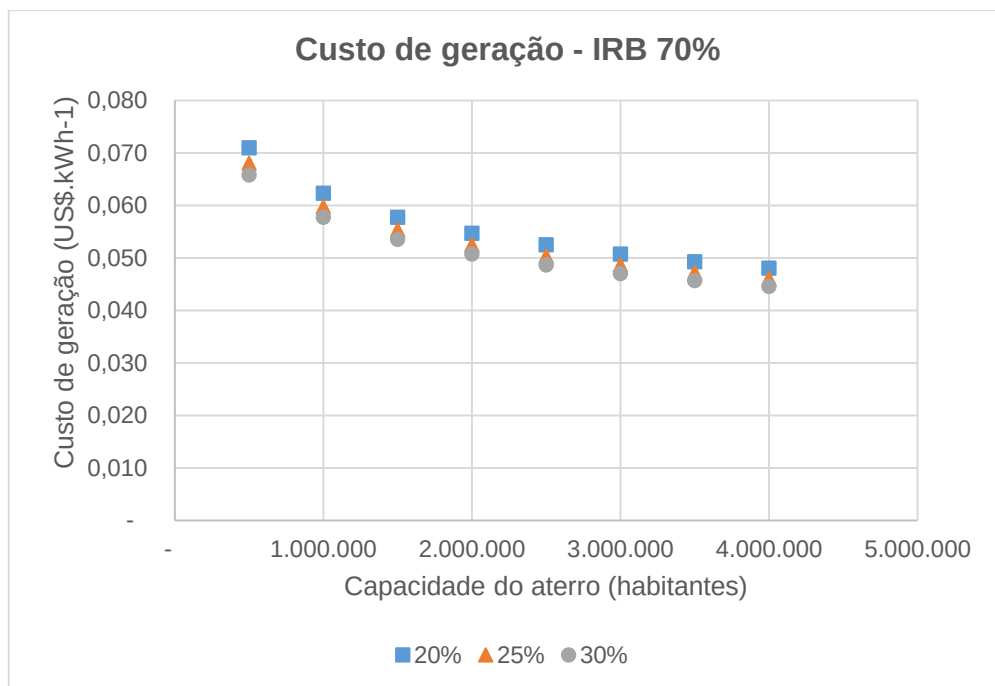


Figura 13. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 70%
 Fonte: Autor, 2016.

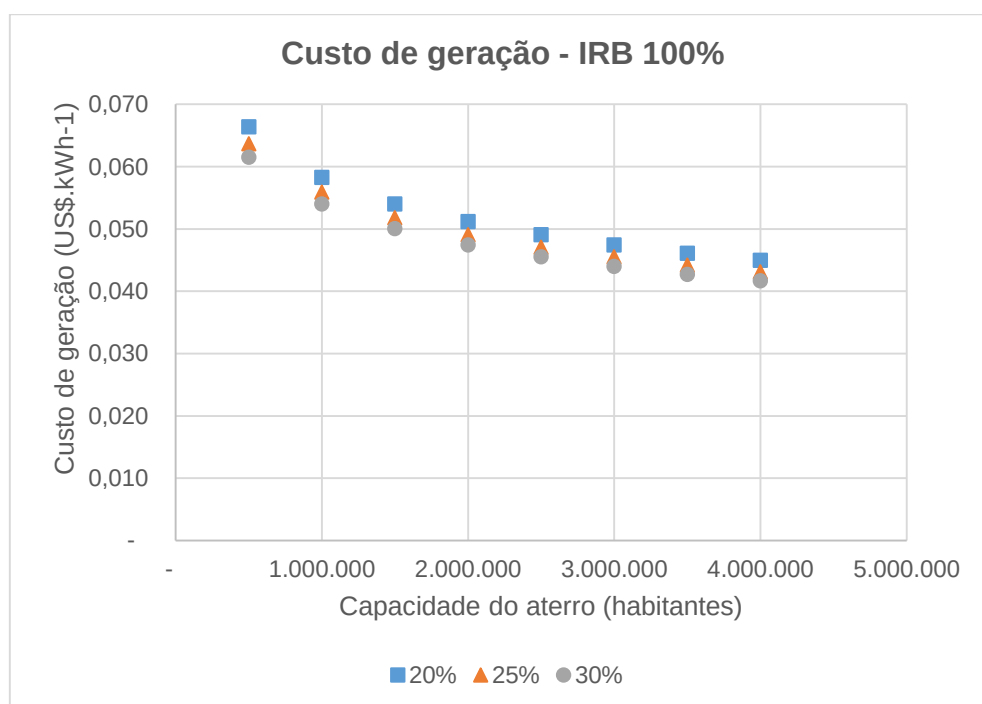


Figura 14. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 100%
 Fonte: Autor, 2016.

As equações de correlação para o custo de energia nos diferentes cenários, calculados pela Equação 16, estão na Tabela 16.

Tabela 16. Correlações de custo de produção de eletricidade para capacidades do Estudo 1

Cenários		Equação	Capacidade do Aterro π (Habitantes)
IRB 50%	$\eta = 20\%$	$C_e = 0,0755 \cdot \pi^{-0,187}$	$100.000 \leq \pi \leq 4.000.000$
	$\eta = 25\%$	$C_e = 0,0725 \cdot \pi^{-0,187}$	$100.000 \leq \pi \leq 4.000.000$
	$\eta = 30\%$	$C_e = 0,07 \cdot \pi^{-0,187}$	$100.000 \leq \pi \leq 4.000.000$
IRB 70%	$\eta = 20\%$	$C_e = 0,0709 \cdot \pi^{-0,187}$	$100.000 \leq \pi \leq 4.000.000$
	$\eta = 25\%$	$C_e = 0,068 \cdot \pi^{-0,187}$	$100.000 \leq \pi \leq 4.000.000$
	$\eta = 30\%$	$C_e = 0,0657 \cdot \pi^{-0,187}$	$100.000 \leq \pi \leq 4.000.000$
IRB 100%	$\eta = 20\%$	$C_e = 0,0663 \cdot \pi^{-0,187}$	$100.000 \leq \pi \leq 4.000.000$
	$\eta = 25\%$	$C_e = 0,0636 \cdot \pi^{-0,187}$	$100.000 \leq \pi \leq 4.000.000$
	$\eta = 30\%$	$C_e = 0,0615 \cdot \pi^{-0,187}$	$100.000 \leq \pi \leq 4.000.000$

Fonte: Autor, 2016.

Utilizando as Equações expostas na Tabela 16, pode-se determinar o custo de geração de energia para as capacidades do aterro (π) entre 100.000 e 4.000.000 de habitantes, referentes ao Estudo 1.

4.1.6 Análise de viabilidade econômica

De acordo com Bidart (2013), a literatura é extensa em referência ao potencial da biomassa, porém, a viabilidade econômica é menos investigada e, em muitos casos, pouco compreendida. Assim, a fim de aprofundar a análise de indicadores financeiros, determinou-se outros parâmetros, como o valor presente líquido (VPL) (Equação 17), o payback e a taxa interna de retorno (TIR), para cenários considerando a eficiência de 25% e algumas faixas de atendimento populacional pré-determinadas.

Considerou-se, neste caso, a venda de energia por meio de compensação, conforme Resolução Normativa nº 687/2015, já que a potência nas capacidades

estudadas não ultrapassa os 5 MW, sendo mini e microgeradores de energia. O cálculo do benefício anual com a compensação foi feito considerando a tarifa na modalidade convencional prevista na Resolução ANEEL nº 1.897 de 16 de junho de 2015, correspondendo a R\$ 0,429 a cada kWh incluindo os impostos de ICMS e PIS/CONFINS ou 0,107 US\$.kWh⁻¹ considerando o dólar a R\$ 4,00.

No Estudo 1, a análise de viabilidade econômica foi realizada para capacidades do aterro de 100.000, 200.000, 2.000.000 e 4.000.000 de habitantes, como apresentado na Tabela 17.

Tabela 17. Estudo 1. Análise de viabilidade econômica

População	Eficiência (%)	IRB (%)	Potência (kW)	VPL (US\$)	Payback (Anos)	TIR (%)
100.000	25	50	62,07	27.478,07	12	16
		70	86,89	64.133,16	10	18
		100	124,13	127.931,70	9	20
200.000	25	50	124,13	127.931,70	9	20
		70	173,78	223.945,34	8	22
		100	248,26	383.450,92	7	24
2.000.000	25	50	1.241,31	3.110.636,49	4	35
		70	1.737,83	4.644.488,64	4	37
		100	2.482,61	7.045.870,66	4	40
4.000.000	25	50	2.482,61	7.045.870,66	4	40
		70	3.475,66	10.372.658,29	3	43
		100	4.965,23	15.539.549,86	3	47

Fonte: Autor, 2016.

Na Tabela 17 nota-se que mesmo a menor capacidade considerada no Estudo 1, com 100.000 habitantes, apresentou VPL maior que zero, ou seja, estes projetos se mostram economicamente atrativos e, portanto, devem ser aceitos. Quanto ao TIR, verifica-se que o valor obtido é maior que a taxa de desconto utilizada no estudo, se mostrando assim atrativo.

O fluxo de caixa do Estudo 1 foi calculado pela Equação 19.

As Figuras 15, 16 e 17 apresentam o fluxo de caixa em função do tempo, para 100.000 habitantes, para os índices de recuperação do metano de 50%, 70% e 100%, respectivamente.

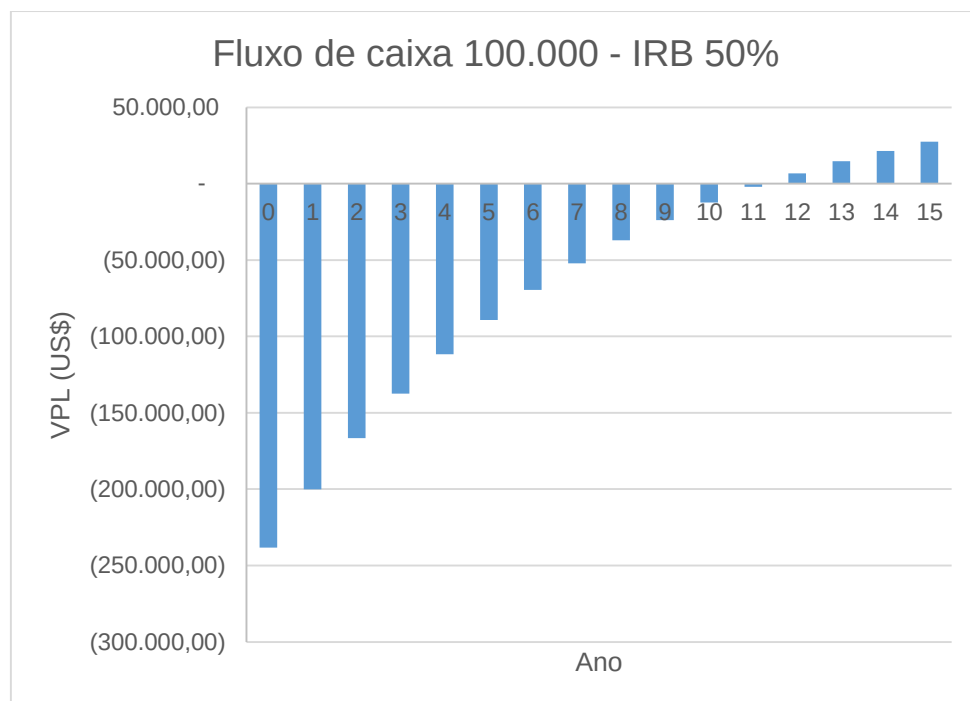


Figura 15. Fluxo de caixa para 100.000 habitantes e IRB de 50%
Fonte: Autor, 2016.

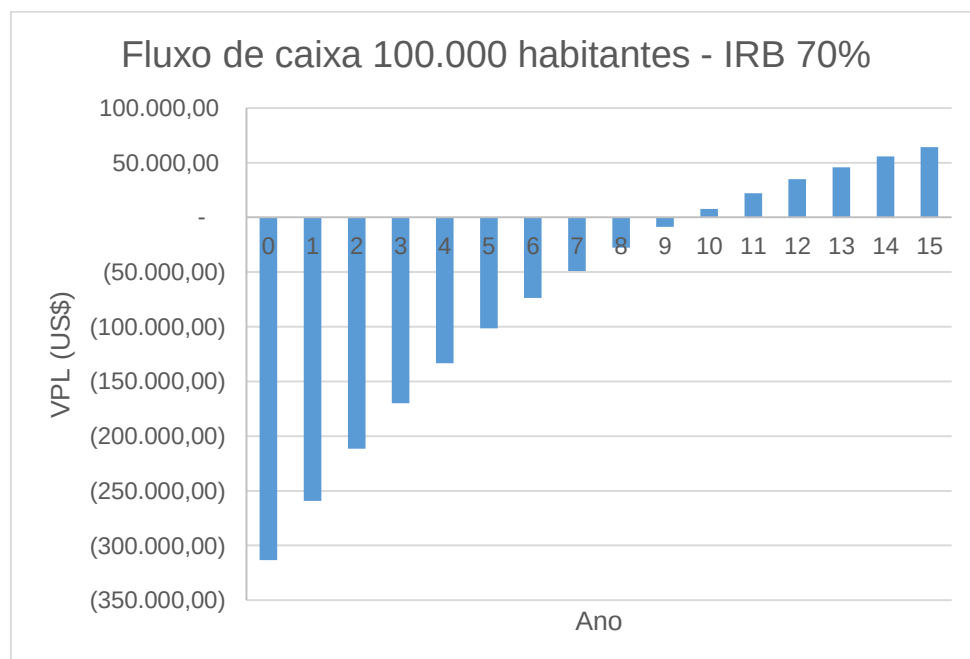


Figura 16. Fluxo de caixa para 100.000 habitantes e IRB de 70%
Fonte: Autor, 2016.

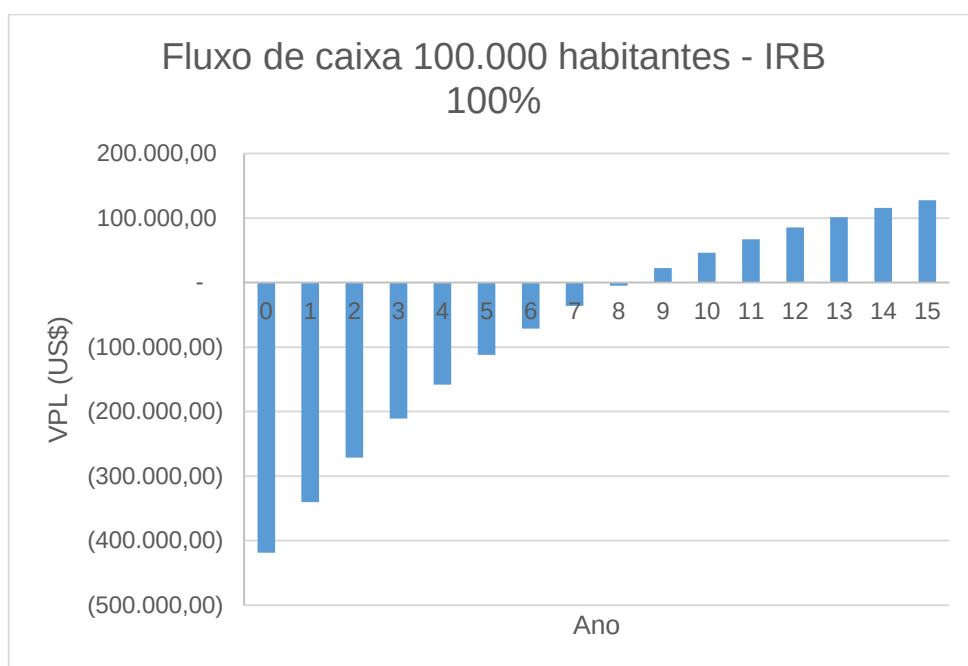


Figura 17. Fluxo de caixa para 100.000 habitantes e IRB de 100%

Fonte: Autor, 2016.

Nos gráficos pode-se observar o payback, ou seja, a partir de que ano o fluxo de caixa torna-se positivo. Neste caso, o período de payback foi de 12 anos para o IRB de 50%, caindo para 10 anos para o IRB de 70% e 9 anos para o IRB de 100%. Este resultado difere do indicado por Zanette (2009) e Barros; Filho; Silva, (2013) em outros estudos de que o aproveitamento energético do biogás de aterro é viável somente a partir de 200.000 habitantes. Essa diferença acontece devido as mudanças do cenário econômico, como, por exemplo, as tarifas praticadas, que nas condições atuais viabilizam também aterros com capacidades menores, como 100.000 habitantes.

Para a capacidade de 200.000 habitantes, tanto o VPL quanto o TIR foram atrativos, pois obtiveram resultados maior que zero e acima da taxa de desconto, respectivamente, demonstrando assim que projetos desse porte devem ser aceitos. As Figuras 18, 19 e 20 apresentam os fluxos de caixa em função do tempo para 200.000 habitantes.

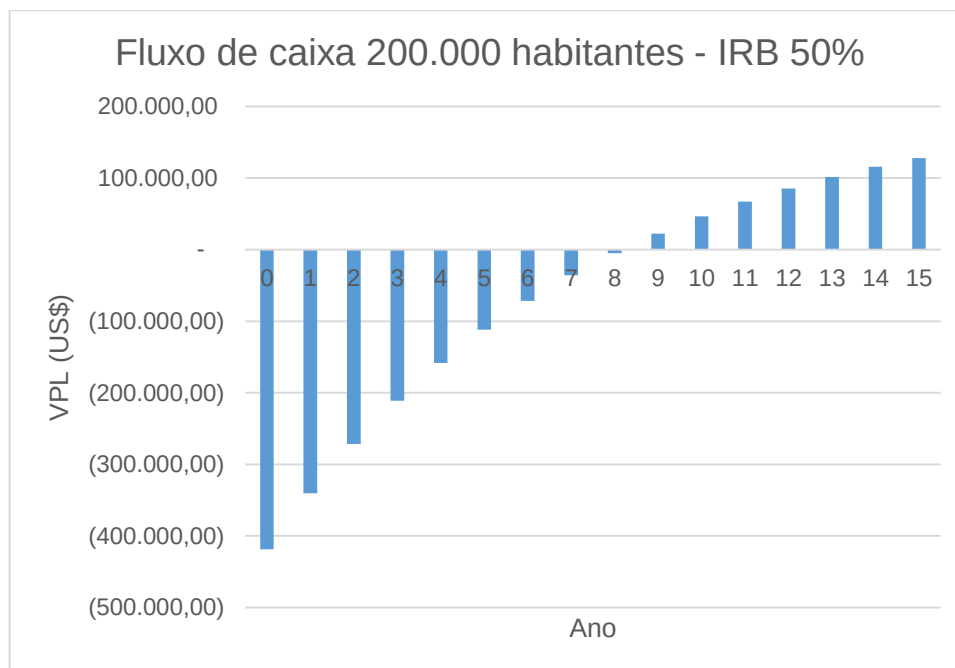


Figura 18. Fluxo de caixa para 200.000 habitantes e IRB de 50%
 Fonte: Autor, 2016.

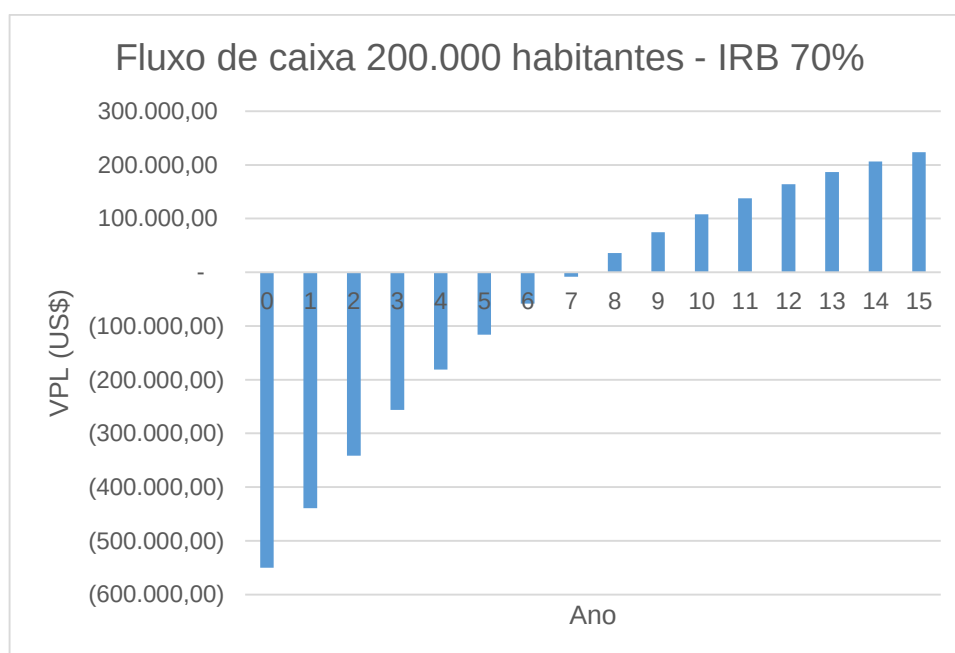


Figura 19. Fluxo de caixa para 200.000 habitantes e IRB de 70%
 Fonte: Autor, 2016.

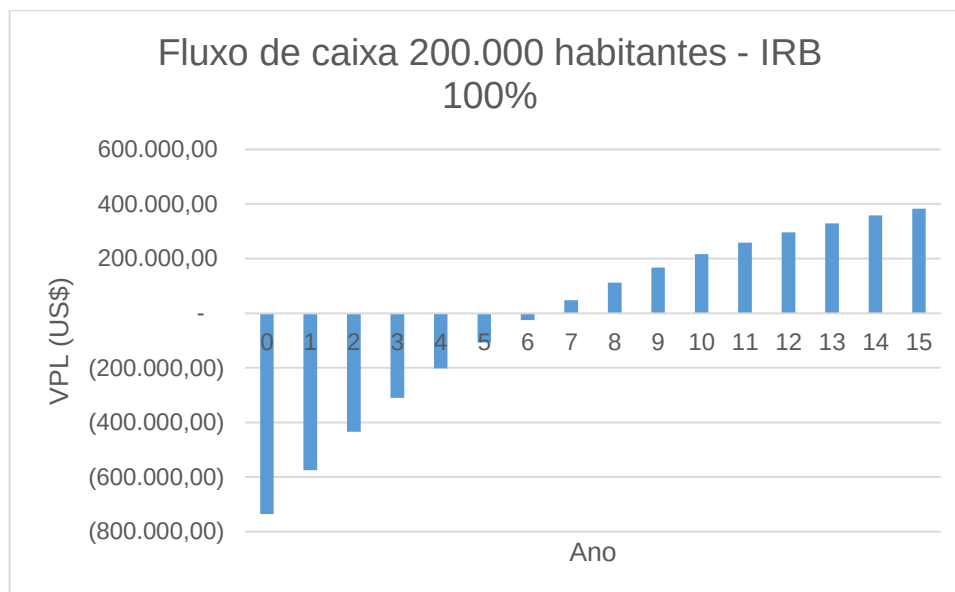


Figura 20. Fluxo de caixa para 200.000 habitantes e IRB de 100%

Fonte: Autor, 2016.

Quanto ao período de retorno mostrado nas figuras, este foi de 9 anos para o IRB de 50%, 8 anos para o IRB de 70% e 7 anos para IRB de 100%.

Para a capacidade de 2.000.000 e 4.000.000 de habitantes o VPL e o TIR se mostraram ainda mais atrativos. O valor presente líquido para o IRB de 70% foi de US\$ 4.644.488,64 e US\$ 10.372.658,29, e o TIR de 37 e 43%, respectivamente.

As Figuras 21, 22 e 23 mostram o fluxo de caixa, em cada ano, para 2.000.000 de habitantes.

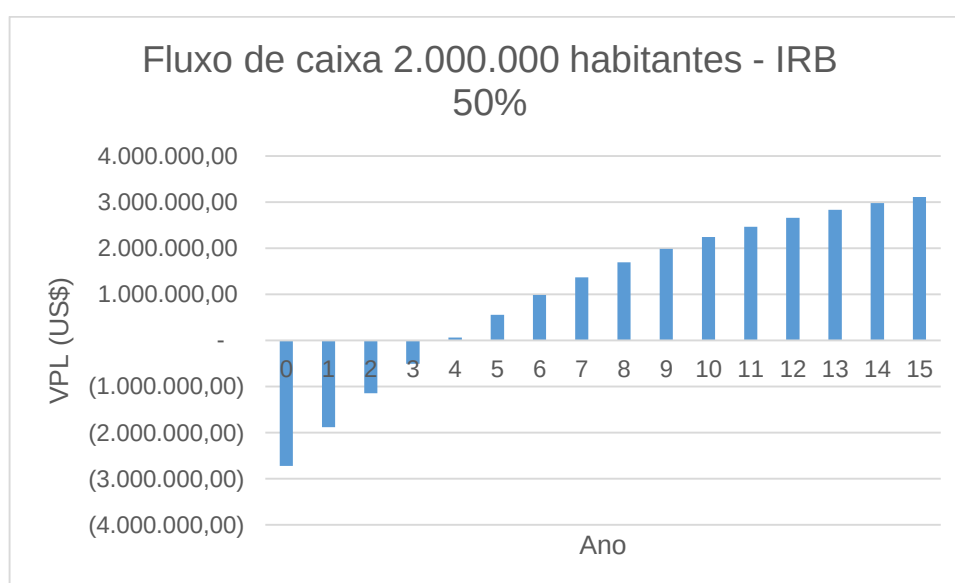


Figura 21. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 50%

Fonte: Autor, 2016.

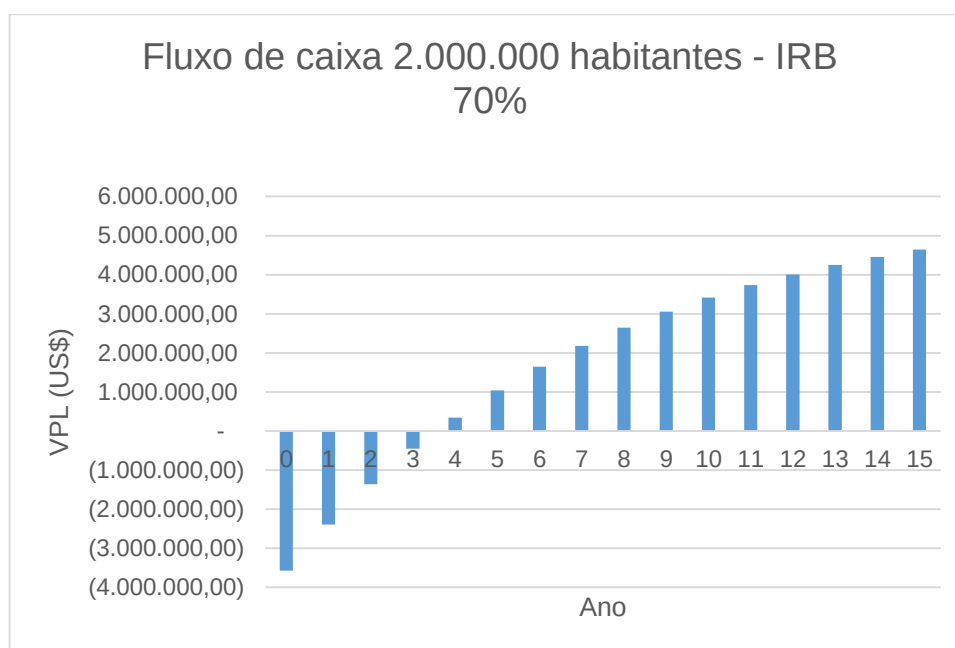


Figura 22. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 70%
 Fonte: Autor, 2016.

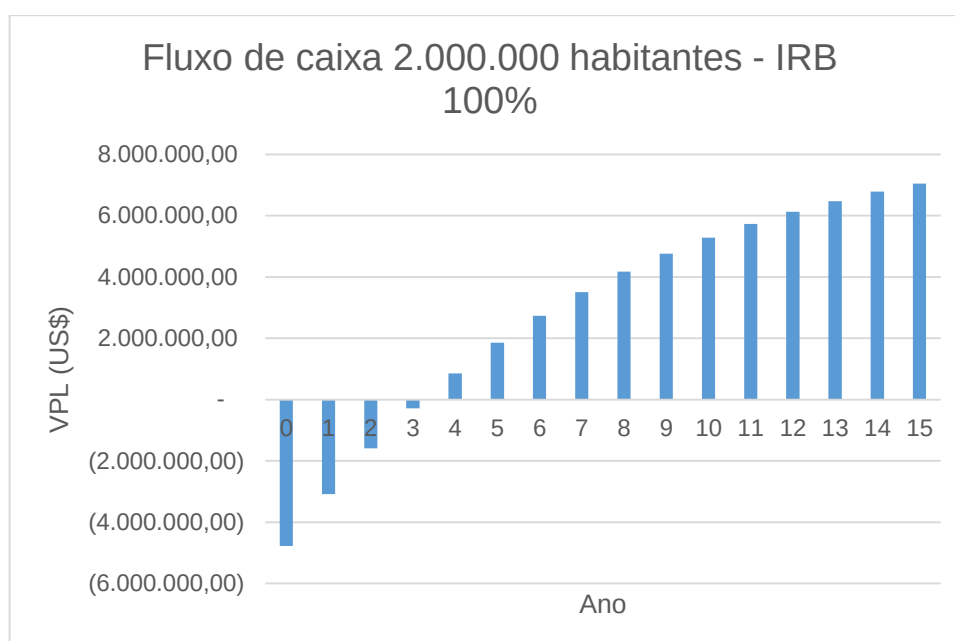


Figura 23. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 100%
 Fonte: Autor, 2016.

As Figuras mostram que para 2.000.000 de habitantes o tempo de retorno do investimento foi de 4 anos para todos os IRB.

Para a capacidade de 4.000.000 habitantes o fluxo de caixa é apresentado nas Figuras 24, 25 e 26.

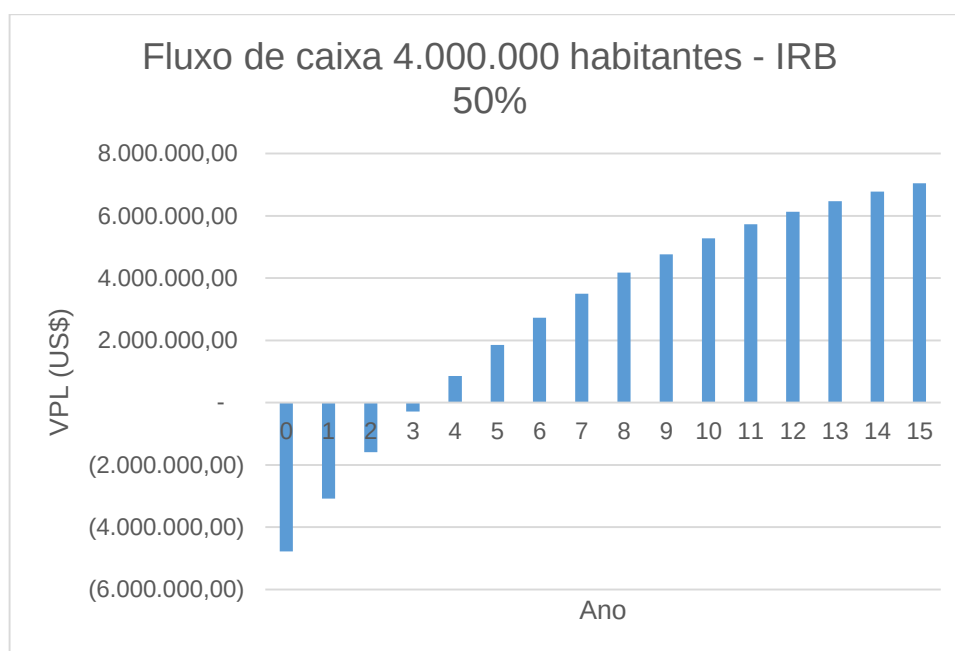


Figura 24. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 50%
 Fonte: Autor, 2016.

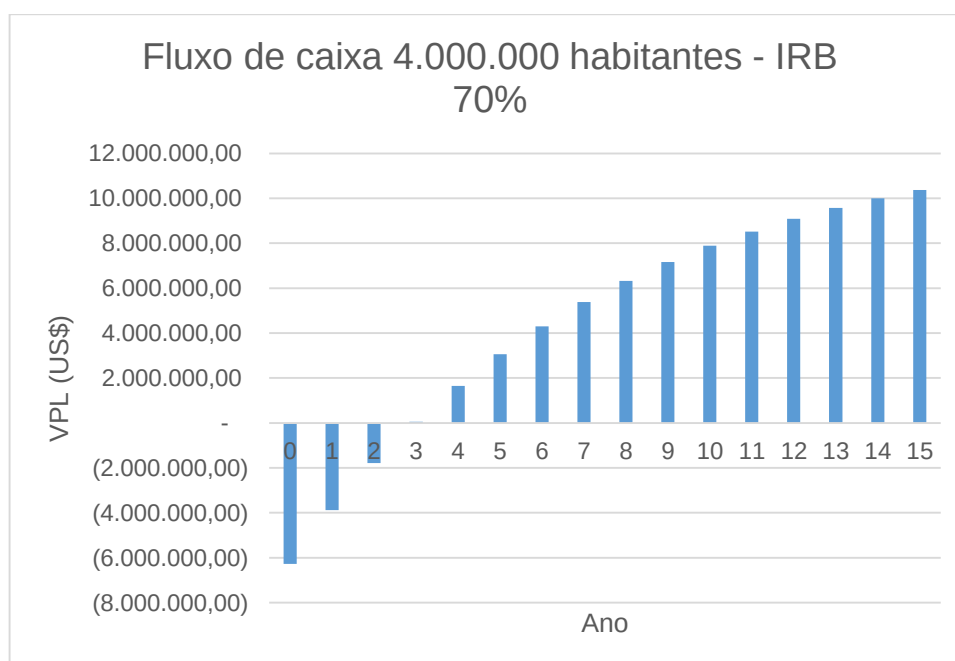


Figura 25. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 70%
 Fonte: Autor, 2016.

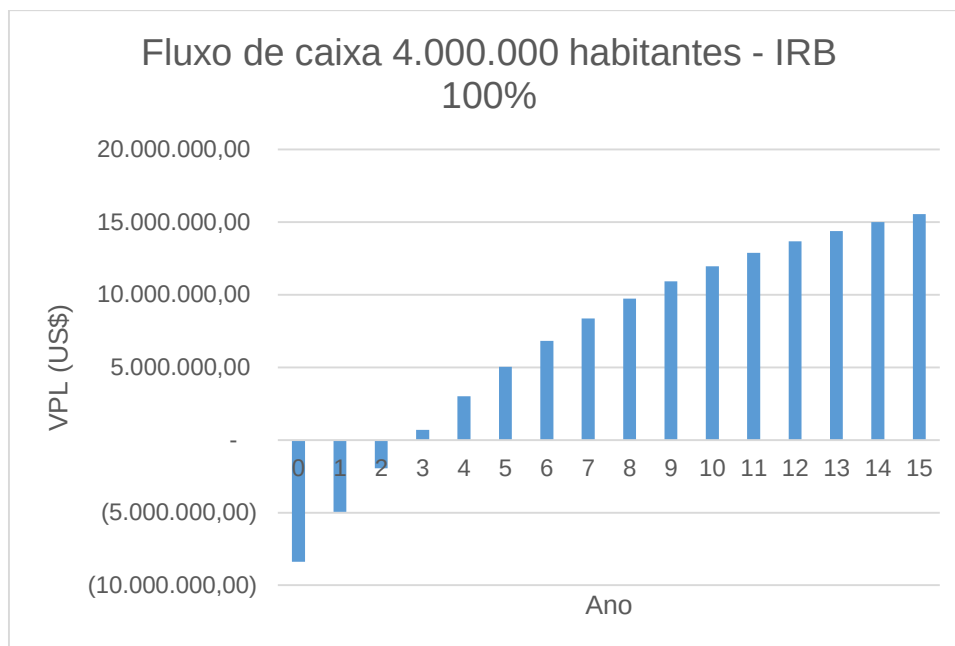


Figura 26. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 100%

Fonte: Autor, 2016.

Para 4.000.000 de habitantes, o payback foi de 4 anos para o IRB de 50% e de 3 anos para os IRB de 70% e 100%.

Percebe-se que quanto mais próximos ao limite superior do Estudo 1, mais atrativos os projetos se mostraram, com maiores valores de VPL e TIR, e menores tempo de retorno.

Os resultados de análise de investimento obtidos podem ser considerados em processos de tomada de decisão a curto ou longo prazo. Segundo Bidart (2013) outros aspectos também devem ser levados em consideração, como impactos ambientais, aceitação pública de tecnologias de processamento de resíduos sólidos urbanos e cortes de impostos para o metano recuperado para uso como fonte de energia.

4.2 Estudo 2

4.2.1 Geração de resíduos sólidos urbanos

A geração de resíduos sólidos urbanos no Estudo 2 seguiu os mesmos critérios fixados no Estudo 1 para crescimento populacional, geração per capita, porcentagem de resíduos coletados e destinados no aterro sanitário e vida útil.

A geração anual média de resíduos calculada pelas Equações 5 e 6 para as populações consideradas no Estudo 2 é apresentada na Tabela 18.

Tabela 18. Quantidade anual média de Resíduos Sólidos Urbanos gerados em 15 anos de vida útil de um aterro para o Estudo 2

População (habitantes)	Geração anual média de Resíduos Sólidos Urbanos (toneladas.ano⁻¹)
5.000.000,00	1.606.204,54
6.000.000,00	1.927.445,45
7.000.000,00	2.248.686,36
8.000.000,00	2.569.927,27
9.000.000,00	2.891.168,18
10.000.000,00	3.212.409,09
11.000.000,00	3.533.650,00
12.000.000,00	3.854.809,91
13.000.000,00	4.176.131,82
14.000.000,00	4.497.372,73
15.000.000,00	4.818.613,63
16.000.000,00	5.139.854,54
17.000.000,00	5.461.095,45
18.000.000,00	5.782.336,36
19.000.000,00	6.103.577,27
20.000.000,00	6.424.818,18

Fonte: Autor, 2015.

Ao comparar a Tabela 18 com a Tabela 8 (referente ao Estudo 1), percebe-se que a quantidade de resíduo disponível nas populações do Estudo 2 é bastante superior. Sendo assim, a geração de biogás neste caso também deve ser maior.

4.2.2 Potencial de produção de biogás

A estimativa do potencial de produção de metano para o Estudo 2 também segue os valores fixados na Tabela 9, já apresentada no Estudo 1. Com base nesta

tabela e na quantidade anual de resíduos gerados (Tabela 18) verificou-se pela Equação 4 a vazão anual de metano, conforme Tabela 19.

Tabela 19. Geração anual de metano ($\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$) para o Estudo 2

População Ano	5.000.000	6.000.000	7.000.000	8.000.000	9.000.000	10.000.000	11.000.000	12.000.000
1	1.117,40	1.340,89	1.564,37	1.787,85	2.011,33	2.234,81	2.458,29	2.681,77
2	2.137,27	2.564,72	2.992,17	3.419,63	3.847,08	4.274,54	4.701,99	5.129,44
3	3.069,35	3.683,22	4.297,08	4.910,95	5.524,82	6.138,69	6.752,56	7.366,43
4	3.922,44	4.706,93	5.491,41	6.275,90	7.060,39	7.844,88	8.629,36	9.413,85
5	4.704,47	5.645,37	6.586,26	7.527,16	8.468,05	9.408,95	10.349,84	11.290,74
6	5.422,61	6.507,13	7.591,65	8.676,17	9.760,69	10.845,21	11.929,73	13.014,26
7	6.083,28	7.299,94	8.516,60	9.733,25	10.949,91	12.166,57	13.383,22	14.599,88
8	6.692,32	8.030,78	9.369,25	10.707,71	12.046,18	13.384,64	14.723,10	16.061,57
9	7.254,96	8.705,95	10.156,94	11.607,93	13.058,92	14.509,91	15.960,90	17.411,90
10	7.775,92	9.331,11	10.886,29	12.441,48	13.996,66	15.551,85	17.107,03	18.662,22
11	8.259,48	9.911,38	11.563,27	13.215,17	14.867,07	16.518,96	18.170,86	19.822,76
12	8.709,48	10.451,37	12.193,27	13.935,17	15.677,06	17.418,96	19.160,85	20.902,75
13	9.129,38	10.955,26	12.781,13	14.607,01	16.432,88	18.258,76	20.084,64	21.910,51
14	9.522,31	11.426,78	13.331,24	15.235,70	17.140,16	19.044,63	20.949,09	22.853,55
15	9.891,10	11.869,32	13.847,54	15.825,76	17.803,98	19.782,20	21.760,42	23.738,64
16	8.115,88	9.739,06	11.362,23	12.985,41	14.608,58	16.231,76	17.854,94	19.478,11
17	7.234,22	8.681,07	10.127,91	11.574,75	13.021,60	14.468,44	15.915,29	17.362,13
18	6.448,34	7.738,01	9.027,68	10.317,34	11.607,01	12.896,68	14.186,35	15.476,02
19	5.747,83	6.897,40	8.046,96	9.196,53	10.346,10	11.495,66	12.645,23	13.794,80
20	5.123,42	6.148,11	7.172,79	8.197,48	9.222,16	10.246,85	11.271,53	12.296,21
21	4.566,85	5.480,21	6.393,58	7.306,95	8.220,32	9.133,69	10.047,06	10.960,43
22	4.070,73	4.884,88	5.699,02	6.513,17	7.327,32	8.141,46	8.955,61	9.769,76
23	3.628,51	4.354,21	5.079,92	5.805,62	6.531,32	7.257,02	7.982,73	8.708,43
24	3.234,33	3.881,20	4.528,07	5.174,93	5.821,80	6.468,67	7.115,53	7.762,40
25	2.882,97	3.459,57	4.036,16	4.612,76	5.189,35	5.765,95	6.342,54	6.919,14
26	2.569,79	3.083,74	3.597,70	4.111,66	4.625,62	5.139,57	5.653,53	6.167,49
27	2.290,62	2.748,74	3.206,87	3.664,99	4.123,12	4.581,24	5.039,36	5.497,49
28	2.041,78	2.450,14	2.858,49	3.266,85	3.675,21	4.083,56	4.491,92	4.900,28
29	1.819,97	2.183,97	2.547,96	2.911,96	3.275,95	3.639,95	4.003,94	4.367,94
30	1.622,26	1.946,72	2.271,17	2.595,62	2.920,08	3.244,53	3.568,98	3.893,43
31	1.446,03	1.735,24	2.024,44	2.313,65	2.602,86	2.892,06	3.181,27	3.470,47
32	1.288,94	1.546,73	1.804,52	2.062,31	2.320,10	2.577,89	2.835,68	3.093,46
33	1.148,92	1.378,70	1.608,49	1.838,27	2.068,06	2.297,84	2.527,62	2.757,41

34	1.024,11	1.228,93	1.433,75	1.638,57	1.843,40	2.048,22	2.253,04	2.457,86
35	912,86	1.095,43	1.278,00	1.460,57	1.643,14	1.825,71	2.008,28	2.190,85

Fonte: Autor, 2015.

Tabela 19. Estudo 2 – Geração anual de metano ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) (continuação)

População Ano	13.000.000	14.000.000	15.000.000	16.000.000	17.000.000	18.000.000	19.000.000	20.000.000
1	2.905,25	3.128,73	3.352,21	3.575,70	3.799,18	4.022,66	4.246,14	4.469,62
2	5.556,90	5.984,35	6.411,80	6.839,26	7.266,71	7.694,16	8.121,62	8.549,07
3	7.980,30	8.594,17	9.208,04	9.821,91	10.435,78	11.049,65	11.663,52	12.277,38
4	10.198,34	10.982,83	11.767,31	12.551,80	13.336,29	14.120,78	14.905,26	15.689,75
5	12.231,63	13.172,53	14.113,42	15.054,32	15.995,21	16.936,11	17.877,00	18.817,90
6	14.098,78	15.183,30	16.267,82	17.352,34	18.436,86	19.521,38	20.605,91	21.690,43
7	15.816,54	17.033,19	18.249,85	19.466,51	20.683,16	21.899,82	23.116,48	24.333,13
8	17.400,03	18.738,49	20.076,96	21.415,42	22.753,89	24.092,35	25.430,81	26.769,28
9	18.862,89	20.313,88	21.764,87	23.215,86	24.666,85	26.117,84	27.568,84	29.019,83
10	20.217,40	21.772,58	23.327,77	24.882,95	26.438,14	27.993,32	29.548,51	31.103,69
11	21.474,65	23.126,55	24.778,45	26.430,34	28.082,24	29.734,14	31.386,03	33.037,93
12	22.644,64	24.386,54	26.128,44	27.870,33	29.612,23	31.354,12	33.096,02	34.837,91
13	23.736,39	25.562,26	27.388,14	29.214,01	31.039,89	32.865,77	34.691,64	36.517,52
14	24.758,02	26.662,48	28.566,94	30.471,40	32.375,87	34.280,33	36.184,79	38.089,25
15	25.716,86	27.695,08	29.673,30	31.651,52	33.629,74	35.607,96	37.586,18	39.564,41
16	21.101,29	22.724,47	24.347,64	25.970,82	27.593,99	29.217,17	30.840,35	32.463,52
17	18.808,97	20.255,82	21.702,66	23.149,51	24.596,35	26.043,20	27.490,04	28.936,88
18	16.765,68	18.055,35	19.345,02	20.634,69	21.924,36	23.214,02	24.503,69	25.793,36
19	14.944,36	16.093,93	17.243,50	18.393,06	19.542,63	20.692,19	21.841,76	22.991,33
20	13.320,90	14.345,58	15.370,27	16.394,95	17.419,64	18.444,32	19.469,01	20.493,69
21	11.873,80	12.787,17	13.700,54	14.613,91	15.527,27	16.440,64	17.354,01	18.267,38
22	10.583,90	11.398,05	12.212,19	13.026,34	13.840,49	14.654,63	15.468,78	16.282,93
23	9.434,13	10.159,83	10.885,54	11.611,24	12.336,94	13.062,64	13.788,35	14.514,05
24	8.409,27	9.056,13	9.703,00	10.349,87	10.996,73	11.643,60	12.290,47	12.937,33
25	7.495,73	8.072,33	8.648,92	9.225,52	9.802,11	10.378,71	10.955,30	11.531,90
26	6.681,44	7.195,40	7.709,36	8.223,32	8.737,27	9.251,23	9.765,19	10.279,14
27	5.955,61	6.413,74	6.871,86	7.329,99	7.788,11	8.246,23	8.704,36	9.162,48
28	5.308,63	5.716,99	6.125,34	6.533,70	6.942,06	7.350,41	7.758,77	8.167,13
29	4.731,93	5.095,93	5.459,92	5.823,92	6.187,91	6.551,91	6.915,90	7.279,90
30	4.217,89	4.542,34	4.866,79	5.191,24	5.515,70	5.840,15	6.164,60	6.489,06
31	3.759,68	4.048,89	4.338,09	4.627,30	4.916,51	5.205,71	5.494,92	5.784,12
32	3.351,25	3.609,04	3.866,83	4.124,62	4.382,41	4.640,20	4.897,98	5.155,77
33	2.987,19	3.216,98	3.446,76	3.676,55	3.906,33	4.136,11	4.365,90	4.595,68

34	2.662,68	2.867,50	3.072,33	3.277,15	3.481,97	3.686,79	3.891,61	4.096,43
35	2.373,43	2.556,00	2.738,57	2.921,14	3.103,71	3.286,28	3.468,85	3.651,42

Fonte: Autor, 2015.

Como citado no Estudo 1, mais uma vez a geração de metano está relacionada a quantidade de resíduos depositados no aterro sanitário. Sendo a quantidade de resíduos dependente da geração per capita, as maiores gerações de metano acontecem nos aterros que atendem as maiores populações. Assim, ao comparar ambos os estudos, temos que no Estudo 2, por abranger populações maiores, a geração do biogás é significativamente maior que no Estudo 1.

A tendência de produção de metano para o Estudo 2 pode ser observado na Figura 27.

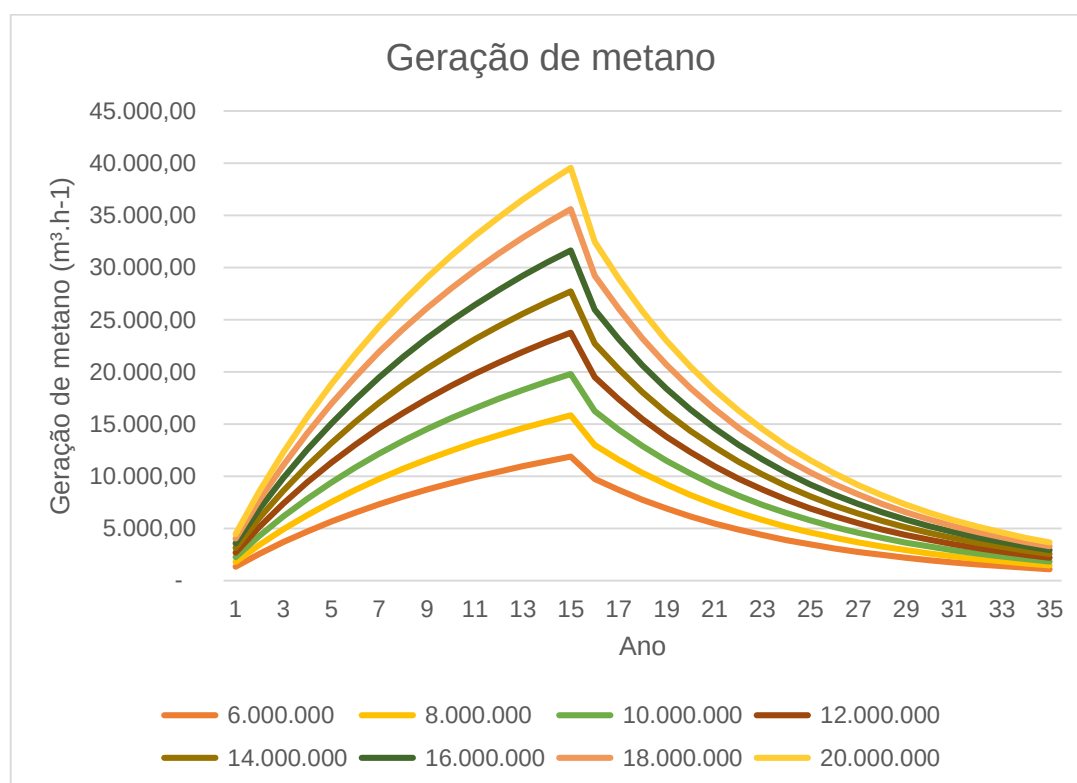


Figura 27. Curva de geração de metano para o Estudo 2

Fonte: Autor, 2015.

Da mesma forma que nas tabelas de geração de metano, nas Figuras 7 (Estudo 1) e 27 (Estudo 2), o crescimento de geração de metano para cada população acontece pelo acúmulo de resíduos a cada ano, atingindo o ponto máximo da curva no ano 15, ou seja, no último ano de deposição de resíduos.

O decaimento da curva refere-se à degradação dos resíduos no tempo, uma vez que ainda existem nutrientes disponíveis e, se mantidas as condições adequadas de pH, temperatura e umidade, continuaram a gerar biogás por alguns anos. O mesmo comportamento é registrado em estudos similares como os de Ensinas (2003), Zamorano et al. (2005), Figueiredo (2011) e Penteado et al. (2012).

4.2.3 Índice de recuperação do metano (IRB)

No Estudo 2 foram considerados os mesmos índices de recuperação do metano que no Estudo 1, sendo estes 50%, 70% e 100%. Estes índices retratam uma recuperação baixa, média e alta, respectivamente, sendo mais eficientes aterros sanitários bem estruturados e impermeabilizados. A Tabela 20 refere-se ao índice de recuperação do Estudo 2.

Tabela 20. Índice de recuperação de metano (IRB) para o Estudo 2

Índice de recuperação de metano ($\text{m}^3 \text{CH}_4 \cdot \text{h}^{-1}$)			
População	IRB 50%	IBR 70%	IBR 100%
5.000.000	2.298,72	3.218,20	4.597,43
6.000.000	2.758,46	3.861,84	5.516,92
7.000.000	3.218,20	4.505,48	6.436,41
8.000.000	3.677,95	5.149,12	7.355,89
9.000.000	4.137,69	5.792,77	8.275,38
10.000.000	4.597,43	6.436,41	9.194,87
11.000.000	5.057,18	7.080,05	10.114,35
12.000.000	5.516,92	7.723,69	11.033,84
13.000.000	5.976,66	8.367,33	11.953,33
14.000.000	6.436,41	9.010,97	12.872,81
15.000.000	6.896,15	9.654,61	13.792,30
16.000.000	7.355,89	10.298,25	14.711,79
17.000.000	7.815,64	10.941,89	15.631,27
18.000.000	8.275,38	11.585,53	16.550,76
19.000.000	8.735,12	12.229,17	17.470,25
20.000.000	9.194,87	12.872,81	18.389,73

Fonte: Autor, 2015.

A Tabela 20 registra a captação total do metano (IRB 100%) e os índices de recuperação de 50% e 70%. Quanto maior o índice de recuperação, maior a quantidade de gás disponível para aproveitamento energético. Logo, aterros com projetos de utilização do biogás devem ter estruturação que garanta o maior índice de recuperação possível.

No Estudo 2, os valores se mantem superiores ao Estudo 1 já que a população considerada é superior e todos os outros fatores foram mantidos em igualdade. Assim, essa diferença refere-se apenas a quantidade de resíduos gerados e devido a capacidade do aterro ser maior.

A Figura 28 mostra o potencial de recuperação metano para o Estudo 2, conforme os valores indicados na tabela.

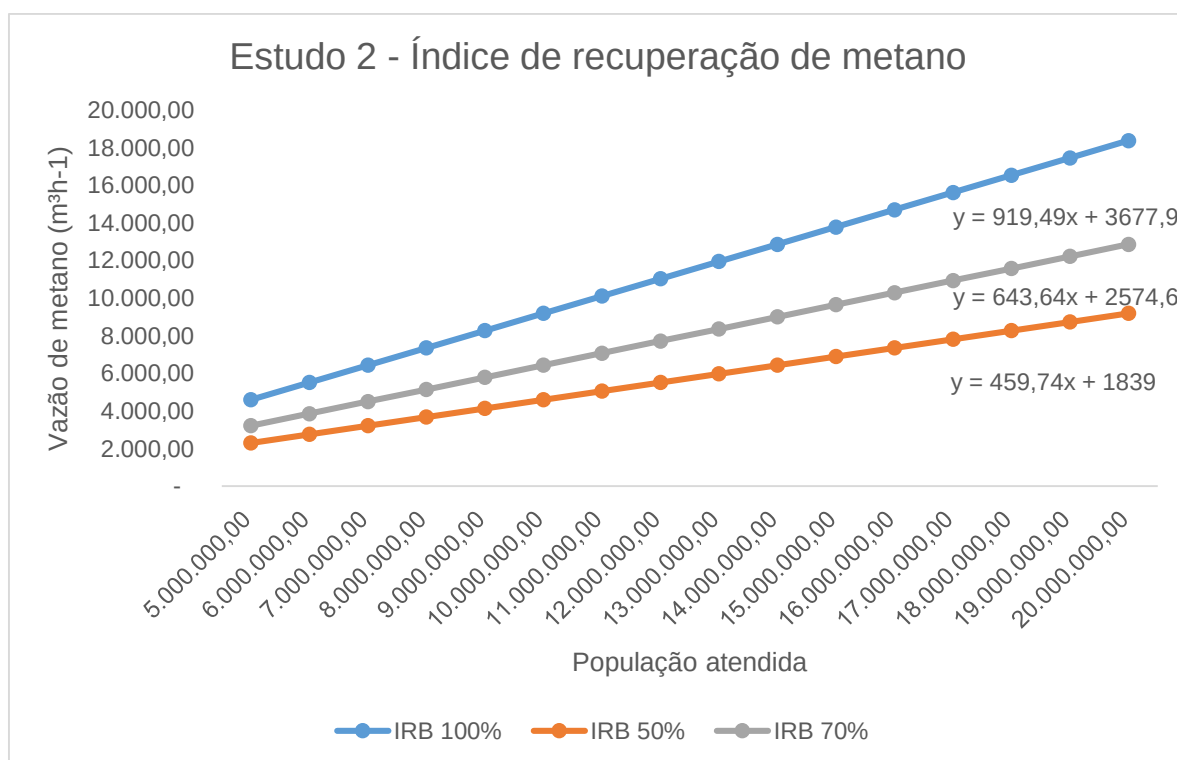


Figura 28. Gráfico de recuperação de metano para o Estudo 2

Fonte: Autor, 2015.

A Figura 28 representa a recuperação do metano para cada população do Estudo 2, conforme os índices adotados. Com base nas retas apresentadas, temos a Tabela 21 com as equações de correlação para as capacidades entre 5.000.000 e 20.000.000 de habitantes.

Tabela 21. Correlação de produção de metano em função da capacidade do aterro para o Estudo 2

Cenário	Equação	Capacidade do Aterro x (habitantes)
IRB 50%	$P_B = 919,49.x + 3677,9$	$5.000.000 \leq x \leq 20.000.000$
IRB 70%	$P_B = 643,64x + 2574,6$	$5.000.000 \leq x \leq 20.000.000$
IRB 100%	$P_B = 459,74x + 1839$	$5.000.000 \leq x \leq 20.000.000$

Fonte: Autor, 2015.

Na Tabela 21, as equações de correlação de produção de metano em função da capacidade do aterro são dadas em função da variável x , que representa o número de habitantes atendidos. Através destas equações é possível estimar a geração de metano para populações entre 5.000.000 e 20.000.000 habitantes, ou seja, a faixa populacional do Estudo 2.

4.2.4 Potencial de geração de energia elétrica

O potencial de geração de energia para o Estudo 2 foi calculado pela Equação 6 considerando os índices de recuperação do metano de 50%, 70% e 100% e as eficiência do motor de 20%, 25% e 30%, sendo o resultado apresentado na Tabela 22.

Tabela 22. Estudo 2 - Potência de geração de eletricidade para 20%, 25% e 30% de eficiência (kW)

População	IRB 50%	IRB 70%	IRB 100%	IRB 50%	IRB 70%	IRB 100%	IRB 50%	IRB 70%	IRB 100%
	η_1 20%			η_2 25%			η_3 30%		
5.000.000	2.482,61	3.475,66	4.965,23	3.103,27	4.344,57	6.206,53	3.723,92	5.213,49	7.447,84
6.000.000	2.979,14	4.170,79	5.958,27	3.723,92	5.213,49	7.447,84	4.468,70	6.256,19	8.937,41
7.000.000	3.475,66	4.865,92	6.951,32	4.344,57	6.082,40	8.689,15	5.213,49	7.298,88	10.426,98
8.000.000	3.972,18	5.561,05	7.944,36	4.965,23	6.951,32	9.930,46	5.958,27	8.341,58	11.916,55
9.000.000	4.468,70	6.256,19	8.937,41	5.585,88	7.820,23	11.171,76	6.703,06	9.384,28	13.406,11
10.000.000	4.965,23	6.951,32	9.930,46	6.206,53	8.689,15	12.413,07	7.447,84	10.426,98	14.895,68
11.000.000	5.461,75	7.646,45	10.923,50	6.827,19	9.558,06	13.654,38	8.192,63	11.469,68	16.385,25
12.000.000	5.958,27	8.341,58	11.916,55	7.447,84	10.426,98	14.895,68	8.937,41	12.512,37	17.874,82
13.000.000	6.454,80	9.036,71	12.909,59	8.068,49	11.295,89	16.136,99	9.682,19	13.555,07	19.364,39
14.000.000	6.951,32	9.731,85	13.902,64	8.689,15	12.164,81	17.378,30	10.426,98	14.597,77	20.853,96
15.000.000	7.447,84	10.426,98	14.895,68	9.309,80	13.033,72	18.619,60	11.171,76	15.640,47	22.343,52

16.000.000	7.944,36	11.122,11	15.888,73	9.930,46	13.902,64	19.860,91	11.916,55	16.683,16	23.833,09
17.000.000	8.440,89	11.817,24	16.881,77	10.551,11	14.771,55	21.102,22	12.661,33	17.725,86	25.322,66
18.000.000	8.937,41	12.512,37	17.874,82	11.171,76	15.640,47	22.343,52	13.406,11	18.768,56	26.812,23
19.000.000	9.433,93	13.207,51	18.867,86	11.792,42	16.509,38	23.584,83	14.150,90	19.811,26	28.301,80
20.000.000	9.930,46	13.902,64	19.860,91	12.413,07	17.378,30	24.826,14	14.895,68	20.853,96	29.791,37

Fonte: Autor, 2015.

No Estudo 2, foram utilizados os mesmos parâmetros do Estudo 1. Observa-se que o Estudo 2 obteve capacidades de geração superiores, da mesma forma que nas análises anteriores. Neste caso, o pior cenário com IRB de 50%, eficiência de 20% e capacidade de 5.000.000 de habitantes apresentou potência disponível de 2.482,61 kW. Já o melhor cenário, com IRB de 100%, eficiência de 30% e capacidade de 20.000.000 de habitantes obteve 29.791,37 kW de potência.

As Figuras 29, 30 e 31, demonstram o potencial de geração de energia elétrica em função do tamanho do aterro sanitário para o Estudo 2, para os índices de recuperação do metano de 50%, 70% e 100%, respectivamente.

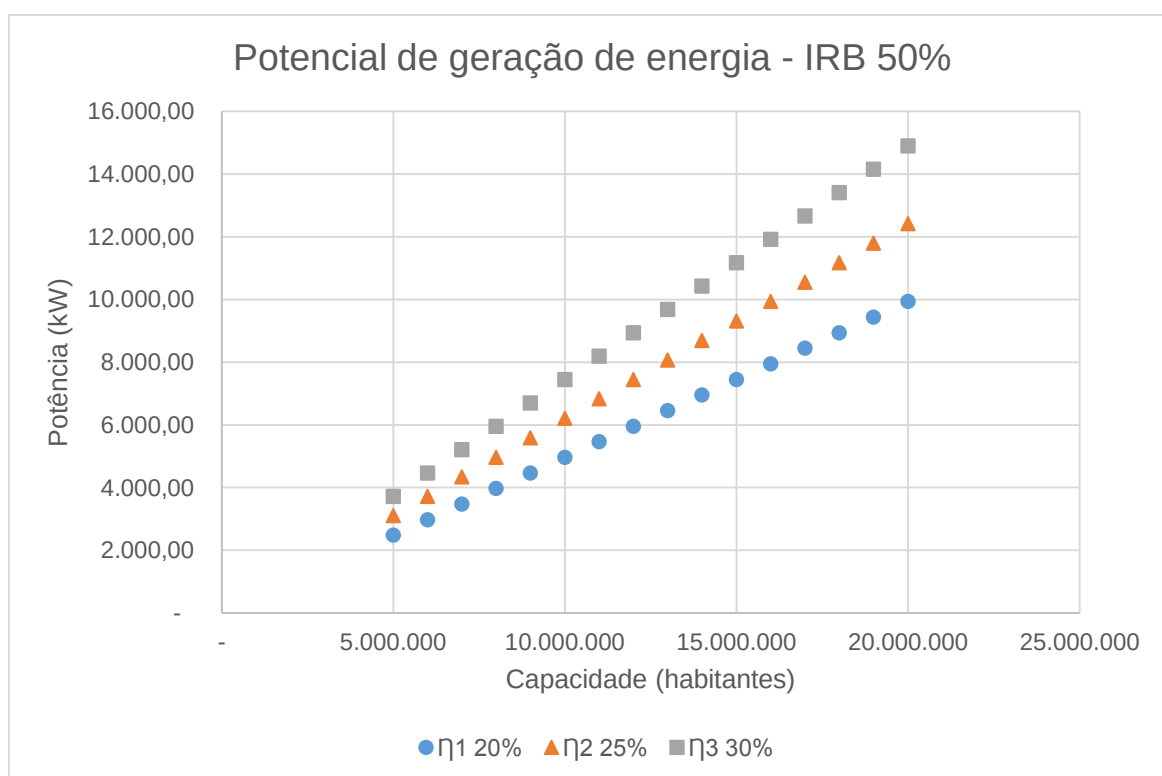


Figura 29. Estudo 2 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de metano (IRB) de 50%

Fonte: Autor, 2015.

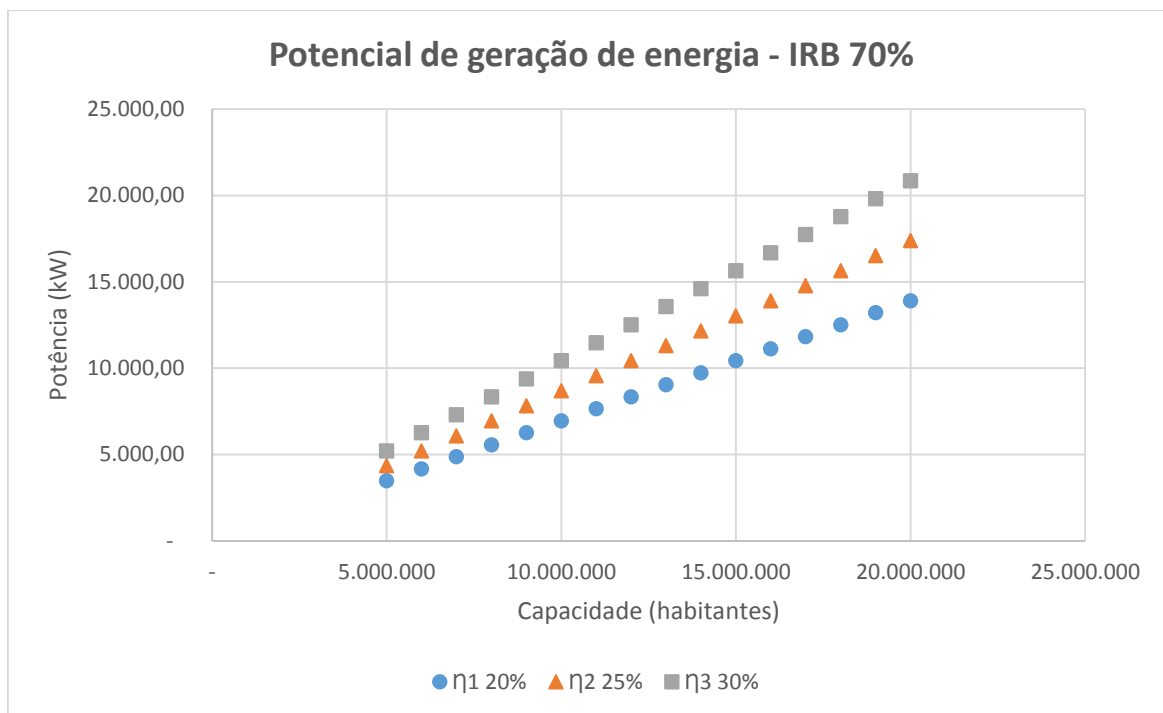


Figura 30. Estudo 2 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de metano (IRB) de 70%
 Fonte: Autor, 2015.

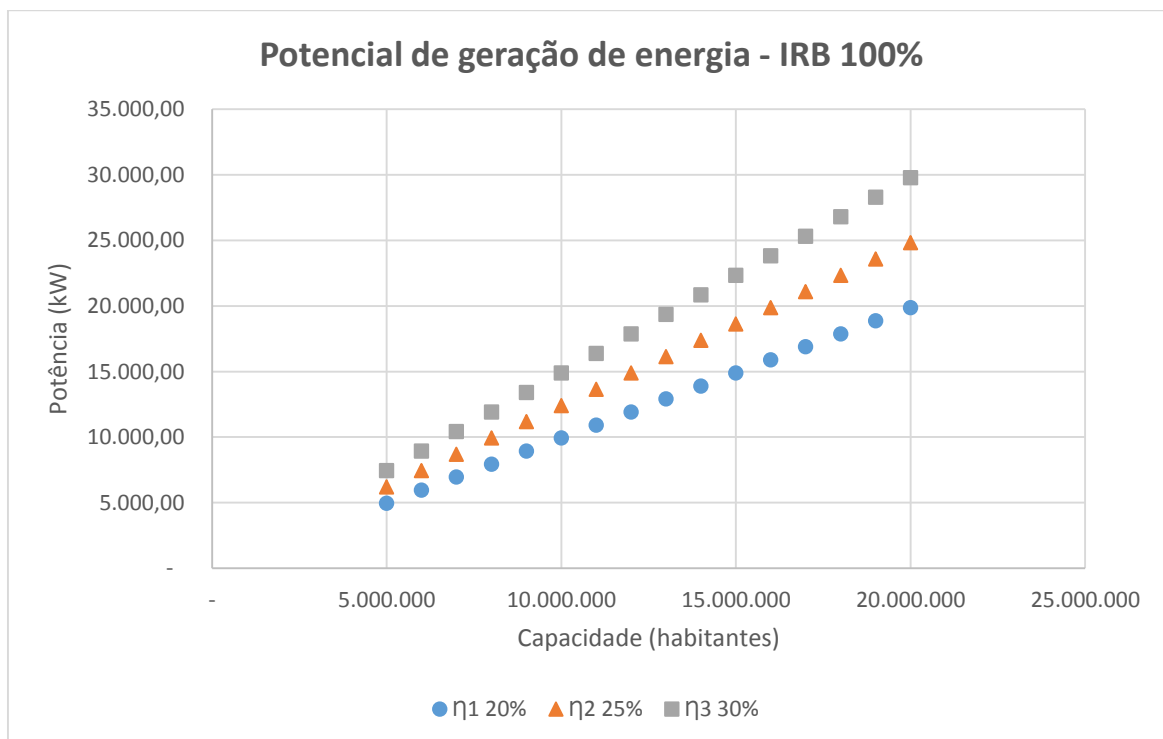


Figura 31. Estudo 2 – Potencial de geração de energia em aterros sanitários para um índice de recuperação de metano (IRB) de 100%
 Fonte: Autor, 2015.

Com base nas informações de potencial energético para o Estudo 2 e a Equação 9, obteve-se as equações de correlação da potência em função da capacidade do aterro (x), conforme Tabela 23.

Tabela 23. Correlação de potência em função da capacidade do aterro para Estudo 2

Cenário		Equação	Capacidade do Aterro x (habitantes)
IRB 50%	$n = 20\%$	$P_B = 48,398.x - 1.10^{-13}$	$5.000.000 \leq x \leq 20.000.000$
	$n = 25\%$	$P_B = 60,497.x$	
	$n = 30\%$	$P_B = 72,597.x - 3.10^{-13}$	
IRB 70%	$n = 20\%$	$P_B = 0,0014.x + 2.10^{-13}$	$5.000.000 \leq x \leq 20.000.000$
	$n = 25\%$	$P_B = 0,0017.x + 2.10^{-13}$	
	$n = 30\%$	$P_B = 0,002.x + 5.10^{-13}$	
IRB 100%	$n = 20\%$	$P_B = 993,05.x + 3972,2$	$5.000.000 \leq x \leq 20.000.000$
	$n = 25\%$	$P_B = 1241,3.x + 4965,2$	
	$n = 30\%$	$P_B = 1489,6.x + 5958,3$	

Fonte: Autor, 2015.

As equações descritas na Tabela 23 permitem determinar a potência disponível para os cenários adotados e capacidades do aterro entre 5.000.000 e 20.000.000 de habitantes.

4.2.5 Custo de geração de energia elétrica

O cálculo do custo de geração de energia elétrica para o Estudo 2 seguiu os mesmos critérios estabelecidos no Estudo 1, sendo utilizada a Equação 12. Os resultados foram obtidos considerando os diferentes cenários de índice de recuperação e eficiência, conforme Tabela 24.

Tabela 24. Estudo 2 – Custo de geração de energia elétrica

Custo de geração (US\$.kWh ⁻¹)									
IRB 50%				IRB 70%			IRB 100%		
Eficiência									
População	20%	25%	30%	20%	25%	30%	20%	25%	30%
5.000.000	0,049	0,047	0,045	0,046	0,044	0,043	0,043	0,041	0,040
6.000.000	0,047	0,045	0,044	0,045	0,043	0,041	0,042	0,040	0,039
7.000.000	0,046	0,044	0,043	0,043	0,041	0,040	0,040	0,039	0,038
8.000.000	0,045	0,043	0,042	0,042	0,040	0,039	0,039	0,038	0,037
9.000.000	0,044	0,042	0,041	0,041	0,040	0,038	0,039	0,037	0,036
10.000.000	0,043	0,041	0,040	0,040	0,039	0,038	0,038	0,036	0,035
11.000.000	0,042	0,041	0,039	0,040	0,038	0,037	0,037	0,036	0,034
12.000.000	0,042	0,040	0,039	0,039	0,038	0,036	0,037	0,035	0,034
13.000.000	0,041	0,039	0,038	0,039	0,037	0,036	0,036	0,035	0,033
14.000.000	0,040	0,039	0,038	0,038	0,036	0,035	0,036	0,034	0,033
15.000.000	0,040	0,038	0,037	0,038	0,036	0,035	0,035	0,034	0,033
16.000.000	0,039	0,038	0,037	0,037	0,036	0,034	0,035	0,033	0,032
17.000.000	0,039	0,037	0,036	0,037	0,035	0,034	0,034	0,033	0,032
18.000.000	0,039	0,037	0,036	0,036	0,035	0,034	0,034	0,033	0,031
19.000.000	0,038	0,037	0,035	0,036	0,034	0,033	0,034	0,032	0,031
20.000.000	0,038	0,036	0,035	0,036	0,034	0,033	0,033	0,032	0,031

Fonte: Autor, 2016.

Da mesma forma que no estudo anterior, o custo de geração reduz conforme a capacidade do aterro aumenta.

Para o menor aterro considerado no Estudo 2, que atende a demanda de 5.000.000 habitantes, o custo de geração de eletricidade seria de US\$ 0,044 para cada kWh, considerando a eficiência média de 25% e o índice de recuperação do metano intermediário de 70%, com potência instalada de aproximadamente 4.344 kW.

Já para o maior aterro, com capacidade de atender 20.000.000 de habitantes, o custo da energia seria de US\$ 0,034 para cada kWh, também considerando a eficiência de 25% e o índice de recuperação do metano de 70%. Neste caso, a potência instalada seria de aproximadamente 17.378 kW.

A fim de verificar se os custos obtidos no Estudo 2 estão condizentes aos praticados no mercado de energia, buscou-se os valores contratados no o 3º Leilão de Fontes Alternativas realizado no dia 27 de abril de 2015. Neste leilão, o preço médio ao final das negociações foi de R\$ 199,97 por MWh, sendo que para as usinas de biomassa a negociação ficou em R\$ 209,91 por MWh para a entrega de energia em janeiro de 2016 (CCEE, 2015). Considerando o dólar a R\$ 4,00, temos o valor médio de US\$ 49,99 por MWh ou 0,050 por kWh e de US\$ 52,48 por MWh ou US\$ 0,052 por kWh para as usinas a biomassa. Baseado nestes valores, os custos determinados na Tabela 24 são viáveis, já que são inferiores ao praticados no último leilão de energia realizado.

As figuras 32, 33 e 34 mostram o custo de geração de eletricidade em função da capacidade do aterro para os índices de recuperação do metano de 50%, 70% e 100%, respectivamente.

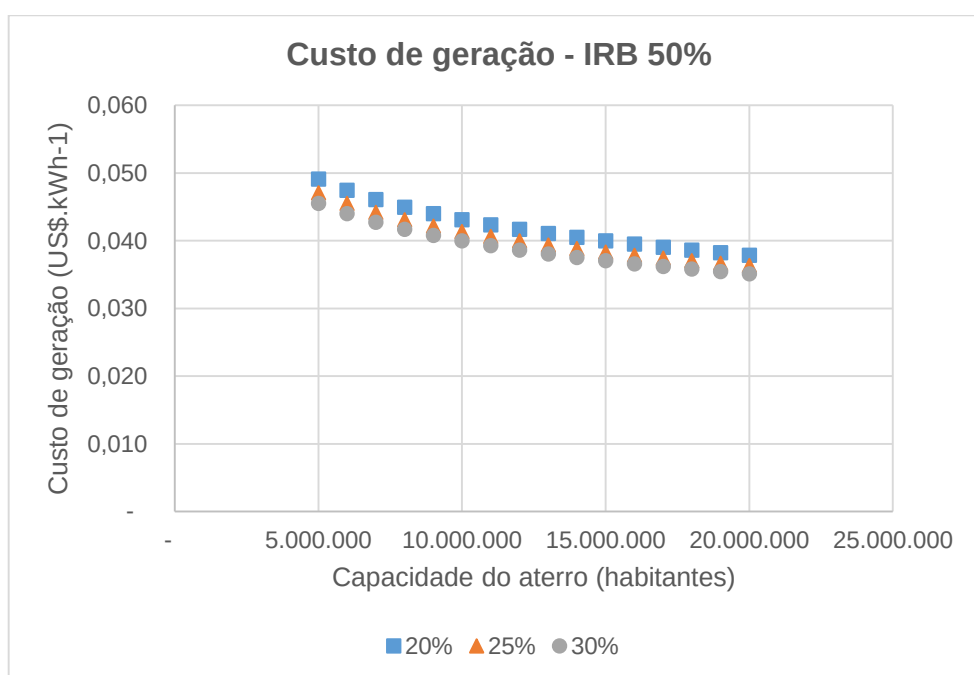


Figura 32. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 50%
Fonte: Autor, 2016.

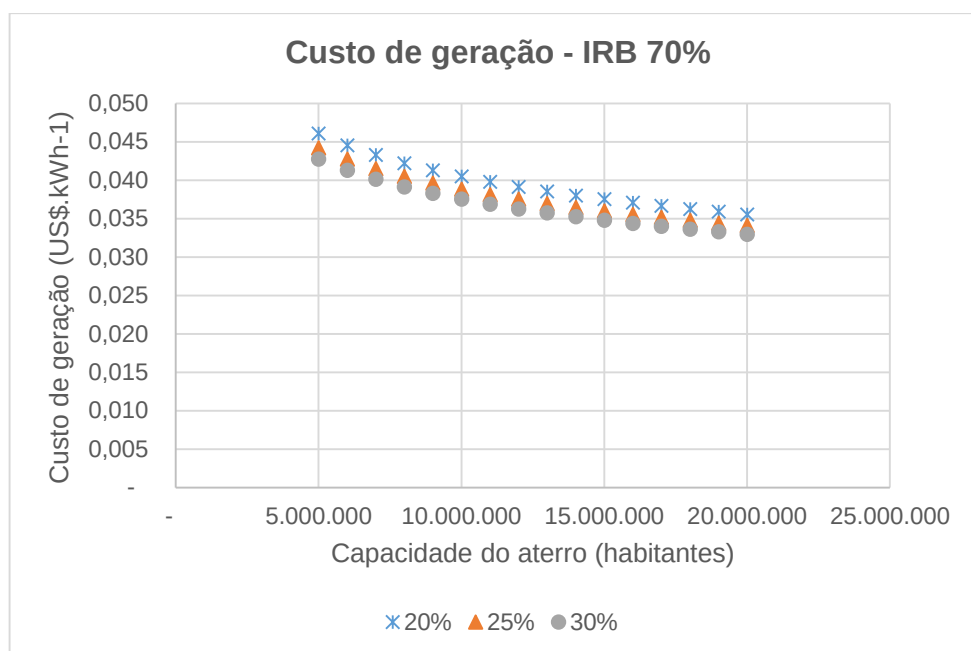


Figura 33. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 70%
 Fonte: Autor, 2016.

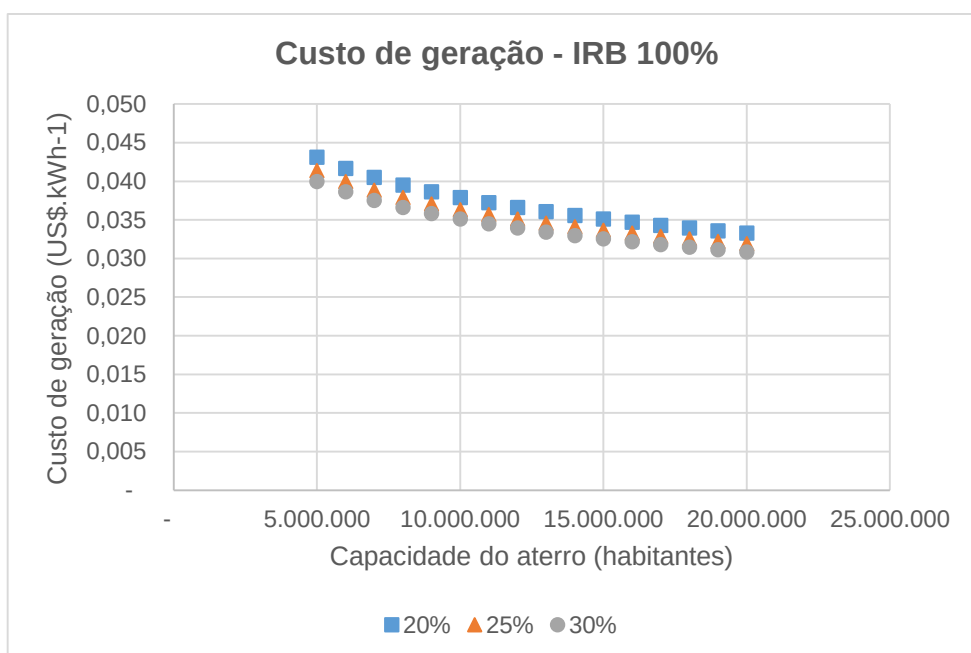


Figura 34. Gráfico de Custo de geração de energia para IRB de 100%
 Fonte: Autor, 2016.

As equações de correlação para o custo de energia nos diferentes cenários, calculados com base na Equação 16, estão na Tabela 25.

Tabela 25. Correlações de custo de produção de eletricidade para capacidades do Estudo 2

Cenários		Equação	Capacidade do Aterro π (Habitantes)
IRB 50%	$\eta = 20\%$	$C_e = 0,0508 \cdot \pi^{-0,1}$	$5.000.000 \leq \pi \leq 20.000.000$
	$\eta = 25\%$	$C_e = 0,0487 \cdot \pi^{-0,1}$	$5.000.000 \leq \pi \leq 20.000.000$
	$\eta = 30\%$	$C_e = 0,0471 \cdot \pi^{-0,1}$	$5.000.000 \leq \pi \leq 20.000.000$
IRB 70%	$\eta = 20\%$	$C_e = 0,0477 \cdot \pi^{-0,1}$	$5.000.000 \leq \pi \leq 20.000.000$
	$\eta = 25\%$	$C_e = 0,0457 \cdot \pi^{-0,1}$	$5.000.000 \leq \pi \leq 20.000.000$
	$\eta = 30\%$	$C_e = 0,0442 \cdot \pi^{-0,1}$	$5.000.000 \leq \pi \leq 20.000.000$
IRB 100%	$\eta = 20\%$	$C_e = 0,0446 \cdot \pi^{-0,1}$	$5.000.000 \leq \pi \leq 20.000.000$
	$\eta = 25\%$	$C_e = 0,0428 \cdot \pi^{-0,1}$	$5.000.000 \leq \pi \leq 20.000.000$
	$\eta = 30\%$	$C_e = 0,0413 \cdot \pi^{-0,1}$	$5.000.000 \leq \pi \leq 20.000.000$

Fonte: Autor, 2016.

Com as Equações expostas na Tabela 25, pode-se determinar o custo de geração de energia para as capacidades do aterro (π) entre 5.000.000 e 20.000.000 de habitantes, referentes ao Estudo 2.

4.2.6 Análise de viabilidade econômica

Por fim, foi realizada determinação dos indicadores financeiros, tais como o valor presente líquido (Equação 17), o payback e a taxa interna de retorno, para o Estudo 2.

Como neste estudo a capacidade de geração de energia superior a 5.000 kW e não permite a compensação de energia, esta deve ser comercializada nos Ambientes de Contratação Regulada (ACR) e Ambiente de Contratação Livre (ACL). Assim, o preço de venda de energia considerado foi de US\$ 0,05 a cada kWh, valor adotado em função do valor de venda de energia atingida por usinas de biomassa no Leilão de Energia Nova, do edital de 30 de abril de 2015. Esta forma de comercialização pode ser realizada para geradores de até de 30 MW.

As capacidades do aterro adotadas neste estudo foram de 5.000.000, 10.000.000, 15.000.000 e 20.000.000 de habitantes. Os resultados obtidos na análise são apresentados na Tabela 26.

Tabela 26. Análise de viabilidade econômica para o Estudo 2

População	Eficiência (%)	IRB (%)	Potência (kW)	VPL (US\$)	Payback (Anos)	TIR (%)
5.000.000	25	50	3.103,27	390.210,36	13	15
		70	4.344,57	1.229.942,49	11	17
		100	6.206,53	2.621.584,98	9	19
10.000.000	25	50	6.206,53	2.512.247,39	9	19
		70	8.689,15	4.740.210,54	8	21
		100	12.413,07	8.290.255,36	7	23
15.000.000	25	50	9.309,80	5.138.744,65	8	21
		70	13.033,72	8.914.710,75	7	23
		100	18.619,60	14.846.508,23	6	25
20.000.000	25	50	12.413,07	8.066.426,57	7	23
		70	17.378,30	13.485.786,40	6	25
		100	28.826,14	21.932.686,38	6	27

Fonte: Autor, 2016.

Neste caso, o tempo de retorno do investimento é de 13 a 6 anos e a TIR está entre 15 e 27%, a qual pode ser considerada muito boa, pois está acima da taxa SELIC utilizada como taxa de desconto. Se os valores pagos pela energia do biogás fossem maiores os ganhos seriam melhores. Mas ainda assim, os produtores de energia elétrica com biogás de aterro podem participar dos leilões no ACR ou também vender a energia no ambiente ACL, com preços definidos em contratos de compra e venda bilaterais, já que o valor presente líquido mostrou atratividade em todos os casos.

Para Bidart (2013), para melhorar o cenário econômico os geradores podem se beneficiar de economias de escala pela transferência de resíduos, de forma a ter menos aterros mas com maiores capacidades e, conseqüentemente, condições mais vantajosas para recuperação de energia.

O fluxo de caixa para o Estudo 2 foi calculado pela Equação 18.

Para 5.000.000 de habitantes, as Figuras 35, 36 e 37 apresentam o fluxo de caixa para cada ano para os IRB de 50, 70 e 100%, respectivamente.

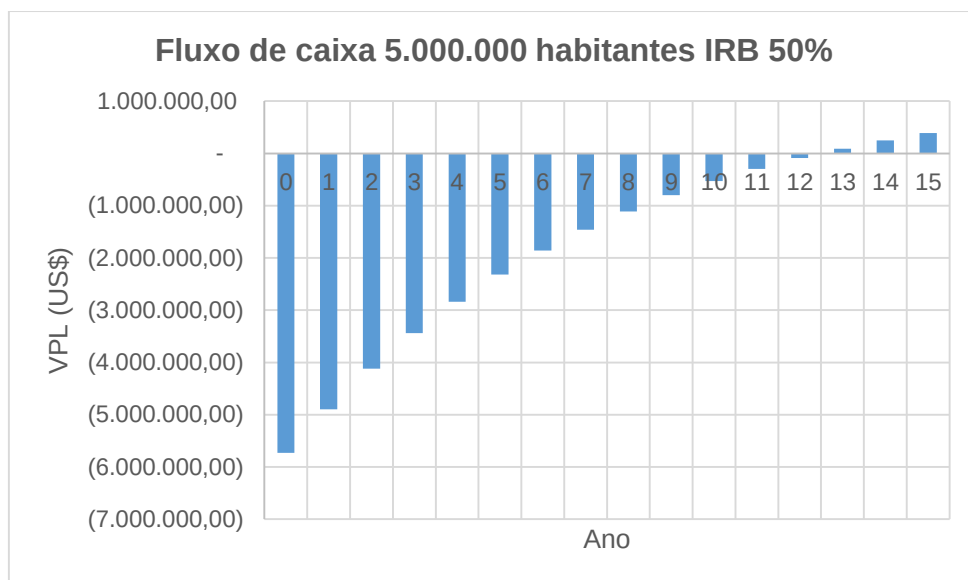


Figura 35. Fluxo de caixa para 5.000.000 habitantes e IRB de 50%

Fonte: Autor, 2016.

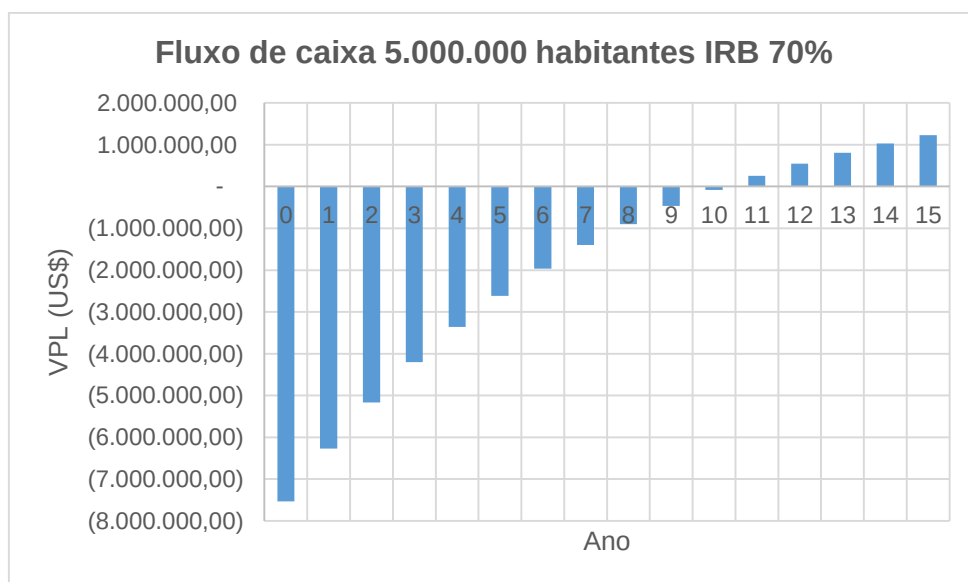


Figura 36. Fluxo de caixa para 5.000.000 habitantes e IRB de 70%

Fonte: Autor, 2016.

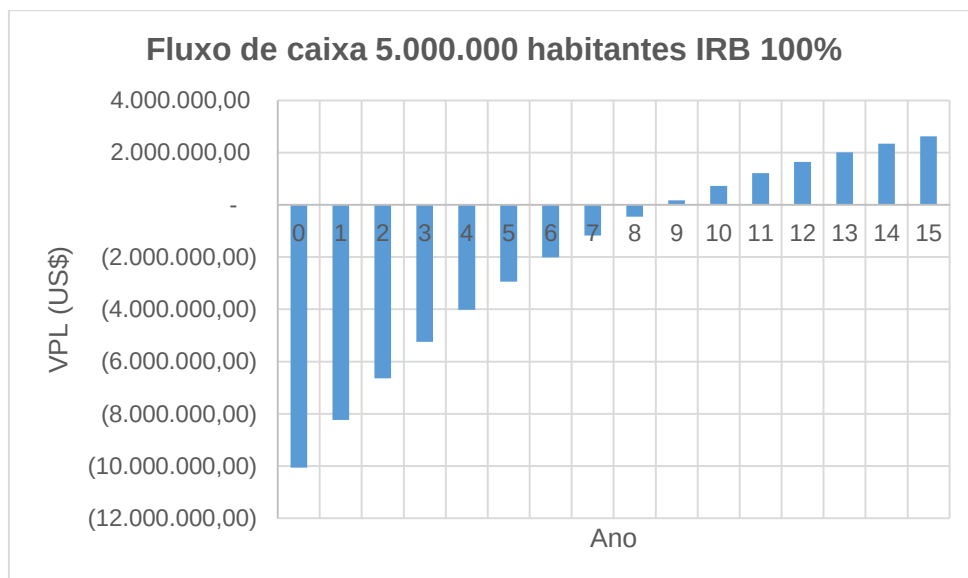


Figura 37. Fluxo de caixa para 5.000.000 habitantes e IRB de 100%

Fonte: Autor, 2016.

As Figuras mostram que o payback para 5.000.000 de habitantes é de 13 anos para o IRB de 50%, 11 anos para o IRB de 70% e 9 anos para o IRB de 100%.

As Figuras 38, 39 e 40 mostram o fluxo de caixa, em cada ano, para 10.000.000 de habitantes.

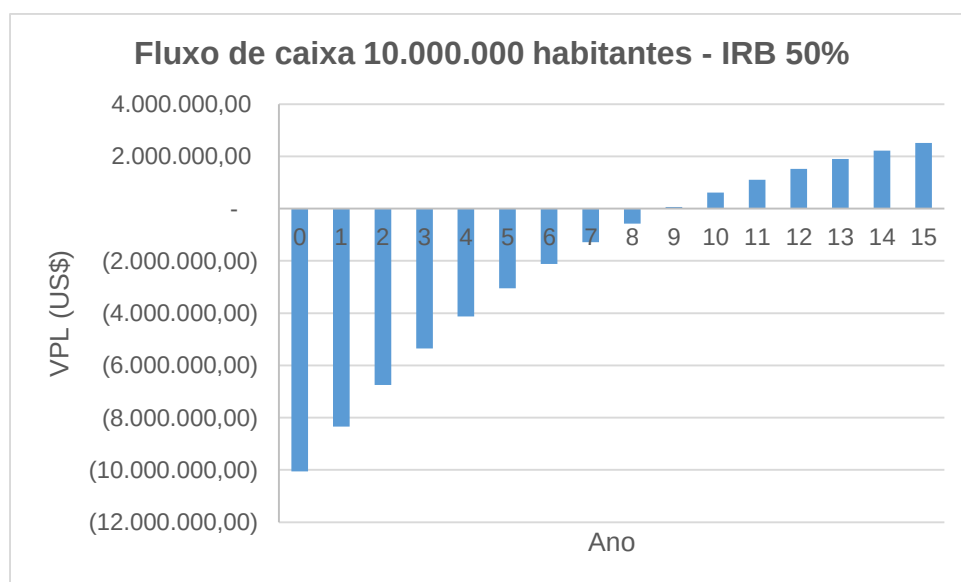


Figura 38. Fluxo de caixa para 10.000.000 habitantes e IRB de 50%

Fonte: Autor, 2016.

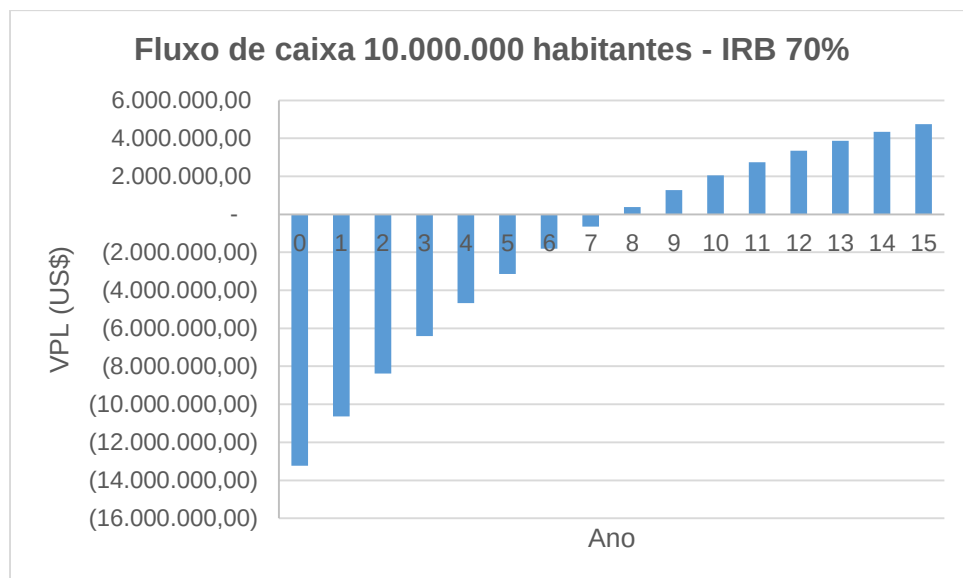


Figura 39. Fluxo de caixa para 10.000.000 habitantes e IRB de 70%
 Fonte: Autor, 2016.

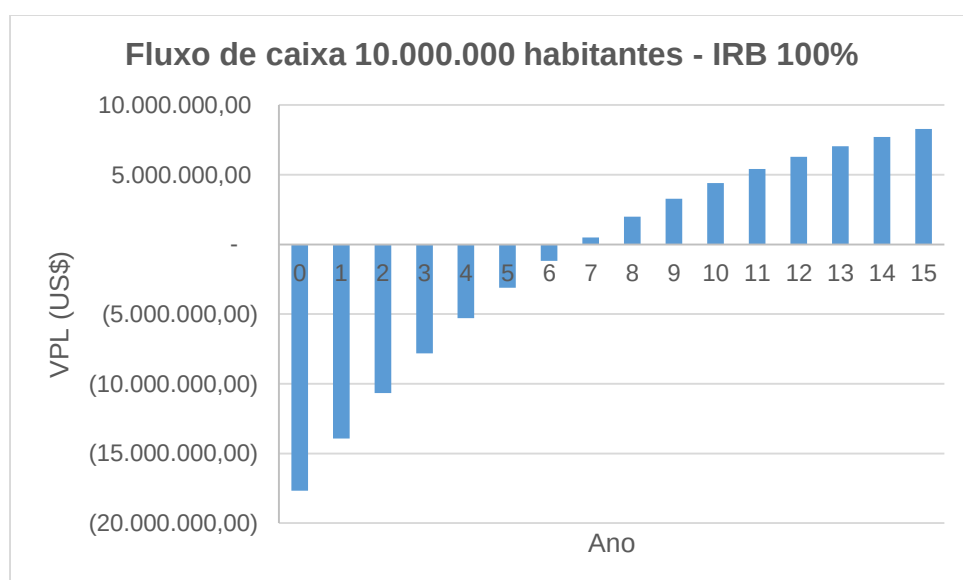


Figura 40. Fluxo de caixa para 10.000.000 habitantes e IRB de 100%
 Fonte: Autor, 2016.

Para 10.000.000 de habitantes, o período de retorno do investimento foi de 9 anos para o IRB de 50%, 8 anos para o IRB de 70% e 7 anos para o IRB de 100%.

As Figuras 41, 42 e 43 retratam o fluxo de caixa, em cada ano, para 15.000.000 de habitantes.

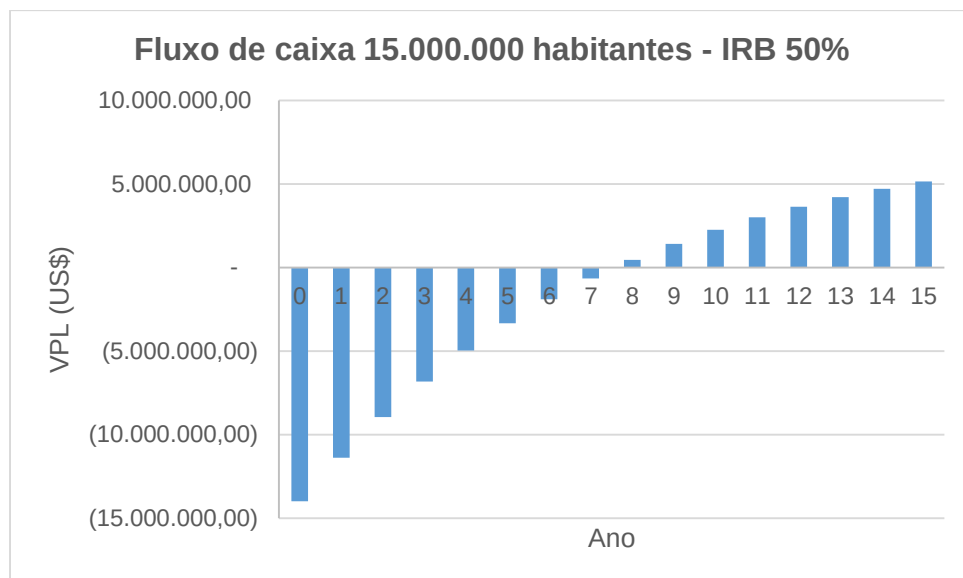


Figura 41. Fluxo de caixa para 15.000.000 habitantes e IRB de 50%
 Fonte: Autor, 2016.

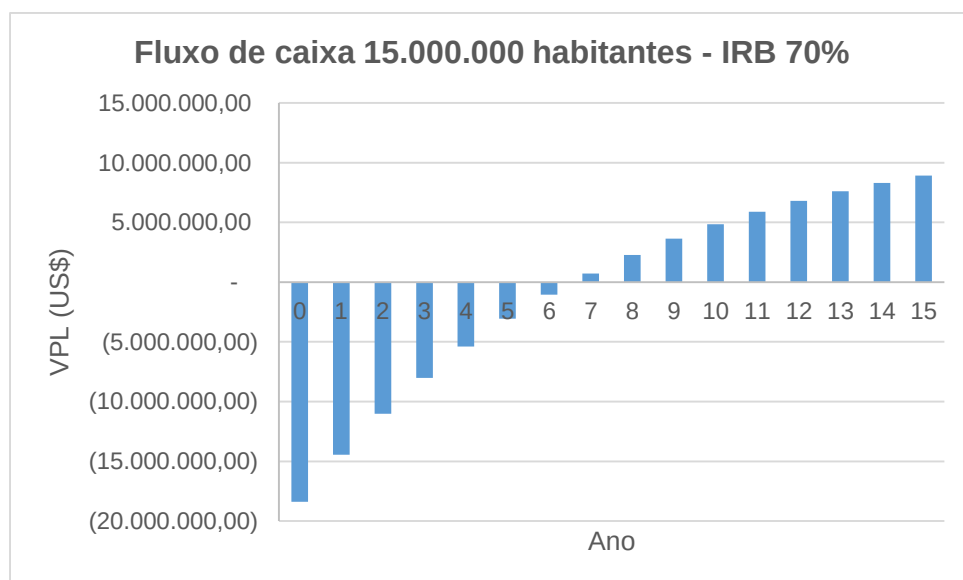


Figura 42. Fluxo de caixa para 15.000.000 habitantes e IRB de 70%
 Fonte: Autor, 2016.

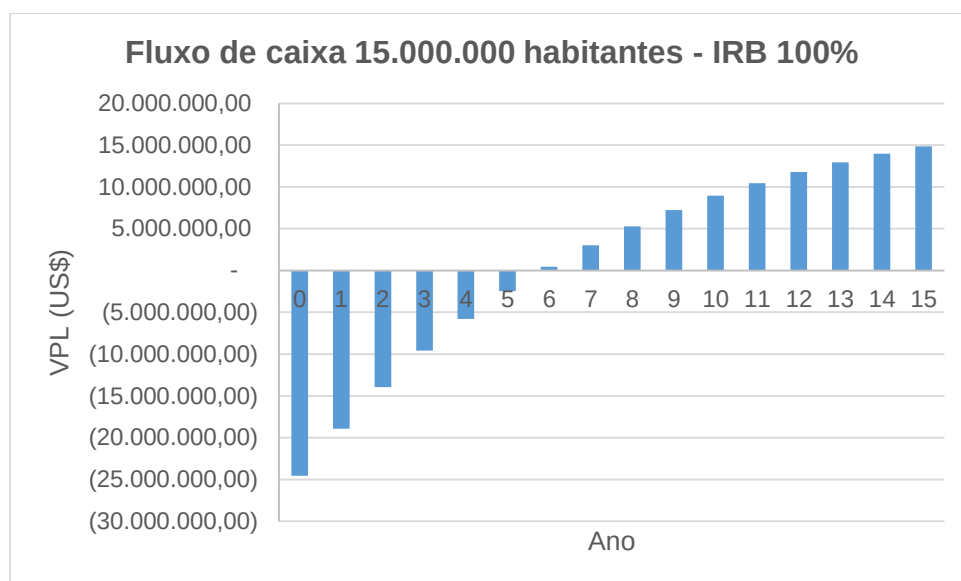


Figura 43. Fluxo de caixa para 15.000.000 habitantes e IRB de 100%

Fonte: Autor, 2016.

Para 15.000.000 de habitantes, o tempo de retorno foi de 8 anos para o IRB de 50%, 7 anos para o IRB de 70% e 6 anos para o IRB de 100%.

Por último, o fluxo de caixa para 20.000.000 habitantes, apresentado nas Figuras 44, 45 e 46.

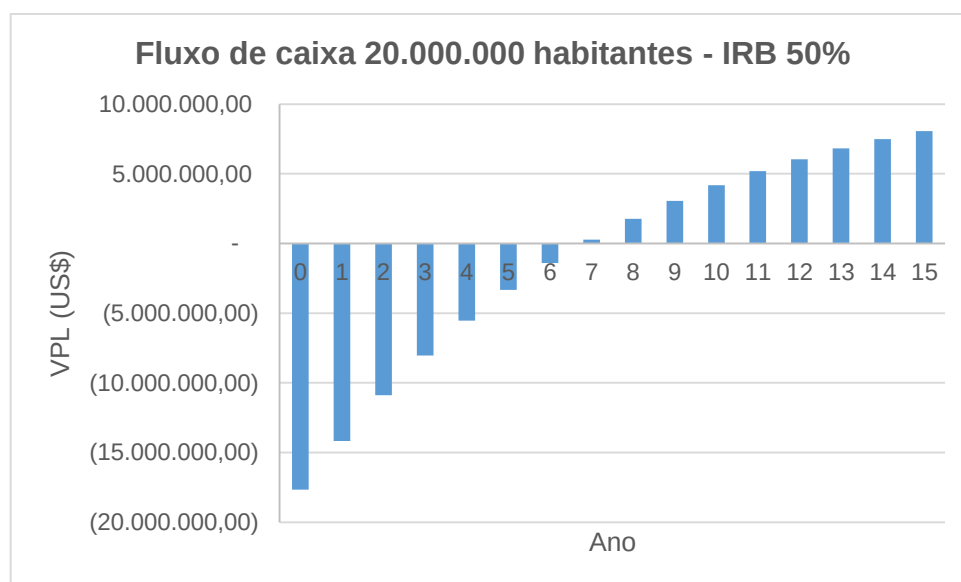


Figura 44. Fluxo de caixa para 20.000.000 habitantes e IRB de 50%

Fonte: Autor, 2016.

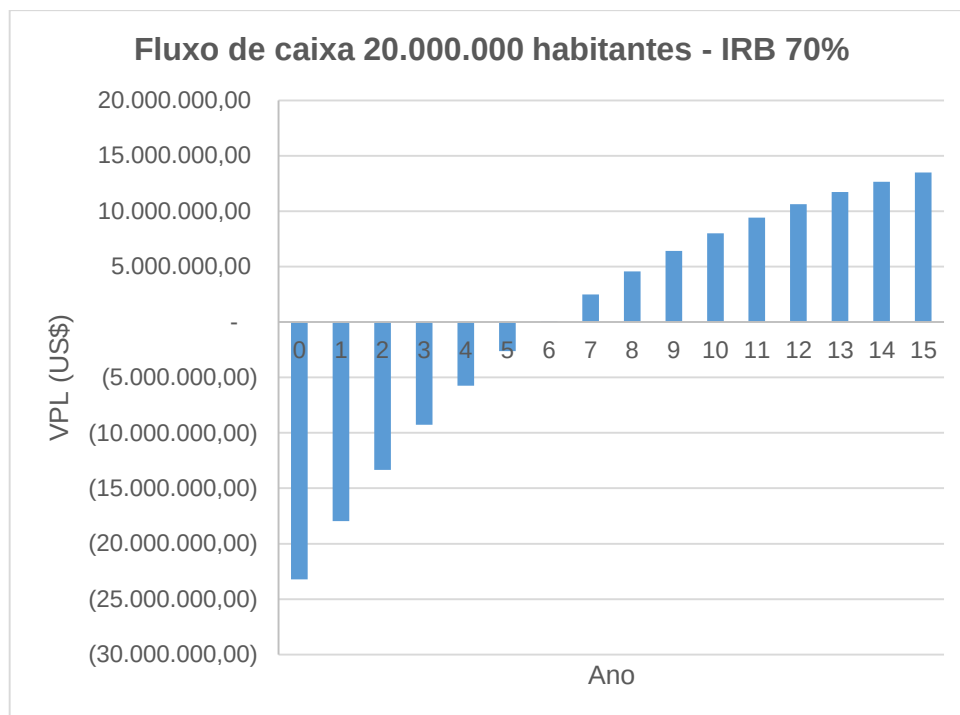


Figura 45. Fluxo de caixa para 20.000.000 habitantes e IRB de 70%
 Fonte: Autor, 2016.

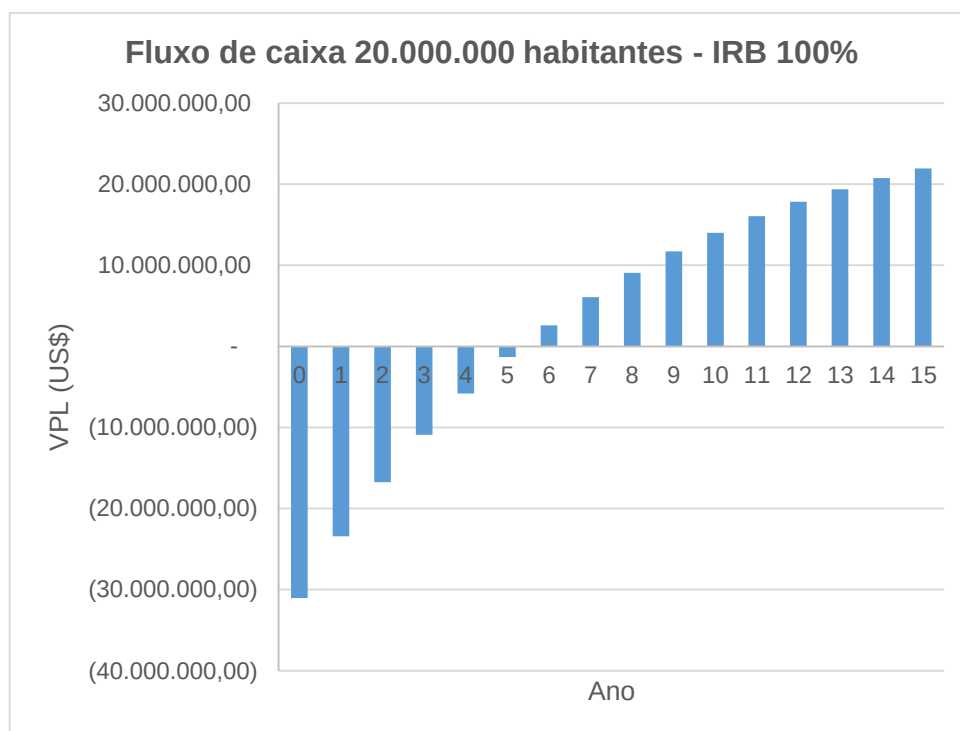


Figura 46. Fluxo de caixa para 20.000.000 habitantes e IRB de 100%
 Fonte: Autor, 2016.

Para a maior capacidade do estudo, os gráficos apontaram o período de retorno de 7 anos para o IRB de 50% e 6 anos para os IRB de 70 e 100%.

Embora todos os projetos apresentem viabilidade econômica, assim como no Estudo 1, as maiores capacidades de aterros trouxeram maiores valores de VPL e TIR e menor tempo de retorno, sendo, por isso, mais atrativos.

4.3 Viabilidade nos casos em que a comercialização pode ser feita por compensação ou venda de energia

A comercialização de energia proveniente do biogás pode ser feita na forma de compensação, para potências de até 5.000 kW ou nos ambientes de ACL e ACR, para potências entre 1.000 kW e 30.000 kW. Logo, algumas faixas populacionais permitem que a comercialização de energia seja realizada tanto na forma de compensação, quanto nos ambientes ACL e ACR, pois apresentam potência disponível entre 1.000 kW e 5.000 kW.

Isso acontece para alguns cenários de eficiência e índice de recuperação de biogás para populações entre 1.000.000 e 5.000.000 de habitantes, conforme pode ser observado nas Tabelas 13 e 22. Nestes casos, o gerador pode optar por uma ou outra forma de comercialização, sendo preciso avaliar qual é a opção mais rentável.

Mantendo os cenários com eficiência de 25%, a Tabela 27 apresenta a análise de viabilidade econômica para as capacidades de 2.000.000 e 4.000.000 de habitantes nas opções de compensação de energia e venda nos ambientes de contratação.

Tabela 27. Análise de viabilidade econômica para populações de 2.000.000 e 4.000.000 de habitantes considerando a compensação de energia e a venda nos ambientes de contratação

População	Eficiência (%)	IRB (%)	Potência (kW)	VPL (US\$)	Payback (Anos)	TIR (%)
Compensação de energia						
2.000.000	25	50	1.241,31	3.110.636,49	4	35
		70	1.737,83	4.644.488,64	4	37
		100	2.482,61	7.045.870,66	4	40
4.000.000	25	50	2.482,61	7.045.870,66	4	40
		70	3.475,66	10.372.658,29	3	43
		100	4.965,23	15.539.549,86	3	47
Comercialização nos ambientes de ACR e ACL						
2.000.000	25	50	1.241,31	-376.555,11	-	11
		70	1.737,83	-209.357,34	-	13
		100	2.482,61	111.478,04	14	15
4.000.000	25	50	2.482,61	69.328,95	15	14
		70	3.475,66	664.203,48	12	16
		100	4.965,23	1.670.001,75	10	18

Fonte: Autor, 2016.

Ao compararmos os resultados obtidos com ambas as formas de comercialização de energia na Tabela 27, percebemos que a compensação de energia se mostrou muito mais atrativa, com valores de VPL e TIR bem superiores e menor tempo de retorno do investimento. Para a comercialização de energia nos ambientes ACR e ACL, a capacidade de 2.000.000 de habitantes não se mostrou atrativa para os IRB de 50% e 70%, com VPL menor que zero e TIR inferior a taxa de desconto utilizada nos estudos. Para o IRB de 100% o projeto já seria viável, porém, esta é uma capacidade teórica e dificilmente alcançada em aterros reais.

Quanto ao fluxo de caixa para a compensação de energia, os gráficos para a capacidade de 2.000.000 de habitantes foram apresentados anteriormente nas Figuras 21, 22 e 23, e para a capacidade de 4.000.000 de habitantes nas Figuras 24, 25 e 26.

Já para a comercialização de energia nos ambientes ACR e ACL, o fluxo de caixa para a capacidade de 2.000.000 de habitantes é representado nas Figuras 47, 48 e 49.

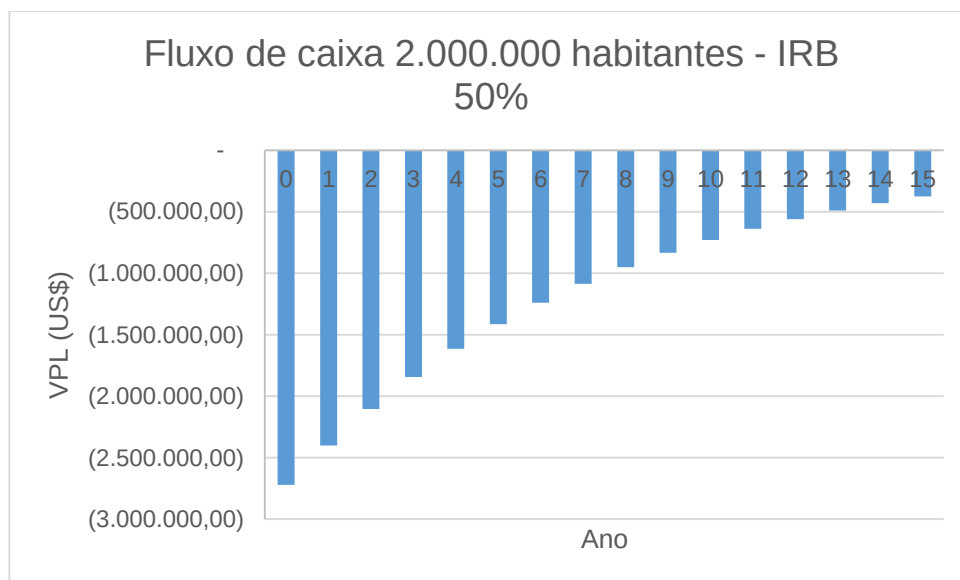


Figura 47. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 50% nos ambientes ACR e ACL
 Fonte: Autor, 2016.

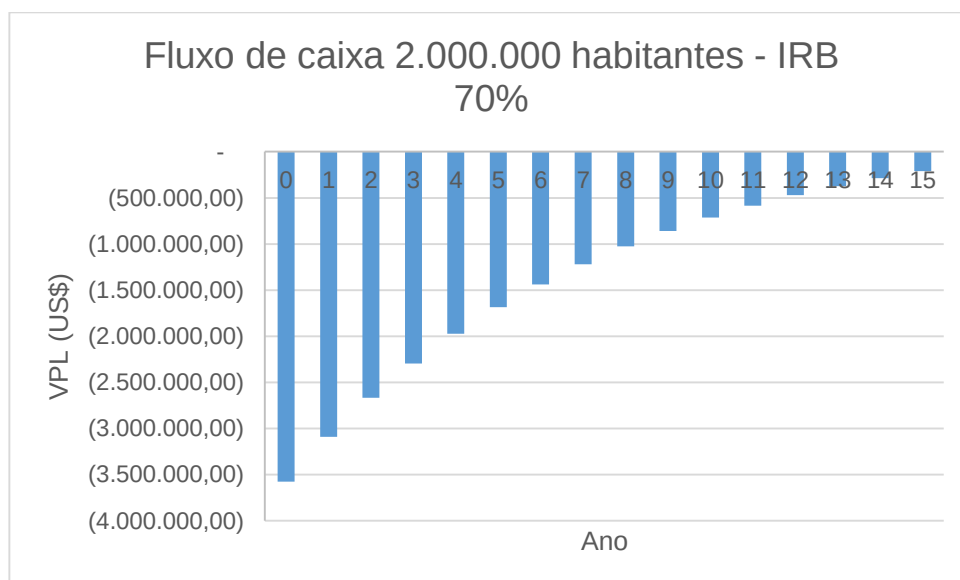


Figura 48. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 70% nos ambientes ACR e ACL
 Fonte: Autor, 2016.

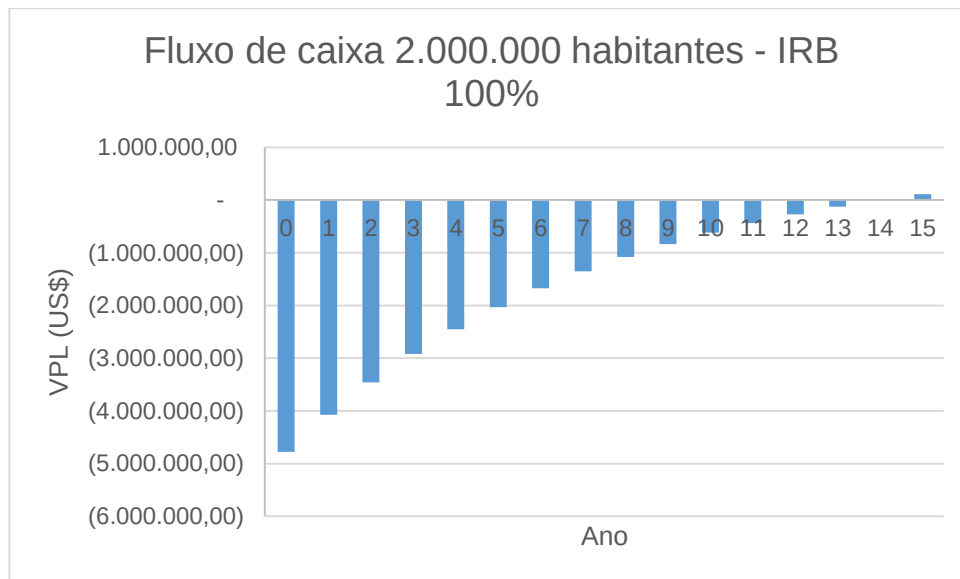


Figura 49. Fluxo de caixa para 2.000.000 habitantes e IRB de 100% nos ambientes ACR e ACL

Fonte: Autor, 2016.

Conforme se percebe nas figuras, os fluxos de caixa neste caso não são atraentes, pois permanecem negativos durante os anos de vida útil do projeto.

Os fluxos de caixa referentes a capacidade de 4.000.000 de habitantes, também nos ambientes ACL e ACR, são apresentados nas Figuras 50, 51 e 52.

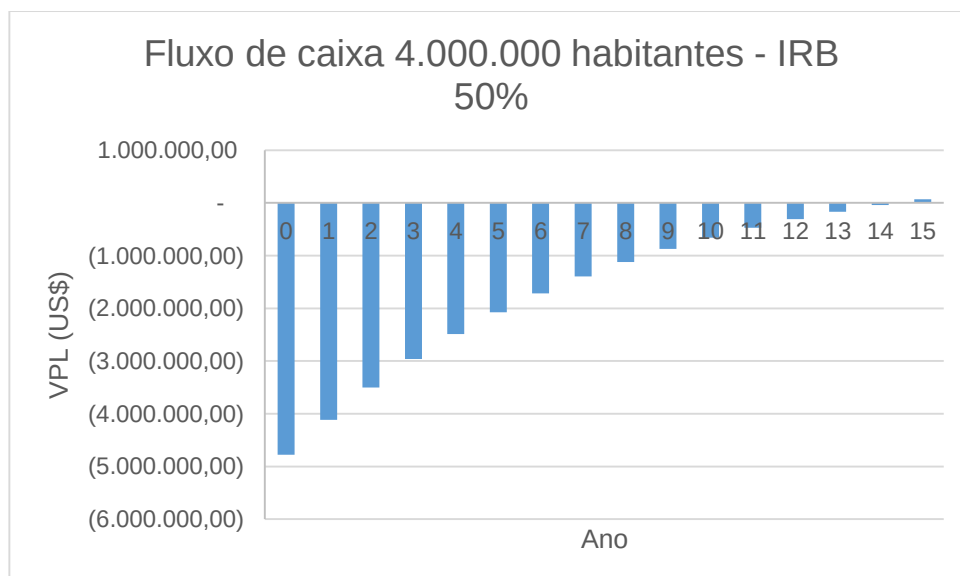


Figura 50. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 50% nos ambientes ACR e ACL

Fonte: Autor, 2016.

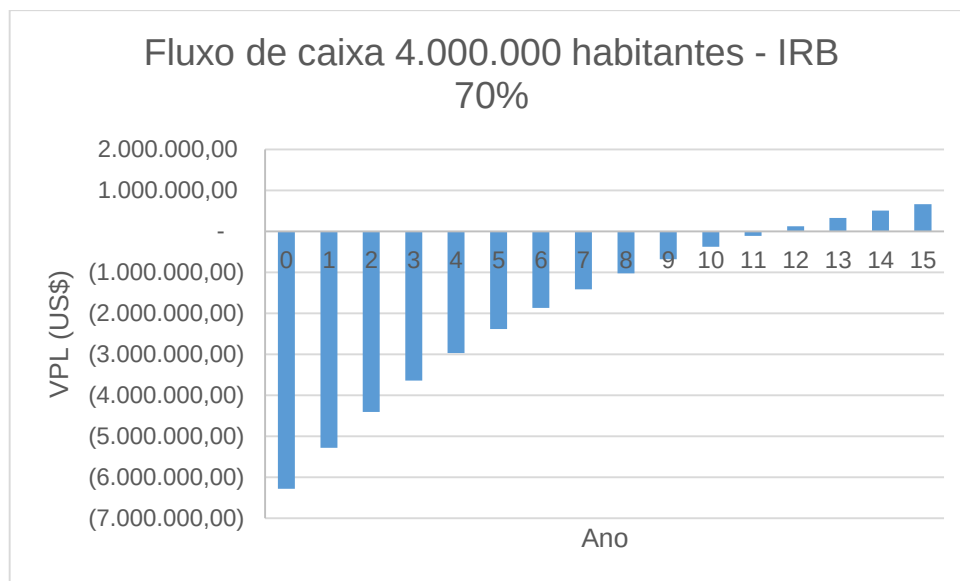


Figura 51. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 70% nos ambientes ACR e ACL

Fonte: Autor, 2016.

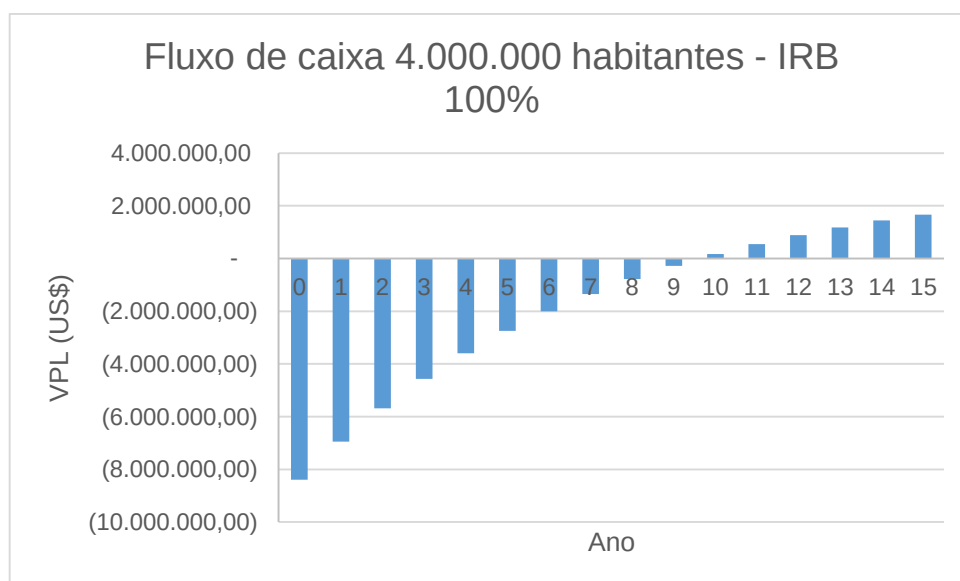


Figura 52. Fluxo de caixa para 4.000.000 habitantes e IRB de 100% nos ambientes ACR e ACL

Fonte: Autor, 2016.

Neste caso, os gráficos possuem melhores resultados, com um fluxo de caixa positivo a partir dos anos 15, 12 e 10, para os IRB de 50, 70 e 100%, respectivamente. Contudo, se comparado aos fluxos obtidos com a compensação de energia para as mesmas capacidades e IRB, percebemos que o retorno se dá em um período bem menor, de 3 e 4 anos.

Assim, nos casos em que o gerador de energia pode optar entre a compensação e a comercialização nos ambientes ACR e ACL, a opção mais vantajosa é a compensação, pois traz um retorno maior em um tempo inferior.

5 CONCLUSÃO

A discussão a respeito dos resíduos sólidos urbanos é fundamental para planejamento da sociedade, já que o manejo inadequado traz implicações negativas para o meio ambiente e para a saúde da população. Em encontro a isto, as necessidades energéticas aumentam conforme o país se desenvolve, exigindo que novas fontes de energia sejam incorporadas na matriz nacional, a fim de suprir essa demanda.

Os saldos obtidos com este trabalho demonstram que o biogás proveniente de aterros sanitários apresenta grande potencial para a geração de energia elétrica. A alta quantidade de biogás gerado pelas toneladas de resíduos depositados nos aterros, mesmo com índices de recuperação baixos e médios, permitiu potência suficiente para viabilizar projetos de conversão de energia elétrica. Todas as capacidades abordadas nos Estudos 1 e 2 demonstraram viabilidade econômica e atratividade, dentro do tempo de vida útil do projeto e considerando o mercado de energia atual.

Nos casos em que ambas as formas de comercialização de energia podem ser utilizadas, o estudo indicou que a compensação de energia traz melhores resultados num curto período de tempo, sendo assim, a opção mais vantajosa.

Por tudo isso, o uso do biogás para gerar energia elétrica no país mostrou-se satisfatório, devendo ser considerado uma alternativa viável para a diversificação da matriz energética por uma fonte renovável.

REFERÊNCIAS

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

ABREU, F. V. **Análise de Viabilidade Técnica e Econômica da Geração de Energia Através do Biogás de Lixo em Aterros Sanitários**. Dissertação (Mestrado em Fenômenos de Transporte) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2009. Disponível: <http://www.ppgem.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2009/DISSERTACA_OPPG-EM-FabioVianadeAbreu.pdf>. Acesso em: 05 jun., 2015.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa Nº 482 de 17 de abril de 2012**. Brasília: ANEEL, 2012.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 517 de 11 de dezembro de 2012**. Brasília: ANEEL, 2012.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 687 de 24 de novembro de 2015**. Brasília: ANEEL, 2015.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 1.897 de 16 de junho de 2015**. Brasília: ANEEL, 2015.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Micro e Minigeração Distribuída: Sistema de Compensação de Energia Elétrica**. Brasília: ANEEL, 2014, 28P. Acesso: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/downloads/livros/caderno-tematico-microeminigeracao.pdf>. Acessado em 12 de Maio de 2015.

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-termoeletrica-movida-a-biogas-do-nordeste-e-inaugurada-em-salvador>>. Acesso em: 20 de jan. 2014.

BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T.; SILVA, T. R. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. **Energy Policy**. Itajubá, v. 65, p. 150-164, 2014.

BBF TECNOLOGIAS DO AMBIENTE. **Biogás**. 2003. Disponível em: <<http://www.bbf.pt/index2.asp?Destino=biogas.asp&menu=menubiogas.asp>>. Acesso em: 28 de nov. 2014.

BCB - BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Dados diários da taxa SELIC**. 2016. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/?SELICDIARIOS>>. Acesso em: 13 de fev. 2016.

BIDART, C. **A Techno-economic Assessment of the Generation and Usage of Biogenic Gases in Chile as a Substitute of Natural Gas**. 2013. Tese (Doutorado

em Economia) - Fakultät für Wirtschaftswissenschaften des Karlsruher Instituts für Technologie, Karlsruhe. 2013.

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.

BOVE R.; LUNGHI, P. Electric power generation from landfill gas using and innovative technologies. *Energy Conversion and Management*. 2006.

BRASIL. **Decreto nº 2.003 de 10 de setembro de 1996.** Brasília, 1996.

BRASIL. **Decreto nº 5.163 de 30 de julho de 2004.** Brasília, 2004.

BRASIL. **Lei nº 9.074 de 7 de julho de 1995.** Brasília, 1995.

BRASIL. **Lei nº 9.427 de 26 de dezembro de 1996.** Brasília, 1996.

BRASIL. **Lei nº 9.648 de 27 de maio de 1998.** Brasília, 1998.

BRASIL. **Lei nº 10.762 de 11 de novembro de 2003.** Brasília, 2003.

BRASIL. **Lei nº 10.848 de 15 de março de 2004.** Brasília, 2004.

BRASIL. **Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010:** Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília, 2010.

CARESANA, F.; COMODI, G.; PELAGALLI, L.; PIERPAOLI, P.; VAGNI, S. Energy production from landfill biogas: the Italian case. **Biomass & Bioenergy**. Novedrate, v. 35, p. 4331-4339, 2011.

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.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **3º Leilão de Fontes Alternativas movimentou R\$ 3,4 bilhões em contratos.** 2015. Disponível em: < http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/noticias-opinioao/noticias/noticia-leitura?contentid=CCEE_350380&_afLoop=264034366871550#%40%3Fcontentid%3DCCEE_350380%26_afLoop%3D264034366871550%26_adf.ctrl-state%3Dyf2bu2zmf_4>. Acesso em: 26 de ago. 2015.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tipos de leilões.** 2016. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/tipos_leiloes_n_logado?_afLoop=5514017089072#%40%3F_afLoop%3D5514017089072%26_adf.ctrl-state%3Dp92u51mll_22>. Acesso em: 23 de fev. 2016.

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

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: 28 de nov. 2014.

ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário delta em Campinas – SP**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Pós-Graduação na Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2003. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000315429>>. Acesso em: 2 jun., 2015.

EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Methane Emissions**. 2011. Disponível em: <<http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/ch4.html>>. Acesso em: 7 de ago. 2014.

EPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Feasibility assessment for gas-to-energy at selected landfills in Sao Paulo, Brazil**. Public Review Draft. Air and Radiation. 1997.

ESMAP - ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAMME. **The World Bank Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean**. Ontário, 2004. Disponível em: <https://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/Handbook_Preparation_LandfillGas_to_EnergyProjects_LAC_Resized.pdf>. Acesso em: 05 jun., 2015.

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.

FIGUEIREDO, N.J.V. Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica. 2011. 147 p. **Dissertação (Mestre em Ciências)**. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2011. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/86/86131/tde-11082011-092549/pt-br.php>>. Acesso em: 05 out. 2015.

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: 5 de ago. 2014.

GOLDEMBERG, J. Energia e desenvolvimento. **Estudos Avançados**. São Paulo, v. 12, n. 33, 1998.

GÓMEZ, A.; ZUBIZARRETA, J.; RODRIGUEZ, M.; DOPAZO, C.; FUEYO, N. Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain. **Renewable Energy**. V.35, p.498-505, 2010.

GONÇALVES, M. A.; TANAKA, A. K.; AMEDOMAR, A. A. A destinação final dos resíduos sólidos urbanos: alternativas para a cidade de São Paulo através de casos de sucesso. **Future Studies Research Journal**. São Paulo, v. 5, n. 1, p. 96-129, Jan./Jun. 2013.

HOOGWIJK, M. **In the global and regional potential of renewable energy sources**. Doctoral Thesis. Utrecht University. 2004.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **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.

ICLEI - CONSELHO INTERNACIONAL PARA INICIATIVAS AMBIENTAIS LOCAIS. **Manual para aproveitamento do biogás: volume um, aterros sanitários**. ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe, Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2009.

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

IPCC - INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **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. 2013.

KUMAR, A.; SHARMA, M. P. Estimation of GHG and energy recovery potential from MSW landfill sites. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, n. 5, p. 50-61, 2014.

LEME, M. M. V.; ROCHA, M. H.; LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J.; LOPES, B. M.; FERREIRA, C. H. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, n. 87, 2014.

LIMA, G. B. Máquinas térmicas. **Módulos didáticos de física**. 2008.

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Energy and environmental potential of solid waste in Brazil. **Energy Policy**. Campinas, v. 39, 6 ed, p. 3496-3502, 2011.

MAGALHÃES, GERUSA DE SOUZA CORTÊS. Comercialização de energia elétrica no ambiente de contratação livre: uma análise regulatória – institucional a partir dos contratos de compra e venda de energia elétrica. **Dissertação** (Mestre em Energia). Universidade de São Paulo. Programa de Pós Graduação em Energia. São Paulo. 2009.

MANNA, L.; ZANETTI, M. C.; GENON, G. Modeling biogas production at landfill site. **Resources, Conservation and Recycling**. Torino, v. 26, p. 1-14, 1999.

MARIANO, M. O. H.; JUCÁ, J. F. T. Ensaios de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. **Engenharia Ambiental e Sanitária**. Recife, v. 15, n. 3, jul./set. 2010.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Brasil lança programa de geração distribuída com destaque para energia solar**. 2015. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticias/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030>. Acesso em: 19 de jan. 2016.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Leilões de energia elétrica**. Brasília, 2016. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/leiloes_de_energia/menu/inicio.html>. Acesso em: 23 de fev. 2016.

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. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso**. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia). Programa Inter unidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE) do Instituto de Eletrotécnica e Energia (IEE) da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

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.

PENTEADO R.; CAVALLI, M., MAGNANO, E., CHIAMPO, F. Application of the IPCC model to a Brazilian landfill: First results. **Energy Policy**. V. 42. 2012

PNUD - PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO. **Estudo sobre o Potencial de Geração de Energia a partir de Resíduos de Saneamento (lixo, esgoto), visando incrementar o uso de biogás como fonte alternativa de energia renovável**. São Paulo. 2010. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/164/_publicacao/164_publicacao10012011033201.pdf>. Acesso em: 30 de ago, 2014.

RECEITA FEDERAL. **Títulos federais administrados pela Secretaria da Receita Federal do Brasil**. 2015. Disponível em: <<http://idg.receita.fazenda.gov.br/acesso-rapido/tributos>>. Acesso em: 16 de jan. 2016.

ROMERO, J. C. R.; JIMÉNEZ, R. A.; ARQUILLOS, A. L. Profitability analysis of biogas recovery in Municipal Solid Waste. **Journal of Cleaner Production**. Málaga, v. 55, p. 84-91, 2013.

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

SANTIAGO, L. S.; DIAS, S. M. F. Matriz de indicadores de sustentabilidade para a gestão de resíduos sólidos urbanos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Rio de Janeiro, v. 17, n. 2, abr./jun. 2012.

SANTOS, A. H. M.; SIMÕES, A. A.; MARTINS, A. R. S.; VIANA, A. N. C.; FERREIRA, C.; BORTONI, E. C.; GUARDIA, E. C.; LORA, E. E. S.; NOGUEIRA, F. J. H.; TEIXEIRA, F. N.; HADDAD, J.; CORTEZ, J. A.; NOGUEIRA, L. A. H.; ALMEIDA, M. S. V.; PIRANI, M. J.; DIAS, M. V. X.; MARQUES, M. C. S.; VENTURINI, O.; GAMA, P. H. R. P.; MENDES, P. P. C.; YAMACHITA, R. A.; SILVA, V. F. Conservação de energia: eficiência energética de equipamentos e instalações. **Eletrobrás/Procel Educação/Universidade Federal de Itajubá/Fupai**. 3 ed, Itajubá, 2006.

SANTOS, O. S.; 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. **1ª Semana Acadêmica da Engenharia de Produção**. 2010.

SNIS - SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2014**. Ministério das cidades: Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Brasília. 2016.

SOUZA, S. N. M. de; WERNCKE, I.; MARQUES, C. A. ; BARICCATTI, R. A. ; SANTOS, R. F. ; NOGUEIRA, C. E. C. ; BASSEGIO, D. **Electric energy micro-production in a rural property using biogas as primary source**. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, v. 28, 2013.

THEMELIS, N. J.; ULLOA, P. A. Methane generation in landfills. **Renewable Energy**. New York, v. 32, p. 1243-1257, 2007.

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.

TSAI, W. T. Bioenergy from landfill gas (LFG) in Taiwan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Taiwan, v. 11, p. 331-344, 2007.

TSAGARAKIS, K. P. Optimal number of energy generators for biogas utilization in wastewater treatment facility. **Energy Conversion and Management**. 48, Crete, Greece, 2007.

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.

ZAMORANO M. Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2005.

ZAMORANO, M.; PÉREZ, J. I. P.; PAVÉS, I. A.; RIDAO, A. R. Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Granada, v. 11, p. 909-922, 2007.

ZANETTE, A. L. Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil. **Dissertação de Mestrado em Ciências em Planejamento Energético**, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

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.