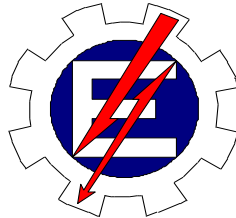


UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS



ENGENHARIA DE ENERGIA - MESTRADO

**ESTUDO DE CASO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A
PARTIR DE BIOGÁS DE RESÍDUOS SÓLIDOS PARA O MUNICÍPIO
DE ITANHANDU - MG**

Eng. Felipe Ramos

Itajubá - MG

2015

**ESTUDO DE CASO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A
PARTIR DE BIOGÁS DE RESÍDUOS SÓLIDOS PARA O MUNICÍPIO
DE ITANHANDU - MG**

Eng. Felipe Ramos

Dissertação de mestrado apresentado à Universidade Federal de Itajubá, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Energia.

Orientador: Prof^ª.Dr^ª. Regina Mambeli Barros

Itajubá - MG

2015

DEDICATÓRIA

À minha família, motivadora e suporte de minhas conquistas e realizações, que me agraciaram com um dos maiores bens que possuo, amor.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais e irmã, pelos constantes incentivos, ensinamentos, gestos de amor e carinho que motivaram meu desenvolvimento pessoal e profissional.

À Prof^a. Dra^a. Regina Mambeli Barros, minha orientadora, que acreditou no meu potencial e dedicou atenção e esforços ao meu trabalho de mestrado.

À Universidade Federal de Itajubá, que além de me acolher como o fez com seus ilustres filhos, foi um dos pilares na minha formação acadêmica e pessoal, me proporcionando experiências únicas durante os anos de graduação e pós graduação.

À FAPEMIG por contemplar-me com uma bolsa de mestrado modalidade PAPG – Engenharia da Energia (Mestrado), processo 11824.

Aos inúmeros amigos que me acompanharam e acompanham durante as diversas jornadas que enfrentamos ao longo da vida, sejam elas pessoais, profissionais ou acadêmicas. Sendo o suporte necessário nos momentos difíceis e as companhias queridas nas conquistas.

“Tudo vale a pena quando a alma não é pequena”.

Fernando Pessoa

RESUMO

O presente trabalho de dissertação contém um estudo de caso para o município de Itanhandu – MG, caracterizado por sua população pequena e grande atividade rural, onde são propostos três cenários de aproveitamento energético para geração elétrica a partir de biogás de resíduos sólidos. Em um primeiro cenário, é analisada a viabilidade de um empreendimento gerando energia elétrica a partir de biogás dos resíduos sólidos urbanos de um aterro proposto para o município. No segundo cenário o aproveitamento energético é realizado a partir do biogás de resíduos sólidos rurais (fezes de galinhas). Por fim, a terceira análise dá-se pela geração de energia elétrica a partir do biogás de ambas as fontes anteriores.

Os resultados encontrados evidenciam a inviabilidade econômica do empreendimento baseado somente no aterro sanitário, enquanto nos outros dois cenários os resultados são positivos, mostrando-se viáveis sob as perspectivas propostas e analisadas. O comportamento da primeira análise está de acordo com resultados encontrados na literatura para viabilidade de tais aproveitamentos em municípios pequenos, com relação ao número de habitantes, reforçando os resultados obtidos.

Palavras-Chave: Biogás, Resíduos Sólidos, Geração de Energia Elétrica.

ABSTRACT

This dissertation contains a case study for the city of Itanhandu – MG, characterized by its small population and large rural activity, where three energy use scenarios are proposed for electricity generation from solid waste biogas. In the first scenario, the feasibility of an enterprise generating electricity from municipal solid waste biogas for a proposed city landfill is analyzed. In the second scenario the energy use is done from the rural solid waste biogas (feces of chickens). Finally, the third analysis takes place for the generation of electricity from both previous biogas sources.

The results show the economic infeasibility of the project based only on landfill, while in the other two scenarios the results are positive, proving to be viable from the perspectives proposed and analyzed. The behavior of the first analysis is in agreement with results from the literature for the feasibility of such utilizations in small municipalities, by the number of inhabitants, reinforcing the results obtained.

Keywords: Biogas, Solid Waste, Electricity Generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição do total de atividades de projeto registradas por país até 30 de novembro de 2014 (UNFCCC, 2014).....	13
Figura 2. Distribuição das atividades de projeto no Brasil por escopo setorial de acordo com classificação da UNFCCC (UNFCCC, 2014).	13
Figura 3. Foto aérea do aterro sanitário Bandeirantes, região metropolitana de São Paulo (LOGA, [s.d.]).	21
Figura 4. Cartograma de municípios segundo a destinação final de resíduos sólidos urbanos – Brasil – 2008. Adaptado de IBGE (2010).....	22
Figura 5. Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia (adaptado de Chernicharo (1997)).....	23
Figura 6. Representação dos principais aspectos construtivos de uma célula de aterro (Adaptado de Staub <i>et al</i> , 2011).	27
Figura 7. Produção de metano instantânea $Y(\tau)$ de acordo com modelo Swana (Staub <i>et al</i> , 2011).....	35
Figura 8. Produção de metano acumulada em mil toneladas de resíduo seco, de acordo com modelo Swana (Staub <i>et al</i> , 2011).....	36
Figura 9. Software LangGEM [®] – Landfill Gas Emissions Model (USEPA, 2005).....	37
Figura 10. Software Biogás Aterro – Geração e Uso Energético (CETESB, 2006a). ...	38
Figura 11. Software Biogás Efluentes – Geração e Uso Energético (CETESB, 2006a). 39	
Figura 12. Esquemático do fluxo de gases em célula de aterro com recuperação de gás (Adaptado de Staub <i>et al</i> , 2011).	39
Figura 13. Relação Potência Máxima X Tempo Máximo de operação de acordo com o aproveitamento da potência gerada a partir do biogás de aterro. Adaptado de Santos <i>et al</i> (2015).	49
Figura 14. Exemplo da curva de permanência da potência (Silva, 2012).	50
Figura 15. Exemplo de gráfico da curva de Energia Gerada pela Potência Instalada. ...	51
Figura 16. Exemplo da análise da potência ótima instalada de acordo com a viabilidade econômica (Silva, 2012).	51
Figura 17. Projeções populacionais para o município de Itanhandu, 2011 até 2044.	55
Figura 18. Localização do município de Itanhandu – MG (Google Maps).....	56
Figura 19. PIB agropecuário, em milhões de reais, de alguns municípios de MG comparados a Itanhandu segundo dados de 2012 (IBGE).....	56
Figura 20. Produção de ovos de galinha, em milhões de reais, dos cinco maiores produtores de MG segundo dados de 2013 (IBGE).	57
Figura 21. Esquemático das três análises realizadas no estudo.....	58
Figura 22. Projeção de habitantes de Itanhandu – comparativo de métodos.....	59
Figura 23. Estimativa da quantidade de RSU gerado por ano no município de Itanhandu.	60
Figura 24. Potência disponível por ano - Aterro de Itanhandu.....	61
Figura 25. Curva de Permanência da potência disponível – Aterro de Itanhandu.	61
Figura 26. Energia Gerada em função da Potência Instalada – Aterro de Itanhandu.....	62

Figura 27. Valor Presente Líquido em função da Potência Adotada – Aterro de Itanhandu.	63
Figura 28. Taxa Interna de Retorno em função da Potência Adotada – Aterro de Itanhandu.	66
Figura 29. Histórico do rebanho de galinhas comparado ao PIB total e agropecuário – Dados referentes ao município de Itanhandu (IBGE, [s.d.]).	67
Figura 30. Projeção do rebanho de galinhas baseada na taxa de crescimento do PIB prevista.	68
Figura 31. Produção de metano estimada para 20 anos – Biodigestor de Resíduos Rurais.	68
Figura 32. Curva de Permanência da potência disponível – Biodigestor de Resíduos Rurais.....	69
Figura 33. Energia Gerada em função da Potência Instalada – Biodigestor de Resíduos Rurais.....	70
Figura 34. VPL e TIR em relação a Potência Instalada – Biodigestor de Resíduos Rurais.	71
Figura 35. Volume de total de metano produzido anualmente a partir do biogás do aterro sanitário somado ao biodigestor de resíduos rurais.	74
Figura 36. Curva de Permanência da potência disponível – Aterro e Biodigestor de Resíduos Rurais.	75
Figura 37. Energia Gerada em função da Potência Instalada – Aterro e Biodigestor de Resíduos Rurais.	75
Figura 38. VPL e TIR em relação a Potência Instalada – Aterro e Biodigestor de Resíduos Rurais.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Destino final dos resíduos sólidos, por unidades de destino dos resíduos.....	21
Tabela 2. Faixas de temperatura dos processos biológicos.	24
Tabela 3. Potencialidades e limitações dos principais biodigestores	28
Tabela 4. Composição do biogás de acordo com a literatura	29
Tabela 5. Características físico-químicas do CH ₄ e CO ₂	30
Tabela 6. Poder calorífico médio do biogás de acordo com a literatura	31
Tabela 7. Propriedades dos principais gases componentes do biogás.....	31
Tabela 8. Valores de recuperação de CH ₄ segundo autores.	40
Tabela 9. Vantagens e desvantagens das principais técnicas de remoção de H ₂ S.....	42
Tabela 10. Diferenças entre motores de ciclo Diesel e Otto.	44
Tabela 11. Rendimentos elétricos de MCI de acordo com a literatura.	44
Tabela 12. Rendimentos elétricos de Turbinas a gás de acordo com a literatura.....	45
Tabela 13. Custos de implantação e operação de plantas termoelétricas a partir de biogás aplicando MCI, de acordo com a literatura	47
Tabela 14. Custos de implantação e operação de plantas termoelétricas a partir de biogás aplicando Turbinas a gás, de acordo com a literatura.....	48
Tabela 15. Total de habitantes dos últimos censos (IBGE).....	59
Tabela 16. Parâmetros utilizados para o cálculo da potência disponível anualmente – Aterro de Itanhandu.	60
Tabela 17. Parâmetros utilizados para análise econômica – Aterro de Itanhandu.	63
Tabela 18. Resultados do cálculo do Máximo Benefício Líquido – Aterro de Itanhandu	64
Tabela 19. Resultados da análise econômica por VPL e TIR – Aterro de Itanhandu	65
Tabela 20. Total de galinhas dos últimos censos (IBGE, [s.d.]).	67
Tabela 21. Parâmetros utilizados para dimensionamento do volume de metano produzido por mês – Biodigestor de Resíduos Rurais (CETESB, 2006b)	68
Tabela 22. Parâmetros utilizados para o cálculo da potência disponível anualmente – Biodigestor de Resíduos Rurais.....	69
Tabela 23. Parâmetros utilizados para análise econômica – Biodigestor de Resíduos Rurais.....	70
Tabela 24. Resultados do cálculo do Máximo Benefício Líquido – Biodigestor de Resíduos Rurais	72
Tabela 25. Resultados da análise econômica por VPL e TIR – Biodigestor de Resíduos Rurais.....	73
Tabela 26. Resultados do cálculo do Máximo Benefício Líquido – Aterro e Biodigestor de Resíduos Rurais	77
Tabela 27. Resultados da análise econômica por VPL e TIR – Aterro e Biodigestor de Resíduos Rurais.	78
Tabela 28. Resumo comparativos dos resultados obtidos.	79
Tabela 29. Cálculo da Potência disponível baseada na projeção de produção de metano de acordo com o software LandGEM.....	87
Tabela 30. Fluxo de Caixa – Análise I.	92

Tabela 31. Cálculo da Potência disponível baseada na projeção de produção de metano de acordo com o software Biogás – Análise II.....	95
Tabela 32. Fluxo de Caixa – Análise II.....	97
Tabela 33. Cálculo da Potência disponível baseada na projeção de produção de metano de acordo com a união das análises I e II – Análise III.....	100
Tabela 34. Fluxo de Caixa – Análise III.....	102

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
AGV	Ácido Graxo Volátil
BRS	Bactéria Redutora de Sulfato
C/N	Relação Carbono/Nitrogênio
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DQO	Demanda Química de Oxigênio
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
MBL	Máximo Benefício Líquido
MCI	Motores de Combustão Interna
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MG	Minas Gerais
NBR	Norma Brasileira
NC	Nível de Carga
PAG	Potencial de Aquecimento Global
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
pH	Potencial Hidrogeniônico
PIB	Produto Interno Bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
PRSB	Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SV	Sólidos Voláteis
TIR	Taxa Interna de Retorno
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1. Introdução.....	12
2. Objetivos	14
3. Revisão bibliográfica.....	15
3.1. Resíduos Sólidos.....	15
3.1.1. Classificação.....	15
3.1.2. Características.....	16
3.1.2.1. Características Físicas.....	16
3.1.2.2. Características Químicas.....	17
3.1.2.3. Características Biológicas.....	18
3.1.2.4. Problemas da deposição dos RSU.....	18
3.1.3. Métodos de disposição final	19
3.1.3.1. Lançamento a céu aberto	19
3.1.3.2. Aterro controlado	19
3.1.3.3. Aterro sanitário	20
3.2. Digestão anaeróbia de Resíduos Sólidos	22
3.2.1. Processo de Digestão Anaeróbia	22
3.2.2. Digestores anaeróbios de orgânicos	26
3.2.2.1. Reatores para disposição final	26
3.2.2.2. Reatores de tratamento intermediário	27
3.3. Biogás	28
3.3.1. Características.....	29
3.3.2. Dimensionamento de produção do Biogás	32
3.3.2.1. Projeções Populacionais	32
3.3.2.2. Massa de Resíduo Sólido.....	34
3.3.2.3. Estimativa de produção de biogás.....	34
3.3.3. Recuperação em células de aterro	39
3.4. Aproveitamento energético do biogás	40
3.4.1. Limpeza e purificação do biogás	41
3.4.2. Técnicas de conversão de energia	43
3.4.3. Custos de implantação e operação.....	45
3.4.4. Seleção da Potência de Operação	49

3.4.4.1.	Permanência da Potência e Energia Gerada.....	50
3.4.4.2.	Análise Econômica e da Potência Ótima.....	51
4.	Estudo de caso.....	55
5.	Método	57
6.	Resultados e análise	59
6.1.	Análise I – Aterro Sanitário	59
6.2.	Análise II – Biodigestor de Resíduos Rurais (Dejetos de Galinha).....	66
6.3.	Análise III – Aterro Sanitário e Biodigestor de Resíduos Rurais.	74
6.4.	Resumo comparativo	79
7.	Conclusões e recomendações	79
7.1.	Recomendações para trabalhos futuros.....	80
8.	Referências bibliográficas	81
	ANEXO A – Tabela 29 – Cálculo da Potência disponível baseada na projeção de produção de metano de acordo com o software LandGEM – Análise I.....	86
	ANEXO B – Tabela 30 – Fluxo de caixa – Análise I.....	91
	ANEXO C – Tabela 31 – Cálculo da Potência disponível baseada na projeção de produção de metano de acordo com o software Biogás – Análise II.	94
	ANEXO D – Tabela 32 – Fluxo de caixa – Análise II.	96
	ANEXO E – Tabela 33 – Cálculo da Potência disponível baseada na projeção de produção de metano de acordo com a união das análises I e II – Análise III.....	99
	ANEXO F – Tabela 34 – Fluxo de caixa – Análise III.	101

1. INTRODUÇÃO

O padrão de vida humano difere de todas as demais espécies que ocupam o planeta, e embora qualquer organismo vivo gere resíduos durante seu ciclo de vida, a humanidade, devido sua capacidade de alterar o meio que ocupa, gera quantidades maiores, assim como qualidades distintas dos mesmos.

Associada diretamente aos resíduos, está a geração de metano em ambiente anaeróbio. Segundo a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency* – USEPA (USEPA, s.d.)), o metano é 25 (vinte e cinco) vezes mais prejudicial na atmosfera que o dióxido de carbono (CO₂) em um período de 100 (cem) anos, no que tange ao potencial de aquecimento global, considerando quantidades iguais de massa. Isso ocorre pois, apesar do tempo de vida do metano na atmosfera ser menor que o do CO₂, ele é mais eficiente na captura de radiação, promovendo mudanças climáticas.

Mais de 60% de toda a emissão de CH₄ do planeta é resultado de atividades humanas. Desse total, 18% são de responsabilidade dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e 9% de esterco animal oriundo de atividades agropecuárias. Sendo assim, os resíduos sólidos são responsáveis por aproximadamente 16% das emissões globais de metano (USEPA, s.d.).

Medidas para redução e contenção de emissões estão cada vez mais presentes nas políticas ambientais, e com isso, soluções diversas vêm sendo adotadas para atendê-las, como tecnologias para tratamento e captura de emissões, assim como aproveitamento energético das parcelas combustíveis dos gases, normalmente o metano.

Segundo dados do Status dos projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil (UNFCCC¹, 2014), até novembro de 2014, 7.579 atividades de projeto foram registradas no Comitê Executivo do MDL, sendo o Brasil responsável por 330 delas, posicionando o mesmo como o terceiro país com maior número de projetos, vide figura 1.

Do total de projetos brasileiros, 37% visam a reduções nas emissões de metano, atrás apenas dos 61% responsáveis pela redução de emissões de gás carbônico, sendo a indústria de energia e setores de tratamento e eliminação de resíduos os principais impulsionadores das iniciativas nacionais, representando juntos 78% do total de projetos registrados, como é possível observar na figura 2.

¹ Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre a Mudança do Clima (UNFCCC na sigla em inglês)

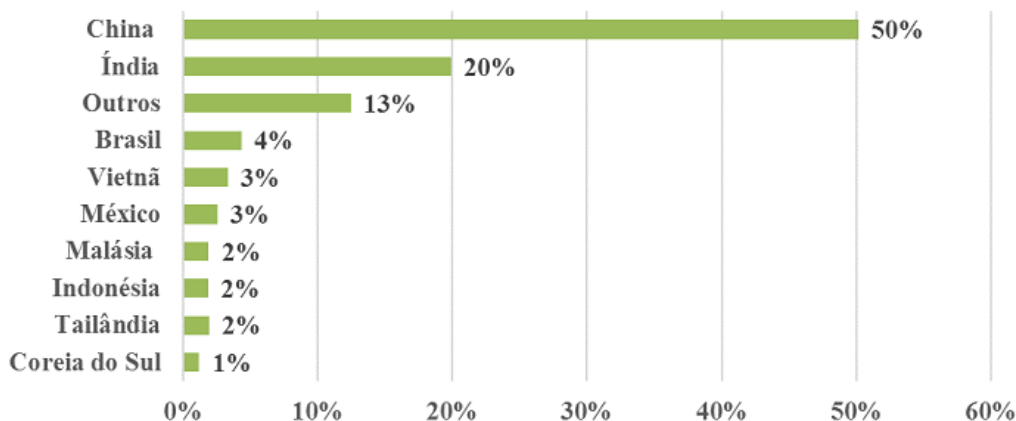


Figura 1. Distribuição do total de atividades de projeto registradas por país até 30 de novembro de 2014 (UNFCCC, 2014).

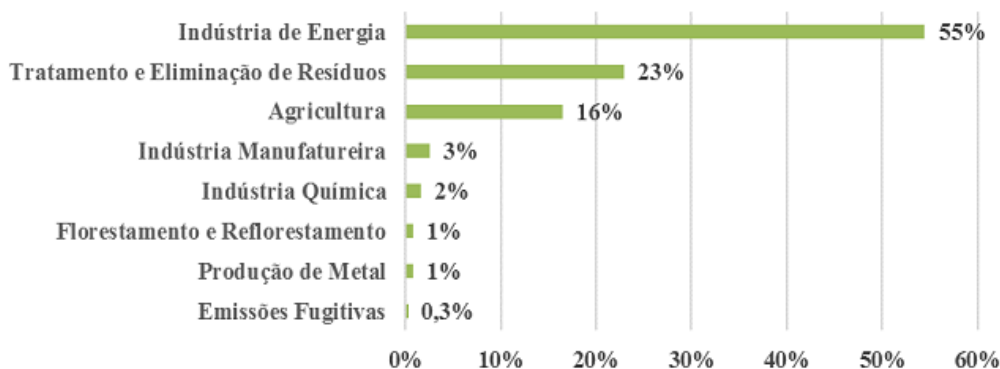


Figura 2. Distribuição das atividades de projeto no Brasil por escopo setorial de acordo com a classificação da UNFCCC (UNFCCC, 2014).

Apesar do número expressivo de projetos com foco na recuperação de metano, totalizando 122, e discriminados em empreendimentos baseados em Biogás, Gás de Aterro e Metano Evitado, o potencial energético instalado por esses subsetores não alcançam 4% do total de 15.722 MW do MDL, acrescentados a matriz energética nacional, mostrando que ainda há muito potencial a ser explorado nesses campos.

Nesse estudo são analisadas três configurações de uma termoelétrica operando a partir de biogás produzido na biodigestão de resíduos sólidos. As fontes de resíduo são um aterro sanitário proposto para o município de Itanhandu, e um biodigestor de resíduos rurais, também proposto, para tratamento de dejetos de galinha, motivado pelo número expressivo de rebanhos galináceos locais.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivos estabelecer um estudo de caso que represente pequenos municípios (em número de habitantes) com grande atividade rural, do ponto de vista econômico, assim como avaliar a viabilidade econômica de implantação de termoelétricas a partir de biogás produzido por digestão anaeróbia de resíduos sólidos oriundos de duas fontes distintas: Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), e Resíduos Sólidos Rurais (RSR), dejetos de galinha especificamente.

Também faz parte dos objetivos estabelecer um comparativo econômico entre três configurações distintas de abastecimento da termoelétrica, a partir de biogás de Aterro Sanitário, biogás de Biodigestor de Resíduos Rurais, e biogás de ambas as fontes, simultaneamente.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Resíduos Sólidos.

Segundo a norma NBR 10004: 2004 (ABNT NBR 10004, 2004, p.1), resíduos sólidos são definidos como:

[...] Resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções, técnica e economicamente, inviáveis em face a melhor tecnologia disponível.

3.1.1. Classificação

De acordo com a norma da ABNT NBR 10004 (ABNT NBR 10004, 2004) (ABNT, 2004), os resíduos são classificados em:

- a) Resíduos classe I - Perigosos;
- b) Resíduos classe II – Não perigosos;
 - resíduos classe II A – Não inertes.
 - resíduos classe II B – Inertes.

Os Resíduos classe I – Perigosos são aqueles que apresentam periculosidade em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas, causando:

- a) Risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices;
- b) Riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Também estão inclusos os resíduos que apresentam características como *inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade*, ou constem nos anexos A e B da mesma norma (ABNT NBR 10004, 2004).

Os Resíduos classe II – Não Perigosos podem ser subdivididos em:

- Resíduos classe II A - Não inertes

Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades como *biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água*.

- Resíduos classe II B - Inertes

Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a NBR 10007 (ABNT NBR 10004, 2004), e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme NBR 10006 (ABNT NBR 10004, 2004), não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, *cor, turbidez, dureza e sabor*, conforme anexo G da NBR 10004 (ABNT NBR 10004, 2004).

3.1.2. Características.

Caracterizar os resíduos sólidos urbanos é essencial para classificá-los de acordo com sua periculosidade, lidando de forma coerente com cada tipo do mesmo.

De acordo com Castilhos Junior (2006), características físicas, químicas, e biológicas dos resíduos sólidos podem ser identificadas em qualquer etapa do gerenciamento dos resíduos desde o momento da geração até a sua disposição final, variando suas características de acordo com o processo de geração, de manejo ou técnicas de tratamento e disposição final adotadas. Mesmo não sofrendo alterações devido ao manuseio, o resíduo estará sujeito à ação de microrganismos decompositores e às condições ambientais que desencadearão a transformação dos seus constituintes, podendo ser acompanhada pela liberação de emissões gasosas e líquidas.

3.1.2.1. Características Físicas.

Começando pela geração *per capita* de resíduos sólidos, Barros (2013) define que é a quantidade diária de resíduos gerada por cada habitante, podendo esse valor ser obtido a partir de dados oficiais da população (habitantes), no caso doméstico. Em outros setores critérios diferentes são utilizados. Na Indústria a geração é medida (em kg) por unidade produzida, em Serviços de Saúde medem por geração unitária, que é representada por leito, restaurantes por refeição servida, e assim por diante.

O teor de umidade reflete o percentual (em peso) de água em uma amostra de resíduo sólido. O teor de umidade de resíduo sólido exibe papel fundamental da velocidade de degradação aeróbia ou anaeróbia, como, respectivamente, por compostagem ou disposição em aterro sanitário. A umidade é essencial para efetivação das reações

microbiológicas, ou seja, para o metabolismo dos microrganismos, para as enzimas e produtos do metabolismo. Também exibe papel importante na incineração dos resíduos, uma vez que a água possui calor específico diferente dos resíduos (CASTILHOS JUNIOR, 2006).

Outra característica física é a composição gravimétrica, que representa o valor percentual (em peso) dos diferentes componentes dos resíduos sólidos em uma amostra. As categorias de resíduos podem ser as mais comumente encontradas, conforme o grau de detalhamento desejável para o estudo em questão, como por exemplo, resíduos orgânicos, plásticos, papel, papelão, vidro, metais, têxteis e diversos (Guermoud *et al.*, 2009). Pode-se subdividir dada categoria, por exemplo, plásticos em plásticos duros e plásticos moles.

Barros (2013) define o peso específico aparente como a relação entre o peso de resíduo (em kg) não compactado, em relação ao volume que ocupa (em m³). Possuindo importância, por exemplo, para o dimensionamento dos equipamentos de coleta, transporte e resistência mecânica, associados.

Por fim a compressibilidade. Ainda de acordo com a autora supracitada, essa característica exprime o potencial de redução de volume de dado resíduo sob a ação de uma pressão. É importante, por exemplo, para o dimensionamento dos equipamentos de coleta e transporte de resíduos, assim como para a vida útil do aterro sanitário.

3.1.2.2. Características Químicas

Como características químicas, Monteiro (2001) aborda como principais o Poder Calorífico, Potencial Hidrogeniônico (pH), Composição Química e Relação Carbono/Nitrogênio.

O poder calorífico indica a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor quando submetido à queima. É uma variável importante para o dimensionamento das instalações de todos os processos de tratamento térmico (incineração, pirólise e outros). O RSU pode assumir valores entre 8-12 GJ/ton de poder calorífico inferior (PCI), e entre 18-20 GJ/ton de poder calorífico superior (PCS), de acordo com Mambeli Barros *et al.* (2014).

Ao potencial hidrogeniônico (pH) atribui-se o teor de acidez ou alcalinidade dos resíduos, evidenciando o grau de corrosividade dos mesmos. Com isso, é possível estabelecer o tipo de proteção contra a corrosão a ser usado em equipamentos, assim como veículos contêineres e caçambas de materiais vulneráveis à corrosão. Em geral, situa-se na faixa de 5 a 7 (MONTEIRO, 2001). Também, é importante para a manutenção de microrganismos em sistemas de tratamento biológicos, uma vez que dados grupos e espécies possuem afinidade com determinada faixa de valores de pH.

A composição química consiste na determinação dos teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, resíduo mineral total, resíduo mineral

solúvel e gorduras. Essa característica ajuda a indicar a forma mais adequada de tratamento para os resíduos coletados.

Como última característica química, a relação carbono/nitrogênio (C/N) indica o grau de decomposição da matéria orgânica da massa de RSU nos processos de tratamento/disposição final, sendo fundamental para qualificar o composto produzido. Em geral, essa relação encontra-se na ordem de 35/1 a 20/1.

3.1.2.3. Características Biológicas

Quando se trata de características biológicas dos resíduos sólidos, determinam-se as populações microbianas e de agentes patogênicos presentes no RSU que, junto das características químicas, permitem selecionar métodos de tratamento e disposição finais adequados.

Conhecer as características biológicas dos resíduos é a base para o desenvolvimento de inibidores de cheiro e de retardadores/aceleradores da decomposição da matéria orgânica. Tais inibidores são normalmente aplicados em veículos de coleta para evitar ou minimizar problemas com a população ao longo do percurso dos veículos (MONTEIRO, 2001).

3.1.2.4. Problemas da deposição dos RSU

A deposição em aterros continua a ser hoje a primeira opção de tratamento para RSU e de outros resíduos não perigosos no Brasil, e de acordo com Maciel & Jucá (2011), aproximadamente 4.000 lixões estão atualmente em operação, contribuindo para a contaminação do meio ambiente e afetando negativamente a qualidade de vida da população. Diferentes programas de pesquisa foram lançados nas últimas décadas visando a otimizar a operação e a mitigar o impacto ambiental de aterros, devido as mudança climática e a reivindicação para fontes alternativas de energia (STAUB *et al.*, 2011).

As duas principais preocupações ambientais a respeito de aterros podem ser identificadas por:

- Problema 1. Fuga de líquidos percolados (chorume) do forro de fundo para os lençóis freáticos, poluindo conseqüentemente, águas subterrâneas;
- Problema 2. Fuga de metano (CH₄) através da cobertura do aterro sanitário para a atmosfera, contribuindo para os gases de efeito estufa (GEE).

O metano é o segundo gás mais importante do efeito estufa, depois do CO₂, responsável por aproximadamente 40% do aquecimento global nos últimos 150 anos. Ele tem uma vida atmosférica de cerca de 10 anos e um Potencial de Aquecimento Global (PAG) 25

vezes maior que o CO₂. Reduções nas fontes individuais de CH₄ podem diminuir as concentrações atmosféricas dentro de uma década (SPOKAS *et al.*, 2006).

3.1.3. Métodos de disposição final

A destinação final dos RSU compreende sistemas diversos, não havendo somente uma solução indicada. São expostos os três principais métodos adotados para disposição final do resíduo. Demais sistemas como o tratamento térmico (incineração, pirólise e outros) não são descritos, mas vale lembrar que seus subprodutos (cinzas, por exemplo) são destinados ao mesmo local que o resíduo não tratado termicamente.

3.1.3.1. Lançamento a céu aberto

Vilhena (2010) define o lançamento a céu aberto como “lixão” ou vazadouro. Compreende um método inadequado de disposição final de RSU, caracterizado pelo simples despejo sobre o solo, não atendendo à medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública.

Tal método de disposição é propício a proliferação de vetores (moscas, mosquitos, baratas, ratos), geração de maus odores, além de poluir das águas superficiais e subterrâneas pelo lixiviado – mistura do chorume, gerado pela degradação da matéria orgânica, com a água de chuva. Além desses fatores prejudiciais, ainda impossibilita o controle dos resíduos que são encaminhados para o local de disposição (BIDONE; POVINELLI, 1999). É, sob todos os aspectos, a pior forma de disposição de resíduos sólidos, embora em levantamentos realizados pelo IBGE (2010) (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) na Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008 (PNSB), represente a solução para 50,8% das comunidades brasileiras.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólido (PNRS), instituída pela lei federal 12.305/2010 (BRASIL, 2010a) e regulamentada pelo decreto federal nº 7.404/2010 (BRASIL, 2010b), em seu Art. 47, Inciso II, o lixão é uma forma proibida de disposição final de rejeitos, ou seja, aqueles que restaram após esgotarem todas as possibilidades de tratamento e recuperação de resíduos sólidos com as tecnologias disponíveis e economicamente viáveis. Conforme a referida lei, nos Planos Nacional e Estaduais de Resíduos Sólidos, são preconizados que haja metas para a eliminação e recuperação de lixões, associadas à inclusão social e à emancipação econômica de catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis.

3.1.3.2. Aterro controlado

Segundo Bidone & Povinelli (1999), preferível ao lançamento a céu aberto, porém ainda inadequado, o aterro controlado é uma forma de disposição no solo, na qual precauções

executivas são adotadas durante o desenvolvimento do aterro, como o recobrimento dos resíduos com argila (na maioria das vezes sem compactação). Isso aumenta a segurança do local, minimizando os riscos de impacto ao meio ambiente e à saúde pública. É uma solução compatível (não completamente adequada) para municípios pequenos, que não dispõem de equipamentos compactadores. De acordo com o IBGE (2010), essa solução ainda é adotada, no Brasil, como solução para aproximadamente 22,5% dos municípios, segundo dados do PNSB de 2008.

Conforme o regulamento (BRASIL, 2010b) da PNRS (BRASIL, 2010a), Art. 50, § 2º os planos municipais de gestão integrada de resíduos sólidos deverão identificar e indicar medidas saneadoras para os passivos ambientais originados, entre outros, de: I - áreas contaminadas, inclusive lixões e aterros controlados.

3.1.3.3. Aterro sanitário

Um aterro sanitário, como uma forma de tratamento e disposição final de RSU, consiste em uma solução sanitariamente segura à saúde da população e ao meio ambiente. Isto se deve aos requisitos de projeto, licenciamento e operação, necessárias ao processo de licenciamento e previstos por norma e regulamentações pertinentes. Tais requisitos de projeto compreendem atendimento aos critérios de localização, no que se referem às condições topográficas, hidrogeológicas e geotécnicas; sistema de monitoramento de águas subterrâneas; sistema de drenagem com queima (ou aproveitamento energético) de gases; sistema de tratamento de percolato; recobrimento interno com argila compactada e/ou geomembranas; plano de fechamento; etc (BARROS, 2013).

A Norma ABNT NBR 8419 de 1992 (ABNT, 1992), define um aterro sanitário (Figura 3) como:

[...] uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário.



Figura 3. Foto aérea do aterro sanitário Bandeirantes, região metropolitana de São Paulo (LOGA, [s.d.]).

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008 (IBGE, 2010), apenas 27,7% dos municípios brasileiros aplicam o aterro sanitário como destinação final para seus RSU. Mesmo sendo um valor relativamente baixo, houve um aumento na aplicação desse sistema, como se observa na Tabela 1.

Tabela 1. Destino final dos resíduos sólidos, por unidades de destino dos resíduos.
Brasil – 1989/2008.

Ano	Destino final dos resíduos sólidos, por unidade de destino dos resíduos (%)		
	Vazadouro a céu aberto	Aterro Controlado	Aterro Sanitário
1989	88,2	9,6	1,1
2000	72,3	22,3	17,3
2008	50,8	22,5	27,7

Fonte: (IBGE, 2010)

A figura 4, apresenta o cartograma de municípios segundo a destinação final dos resíduos sólidos urbanos, equivalente ao PNSB de 2008.

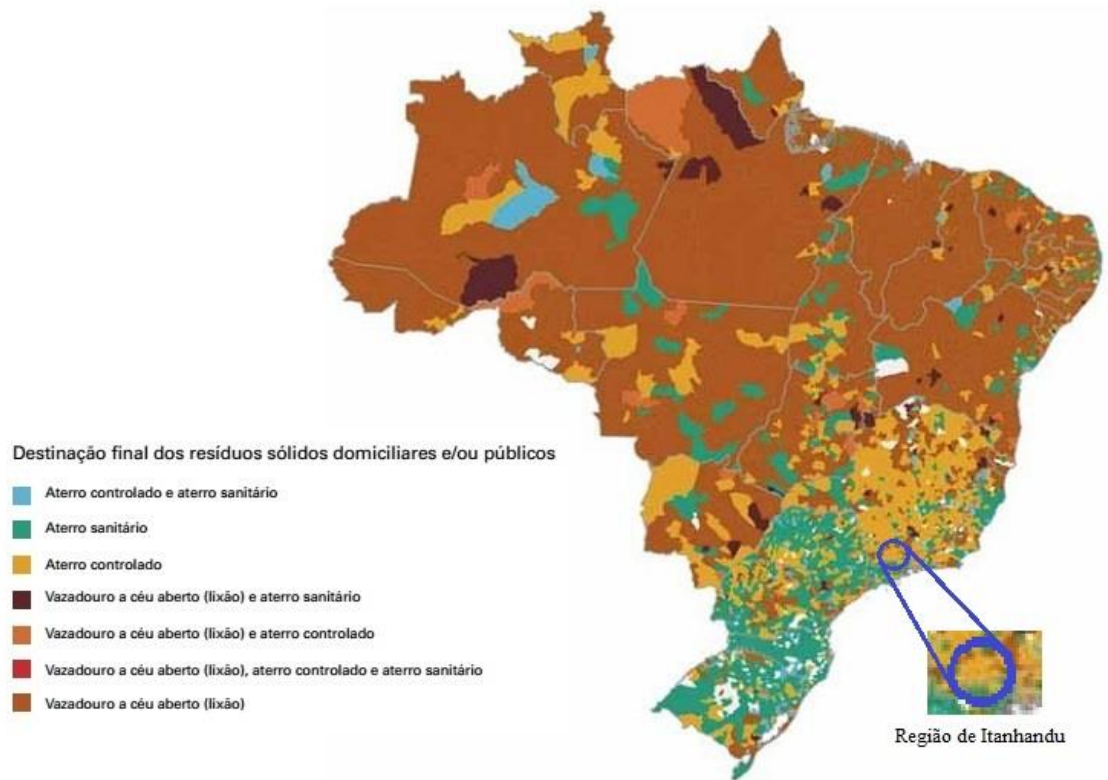


Figura 4. Cartograma de municípios segundo a destinação final de resíduos sólidos urbanos – Brasil – 2008. Adaptado de IBGE (2010).

3.2. Digestão anaeróbia de Resíduos Sólidos

3.2.1. Processo de Digestão Anaeróbia

A formação de biogás a partir de resíduos sólidos ocorre por meio da digestão anaeróbia do substrato, no qual a matéria orgânica é decomposta por bactérias e *archaeas* metanogênicas sem a presença de oxigênio. A figura 5 mostra as etapas da digestão anaeróbia.

De acordo com Chernicharo (1997), as quatro etapas da digestão anaeróbia são:

- **Hidrólise**

Por ação de exoenzimas liberadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas, os materiais particulados complexos (polímeros) são convertidos em materiais dissolvidos mais simples, sendo reduzidos em moléculas menores que são capazes de atravessar as paredes celulares das bactérias fermentativas.

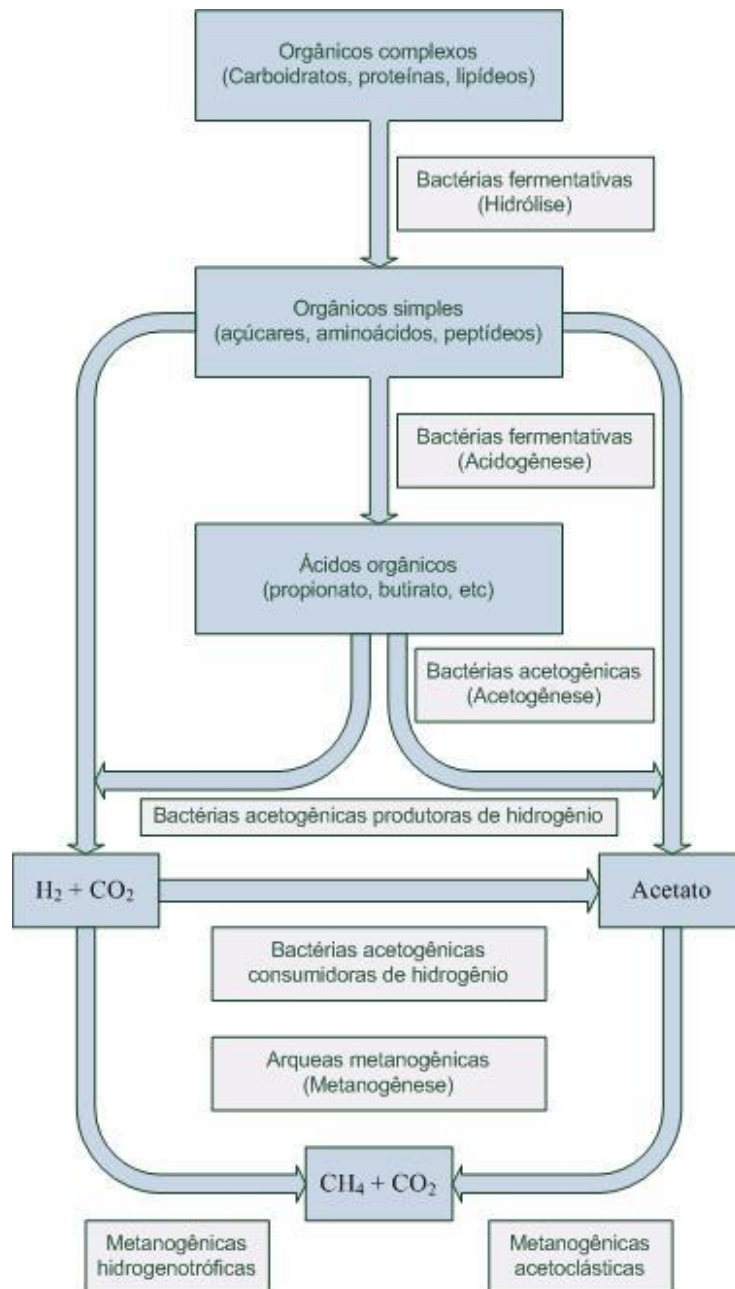


Figura 5. Rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia (adaptado de Chernicharo (1997))

- **Acidogênese**

Por ação de bactérias fermentativas acidogênicas, os compostos formados na fase de hidrólise são convertidos em diversos compostos mais simples, como ácidos graxos voláteis (AGVs), álcoois, ácido lático, gás carbônico, hidrogênio, amônia e gás sulfídrico.

- **Acetogênese**

As bactérias acetogênicas são responsáveis pela oxidação dos produtos gerados na fase acidogênica em substrato apropriado para as bactérias metanogênicas, gerando hidrogênio, dióxido de carbono e acetato.

- **Metanogênese**

Nessa etapa, as *archaeas* metanogênicas convertem os produtos das etapas anteriores em metano e dióxido de carbono, finalizando o processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica.

A Sulfetogênese é uma etapa indesejável na qual as Bactérias Redutoras de Sulfato (BRS) competem com as *archaeas* metanogênicas pelo substrato acetato e produzem gás sulfídrico. Por serem mais versáteis, as BRS quase sempre ganham essa competição; por essa razão, níveis adequados da proporção DQO/Sulfato devem ser mantidos a fim de evitar a excessiva produção de gás sulfídrico e em casos mais extremos a parada na geração de metano e azedamento do sistema.

Segundo Sosa *et al* (1999), a digestão anaeróbia é influenciada por fatores como Temperatura, pH, Proporção Carbono/Nitrogênio, Toxicidade, Nível de carga e Tempo de Retenção Hidráulica (TRH). Algumas dessas variáveis também são usadas para identificar estágios da digestão anaeróbia, quando a mesma é monitorada.

A temperatura está diretamente ligada à velocidade de metabolismo das bactérias, o equilíbrio iônico e a solubilidade do substrato. Como observado por Ozkaya *et al* (2007), a temperatura do substrato aumenta logo no início do processo, com o começo da atividade microbiológica, e isso ocorre devido ao perfil exotérmico das reações.

Três faixas de temperatura podem ser associadas ao crescimento microbiano na maioria dos processos biológicos. A faixa Psicrófila corresponde aos organismos Psicrófilos, capazes de viver em baixas temperaturas. Na Mesófila encontram-se os organismos Mesófilos, que vivem em temperaturas moderadas. Por fim, na faixa Termófila estão os organismos Termófilos, que resistem a temperaturas altas. Na tabela 2, estão as faixas de temperatura de acordo com duas referências da literatura.

Tabela 2. Faixas de temperatura dos processos biológicos.

Faixa	Temperatura (°C) Batstone <i>et al</i> (2002)	Temperatura (°C) Sosa <i>et al</i> (1999)
Psicrófila	4 a 15	10 a 25
Mesófila	20 a 40	20 a 45
Termófila	Acima de 45	Acima de 45

De acordo com Costa (2006), a atividade enzimática é fraca a 10°C e nula acima de 65°C. A opção por uma temperatura de trabalho terá de resultar do compromisso entre o volume de gás a produzir, o grau de fermentação e o tempo de retenção, quando se tratar de um reator intermediário (como biodigestores de baixa ou alta carga, por exemplo, e que são apresentados no tópico 3.2.2.2. do presente trabalho). Para reatores de disposição final, como é o caso de aterros sanitários, não há controle de temperatura de trabalho, ficando essa variável como resultado da atividade microbiológica apenas e da localização geográfica do aterro sanitário, com a radiação incidente. Na fase mesófila, as variações de temperatura são aceitáveis, desde que não sejam bruscas. O mesmo não acontece na fase termófila, na qual as variações não são aconselháveis (Costa, 2006). O autor ainda afirma que, todavia, ela permite cargas mais elevadas e um tempo de retenção menor, com maiores taxas de produção de biogás.

O pH interfere diretamente na atividade enzimática bacteriana. Se o meio estiver ácido a atividade microbiológica pode ser inibida, interrompendo a biodigestão. De acordo com Kothari *et al* (2014), um ponto ótimo para o pH assume valores que estejam na faixa de 6,8 - 8. Ozkaya *et al* (2007) observam ainda, que variações no pH do substrato são resultados da decomposição biológica do resíduo, sendo que baixos valores do mesmo são causados por ácidos orgânicos e indicam que o primeiro estágio da decomposição anaeróbia está prevalecendo. Para otimizar a produção de metano é bom manter a alcalinidade do reator, pois ela neutraliza as variações do pH.

Além de carbono orgânico, nitrogênio e fósforo são essenciais à atividade bacteriana, e uma relação carbono/nitrogênio (C/N) apropriada depende da digestibilidade das fontes de ambos. De acordo com Kothari *et al* (2014), valores ótimos para a relação C/N estão entre 20-30. Valores muito abaixo dessa relação inibem a atividade bacteriana, devido formação excessiva de amônia, enquanto valores muito acima resultam em baixo rendimento na formação de biogás, devido ao rápido consumo de nitrogênio durante a metanogênese.

Deve-se ter a precaução de evitar substâncias desinfetantes, sarnicidas ou bactericidas no reator, sob risco de paralisar a atividade bacteriana. Toxicidade por sulfeto e amônia também são fatores indesejáveis. Altas concentrações de sulfato reduzem a produção de metano devido à estimulação do crescimento de BRS que competem com as metanogênicas pelos substratos (H₂ e acetato) (Siles *et al*, 2010).

O nível de carga (NC) é definido por Lucas Júnior (1994), como a quantidade de sólidos voláteis (SV) presente no resíduo, e que são responsáveis diretos pela produção de biogás. Em um biodigestor, por exemplo, quanto maior a quantidade de SV na alimentação diária do mesmo, maior será a capacidade de geração de biogás daquele biodigestor. Segundo Kothari *et al* (2014), para o caso de um digestor de resíduos agropecuários, pode-se representar essa relação de acordo com a Equação 1.

$$NC = \frac{\text{Fluxo diário} \times \text{Concentração SV}}{\text{Volume líquido}} \quad (1)$$

Finalmente, o tempo de retenção hidráulica (TRH). Ainda de acordo com Kothari *et al* (2014), essa variável pode ser o tempo para a degradação completa da matéria orgânica (a exemplo de biodigestores em batelada), ou então, o tempo médio de permanência desse substrato no reator (fluxo contínuo). Esse fator é mais aplicado para reatores de tratamento intermediário, e seus valores podem variar de acordo com a faixa de temperatura do processo biológico, sendo entre 10-40 dias para condição mesofílica, e próximo de 14 dias para processos termofílicos.

3.2.2. Digestores anaeróbios de orgânicos

Processos biológicos de tratamento de resíduos (como digestão anaeróbia) consistem na transformação de compostos orgânicos biodegradáveis em subprodutos que podem ser removidos do sistema de tratamento. Essa transformação ocorre por meio de microrganismos envolvidos no processo e pode apresentar subprodutos em estado líquido (água), sólido (lodo biológico, no caso de tratamento de esgotos), ou gasoso (CO₂, CH₄ etc.) (Chernicharo, 1997).

Dois tipos de sistemas anaeróbios de tratamento são apresentados, sendo um empregado para disposição final de resíduo (célula de aterro sanitário), e outro para tratamento intermediário de resíduo (biodigestores).

3.2.2.1. Reatores para disposição final

Como a definição de aterro sanitário já foi citada em 3.1.3.3, nessa subseção são tratados alguns critérios de projeto relevantes ao processo de digestão anaeróbia em uma célula de aterro.

Sendo (o aterro) o destino final do resíduo que sofrerá a digestão anaeróbia, e lembrando que após esse procedimento serão gerados subprodutos nocivos ao meio ambiente (chorume, CO₂, CH₄), medidas de contenção devem ser adotadas.

Para garantir que o percolado de líquidos (chorume) não atinja lençóis freáticos próximos ao aterro deve-se instalar uma rede de drenos que conduzam o fluido para lagoas de tratamento dedicadas para esse fim, conforme ABNT NBR 13896 (ABNT, 1997) e ABNT NBR 15849 (ABNT, 2010), assim como uma forração adequada para a superfície interior da célula, podendo ser de argila e/ou mantas geossintéticas impermeabilizantes. De acordo com a ABNT NBR 15849 (ABNT, 2010), essas mesmas normas também instruem a construção de um sistema de monitoramento de águas subterrâneas, composto de, no mínimo, 4 (quatro) poços piezométricos.

Ainda na norma ABNT NBR 15849 (ABNT, 2010), recomenda-se a instalação de drenos de coleta de gases, para pré-tratamento antes de liberação na atmosfera, queimando-os em *flares* (queimadores) ou utilizando-os para aproveitamento energético, uma vez que é preferível a emissão de dióxido de carbono ao invés do metano. Também é necessário realizar a cobertura final da célula com argila e/ou mantas geossintéticas para evitar fugas gasosas para a atmosfera, assim como percolação de água de chuva.

A figura 6 ilustra os principais aspectos construtivos de uma célula de aterro de acordo com as principais medidas de contenção dos subprodutos da digestão anaeróbia.

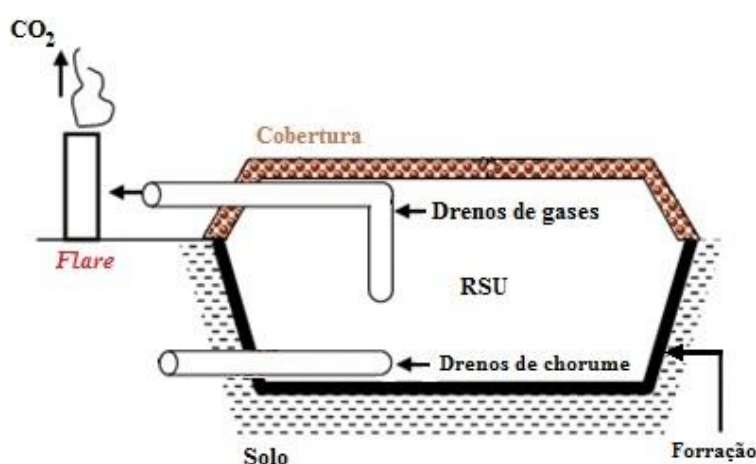


Figura 6. Representação dos principais aspectos construtivos de uma célula de aterro (Adaptado de Staub *et al.*, 2011).

3.2.2.2. Reatores de tratamento intermediário

Também tratados como *sistemas convencionais*, Chernicharo (1997) define reatores de baixa carga orgânica volumétrica como sistemas que não dispõem de mecanismos de retenção de grandes quantidades de biomassa de elevada atividade. Esses digestores são empregados para tratamento de lodo, resíduos orgânicos agropecuários, tanques sépticos, lagoas anaeróbias, etc. Dessa forma, diversas técnicas foram sendo desenvolvidas para cada vez mais aprimorar e otimizar o processo de biodigestão.

Os aspectos construtivos de reatores de baixa carga variam conforme a técnica aplicada e o tipo de matéria orgânica a ser digerida. Essas variações de configuração dos equipamentos e das técnicas levaram a uma evolução gradual dos sistemas, que alcançou o desenvolvimento de *sistemas de alta taxa*.

Diferentemente dos reatores de baixa carga, os de alta taxa apresentam menores tempos de detenção hidráulica e elevados tempos de retenção celular, θ_c , isso devido à presença de mecanismos de retenção de biomassa. A tabela 3 apresenta uma comparação dos principais tipos de sistemas de acordo com suas potencialidades e limitações.

Tabela 3. Potencialidades e limitações dos principais biodigestores

Sistema		Potencialidades	Limitações
Digestores de um estágio versus dois estágios	Um estágio	Projeto simples Menos falhas técnicas Menor custo Degradação de substrato eficiente devido à recirculação do mesmo	Tempos de retenção maiores Formação de lodo e espuma
	Dois estágios	Taxa de alimentação do segundo estágio constante Processo mais robusto Menos suscetível a falhas	Complexo e caro de se construir e manter Partículas sólidas precisam ser retiradas antes do segundo estágio
Digestores a seco versus úmido	Seco	Maior retenção de biomassa Alimentação controlada Pré-tratamento mais simples Menor demanda de energia parasitária	Manuseio complexo da matéria-prima Usa principalmente substrato mais estruturado Manuseio e mistura de materiais são difíceis
	Úmido	Bom histórico de operação Grau de controle do processo é alto	Formação de lodo Alto consumo de água e energia Circuito curto Sensível a choque de cargas
Digestores por cargas versus contínuos	Carga	Sem misturas, agitação ou bombeamento Baixas necessidades mecânicas e entradas de processo Custo-benefício	Canalização e entupimento Maiores volumes Baixo rendimento de biogás
	Contínuo	Simplicidade de projeto e operação Baixo custo de capital	Acidificação rápida Grande formação de ácidos graxos voláteis (AGV)
Reatores de alta taxa		Alta retenção de biomassa Alimentação controlada Baixos custos de investimento Nenhum material de suporte é necessário	Grandes tempos de partida Canalização para baixas taxas de alimentação

Fonte: Kothari *et al* (2014)

3.3. Biogás

O biogás corresponde à parcela gasosa dos subprodutos da digestão anaeróbia e tem sido alvo de diversas pesquisas relacionadas aos seus impactos ambientais, soluções para contenção de emissões, reaproveitamento energético, entre outras, conforme os trabalhos de Afazeli *et al* (2014), Staub *et al* (2011), Coimbra-Araújo *et al* (2014), e Salomon & Silva Lora (2009), por exemplo. Ele também é um portador de energia renovável com potencial para diversas aplicações, como geração de calor e energia elétrica (sem

enriquecimento de metano), combustível veicular (com enriquecimento de metano), e aplicações diversas quando elevado à qualidade de gás natural (Surendra *et al* 2014).

3.3.1. Características

Por se tratar de um subproduto da digestão microbiológica e uma composição de vários gases, o biogás não assume características fixas, dependendo da composição da matéria orgânica de origem. De acordo com Grima-Olmedo *et al* (2014), ele é composto principalmente por Metano (CH₄) e Dióxido de Carbono (CO₂), podendo conter traços de outros gases como Sulfeto de Hidrogênio, Amônia, Vapor d'água e compostos orgânicos voláteis. Na tabela 4 estão dados sobre a composição química do biogás de acordo com alguns trabalhos.

Tabela 4. Composição do biogás de acordo com a literatura

Gás	Concentração (v/v)				
	Salomon & Silva Lora (2009)	Surendra <i>et al</i> (2014)	Grima-Olmedo <i>et al</i> (2014)	Souza <i>et al</i> (2013)	Hosseini & Wahid (2013)
CH ₄	40-70%	50-75%	50-70%	40-75%	55-65%
CO ₂	25-40%	25-50%	25-40%	25-60%	35-45%
H ₂ S	0,1-0,5%	0-5000 ppm		-	0-1%
NH ₃	0,1-0,5%	0-500 ppm		-	0-1%
CO	0-0,1%	-		-	-
N ₂	0,5-2,5%	0-5%		-	0-3%
O ₂	0,1-1%	-		-	0-2%
H ₂	1-3%	-		-	0-1%
V _{água}	-	1-5%		-	-

(CH₄) – Metano; (CO₂) – Dióxido de Carbono; (H₂S) – Sulfeto de Hidrogênio; (NH₃) – Amônia; (CO) – Monóxido de Carbono; (N) – Nitrogênio; (O) – Oxigênio; (H) – Hidrogênio; (V_{água}) – Vapor d'água.

Como afirmam Hosseini & Wahid (2013), as características físico-químicas do biogás normalmente são modeladas de acordo com o metano e o dióxido de carbono, uma vez que a combinação de ambos corresponde a mais de 98% do volume de biogás. Sendo assim, a Tabela 5 apresenta as características físico-químicas do CH₄ e CO₂. Mesmo estando entre os menos de 2% do volume gasoso, componentes como amônia (NH₃) e vapor d'água não devem ser menosprezados, principalmente quando o biogás for destinado à combustão. Como exposto por Salomon & Silva Lora (2009), o biogás é agressivamente corrosivo devido à presença de H₂S, além do vapor d'água também

contribuir com a corrosão na presença de CO₂ e SO₂ (dióxido de enxofre), segundo Surendra *et al* (2014).

Tabela 5. Características físico-químicas do CH₄ e CO₂

Propriedade ^a	CO ₂	CH ₄
Peso específico, ar = 1 ^b	1,52	0,554
Volume específico	0,55 m ³ /kg	1,51 m ³ /kg
Calor específico, C _p em 101kPa	858 J/kg.K	2261 J/kg.K
C _p /C _v	1,303	1,307
Limite de inflamabilidade	-	5-15% (v/v)
Concentração no ar	-	0,0947 (v/v) 0,0581 (m/m)

^a Propriedades para gás puro em pressão atmosférica e 25°C.

^b Ar a 101 kPa, 15,6°C.

Fonte: Hosseini & Wahid (2013)

Para efeitos energéticos, uma das principais características do biogás é seu poder calorífico, uma vez que essa variável influi diretamente na capacidade de geração de energia (térmica, elétrica e/ou mecânica). Novamente, a não uniformidade do biogás gera variações nos valores de poder calorífico, e isso fica evidente na Tabela 6, onde estão valores encontrados em alguns dos diversos trabalhos presentes na literatura.

O metano é o portador energético da mistura que compõe o biogás, e de acordo com Coimbra-Araújo *et al* (2014), com poder calorífico próximo de 33,98 MJ/m³ em condições padrão de temperatura e pressão. Os demais gases (com exceção do O₂), quando não contribuem negativamente com o poder calorífico, apenas geram complicações técnicas e ambientais. A Tabela 7 resume as propriedades dos principais gases da mistura.

Para ilustrar o potencial combustível do biogás, Coimbra-Araújo *et al* (2014) fazem um comparativo entre o biogás e demais combustíveis. Segundo os autores, 1 m³ de biogás com 65% de CH₄ equivale a 0,6 m³ de gás natural, ou 0,882 l de propano, ou 0,789 l de butano, ou 0,628 l de gasolina, ou 0,575 l de óleo combustível, ou 0,455 kg de carvão betuminoso, ou 1,602 kg de lenha seca.

Tabela 6. Poder calorífico médio do biogás de acordo com a literatura

Autor	Poder Calorífico Médio (MJ/m³)	Particularidade
Coimbra-Araújo <i>et al</i> (2014)	22,3	65% de CH ₄
Souza <i>et al</i> (2013)	50,2	Valor máximo quando altamente purificado
Salomon & Silva Lora (2009)	22,5-25,0	Biogás tratado com redução de CO ₂
Leme <i>et al</i> (2014)	18,0-19,0	50% de CH ₄
Kothari <i>et al</i> (2014)	21,0-25,0	Biogás de resíduo de comida processada
Kothari <i>et al</i> (2014)	23,0-27,0	Biogás de fezes de aves poedeiras
Surendra <i>et al</i> (2014)	21,5	60% de CH ₄
Grima-Olmedo <i>et al</i> (2014)	18,5	Biogás de aterro
Grima-Olmedo <i>et al</i> (2014)	23,8	Biogás de biodigestor
Hosseini & Wahid (2013)	13,7-27,4	40-80% de CH ₄

Tabela 7. Propriedades dos principais gases componentes do biogás

Gás	Propriedade
CH ₄	Portador energético
CO ₂	Diminui o poder calorífico Corrosivo na presença de umidade
H ₂ S	Corrosivo Gera emissões de enxofre durante combustão
NH ₃	Gera emissões de NO _x durante combustão
N ₂	Diminui o poder calorífico
Vapor d'água	Facilita corrosão na presença de CO ₂ e SO ₂

Fonte: Adaptado de Surendra *et al* (2014).

3.3.2. Dimensionamento de produção do Biogás

Como observado nos capítulos e itens anteriores, o biogás é uma parcela importante da biodigestão, tanto por seu potencial risco ao meio ambiente, quanto por seu potencial energético. Sendo assim, dimensionar ambos potenciais tem sido uma das tarefas amplamente estudadas e desenvolvidas, e como reforçam Aronica *et al* (2009), diversas metodologias para estimar a produção de biogás são descritas na literatura.

3.3.2.1. Projeções Populacionais

Qualquer uma das técnicas de dimensionamento de produção de biogás necessita de variáveis de entrada referentes à população atendida pelo aterro/biodigestor, média de RSU gerado *per capita*, tempo de vida útil da planta de geração, entre outras. Desses fatores, um dos mais sensíveis é o dimensionamento da população a ser atendida, uma vez que essa varia com o passar dos anos de forma significativa. Para prever ou, pelo menos, incluir um comportamento mais provável no modelo, existem técnicas distintas de calcular projeções populacionais. Não apenas a população, mas também a capacidade de produção de metano por massa de resíduos (L_0) e a taxa de geração de metano (k) também são fatores sensíveis em modelos de primeira ordem de previsão de produção de biogás.

Projeção Aritmética

A projeção aritmética é um método que emprega uma taxa de crescimento populacional constante, e o ajuste da curva pode ser feito por análise da regressão. Esse método é normalmente aplicado para estimativas de curto prazo, até 5 anos (Qasin, 1999). As equações da Taxa de Crescimento e da Projeção são respectivamente 2 e 3.

$$\frac{dP}{dt} = K_a \quad (2)$$

$$P_t = P_0 + K_a \cdot (t - t_0) \quad (3)$$

Projeção Geométrica

A projeção geométrica é um método que emprega uma taxa de crescimento populacional em função da população atual para cada momento, e o ajuste da curva pode ser feito por análise da regressão. Esse método é normalmente aplicado para estimativas de curto prazo

também, até 5 anos (Qasin, 1999). As equações da Taxa de Crescimento e da Projeção são respectivamente 4 e 5.

$$\frac{dP}{dt} = K_g \cdot P \quad (4)$$

$$P_t = P_0 \cdot e^{K_g \cdot (t-t_0)} \quad (5)$$

Taxa decrescente de crescimento

Esse método parte do princípio que à medida que a cidade cresce, sua taxa de crescimento diminui, assumindo um perfil de saturação assintótico (Qasin, 1999). As equações da Taxa de Crescimento e da Projeção são respectivamente 6 e 7, assim como da Constante de Proporcionalidade corresponde a equação 8.

$$\frac{dP}{dt} = K_d \cdot (P_s - P) \quad (6)$$

$$P_t = P_0 + (P_s - P_0) \cdot [1 - e^{-K_d \cdot (t-t_0)}] \quad (7)$$

$$K_d = \frac{-\ln\left[\frac{P_s - P_2}{P_s - P_0}\right]}{t_2 - t_0} \quad (8)$$

Crescimento Logístico

Diferentemente dos demais modelos, o crescimento logístico estabelece que o crescimento populacional segue uma relação matemática logística, caracterizada por uma curva em “S”. A população tende a um valor de saturação assintótico, assim como no crescimento decrescente (Qasin, 1999). As equações da Taxa de Crescimento e da Projeção corresponde respectivamente a 9 e 10, assim como das constantes de proporcionalidade correspondem a 11 e 12.

$$\frac{dP}{dt} = K_1 \cdot P \cdot \frac{(P_s - P)}{P} \quad (9)$$

$$P_t = \frac{P_S}{1 + c.e^{K_1.(t-t_0)}} \quad (10)$$

$$c = \frac{P_S - P_0}{P_0} \quad (11)$$

$$K_1 = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \left[\frac{P_0.(P_S - P_1)}{P_1.(P_S - P_0)} \right] \quad (12)$$

3.3.2.2. Massa de Resíduo Sólido

Uma vez obtida a projeção populacional para o período desejado, aplica-se uma equação (13) para obter a produção total de RSU em cada período. Essa é baseada na multiplicação entre a população do período e a média de resíduo gerado *per capita* para aquela região. Isso é necessário devido ao tempo de vida útil de um projeto, que é preconizado para ser calculado para uma vida útil entre 20 a 30 anos (Barros, 2013).

$$W(t) = P(t).I(t).d \quad (13)$$

Sendo:

W(t) a massa total de resíduo no período

P(t) a população no período

I(t) a média de resíduo gerado por dia por habitante no período

d é o número de dias no período

t é o período.

De acordo com Barros (2013), como fator de correção da média de resíduo sólido urbano gerado *per capita*, sugere-se um aumento de 1% para projeções futuras devido a mudanças socioeconômicas que interferem no índice, como crescimento econômico, por exemplo.

3.3.2.3. Estimativa de produção de biogás

Em posse dos valores das principais variáveis de entrada para estimar a produção de biogás, basta aplicar uma metodologia. Entre as metodologias mais comuns, estão os modelos matemáticos baseados em equações de primeira ordem (Staub *et al*, 2011;

Spokas *et al*, 2006; Di Trapani *et al*, 2013; Di Bella *et al*, 2011), que descrevem a produção de metano baseados em variáveis de entrada diversas, como massa de resíduo, tempo de deposição, conteúdo gravimétrico, potencial de biometano, etc. Também se encontram metodologias experimentais práticas (Maciel & Jucá, 2011), aplicações de outros modelos matemáticos (Aronica *et al*, 2009), técnicas computacionais de previsão (Ozkaya *et al*, 2007), etc.

Um exemplo de modelo matemático baseado em equações de primeira ordem é o Swana, adotado por Staub *et al* (2011). Este modelo descreve a produção de metano instantânea de acordo com a taxa de produção baseada em equação de primeira ordem (Equação 14).

$$Y(\tau) = BMP \cdot \frac{Q}{1+w} \cdot k \cdot e^{-k \cdot (\tau - \tau_{OB})} \cdot \frac{k+s}{s} \cdot (1 - e^{-s(\tau - \tau_{OB})}) \quad (14)$$

Sendo τ o tempo relativo, desde o início da deposição de resíduos, e $Y(\tau) = 0$ para $\tau \leq \tau_{OB}$, com τ_{OB} sendo o tempo relativo ao início da produção de metano pelos resíduos correspondentes (anos). Na equação (14), $Y(\tau)$ é a produção de metano em $\text{Nm}^3 \text{ anos}^{-1}$, BMP é o potencial de biometano em $\text{Nm}^3 \text{ t}^{-1} \text{ DM}$, Q é a massa de resíduos enterrados na célula em toneladas molhadas, w é o conteúdo médio gravimétrico de água dos resíduos (kg kg^{-1}), k é a taxa de geração de CH_4 em anos^{-1} , s é o parâmetro de forma em anos^{-1} e τ_{OB} é o tempo quando a metanogênese começa em anos. O BMP é o volume máximo de metano que pode ser produzido por uma tonelada de resíduos secos. Pode ser avaliado por um teste padrão de bioquímica ou usando uma abordagem estequiométrica, levando em conta as diferentes frações orgânicas.

A figura 7 mostra a produção de metano instantânea $Y(\tau)$, e a figura 8 representa a produção de metano acumulado em mil toneladas de resíduos secos em uma célula, utilizando o modelo Swana.

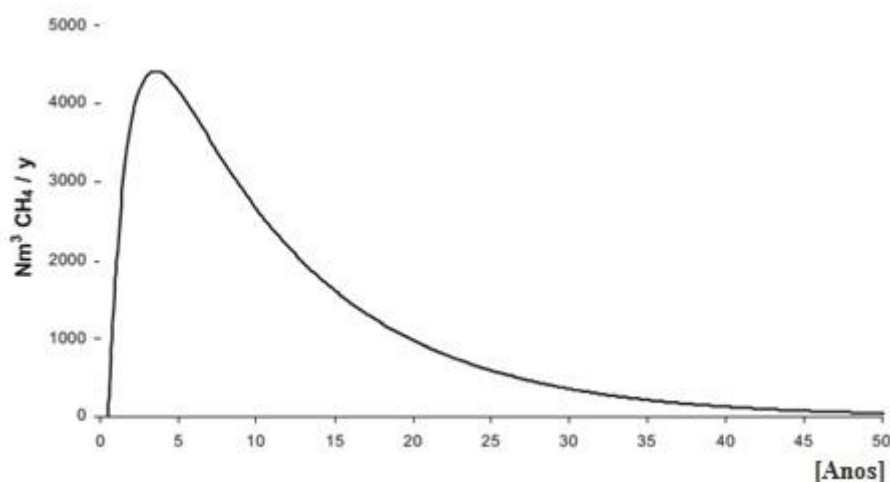


Figura 7. Produção de metano instantânea $Y(\tau)$ de acordo com modelo Swana (Staub *et al*, 2011).

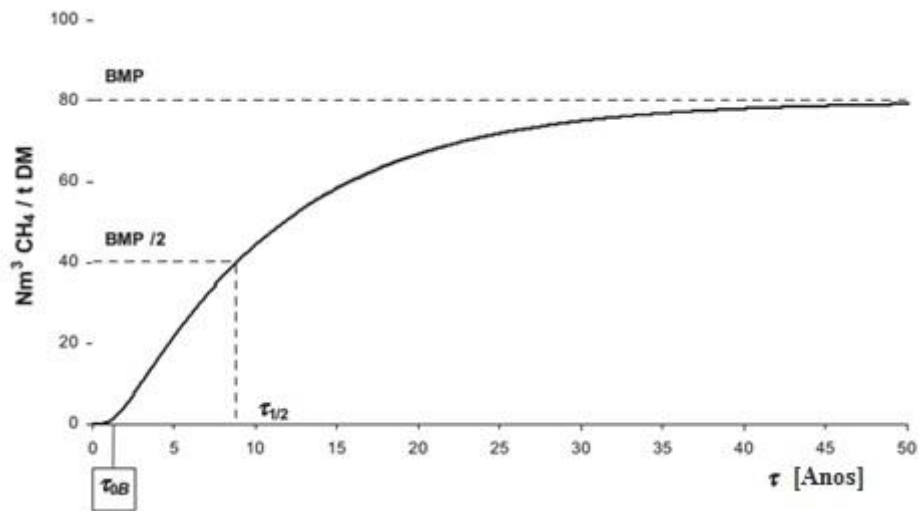


Figura 8. Produção de metano acumulada em mil toneladas de resíduo seco, de acordo com modelo Swana (Staub *et al*, 2011).

LandGEM®

Dentro dos muitos modelos de primeira ordem, destaca-se o LandGEM®, criado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA, 2005). Um dos fatores que contribuíram para a difusão desse modelo foi uma ferramenta desenvolvida para realizar o cálculo, que consiste em um software gratuito disponível na página de internet da agência, ilustrado na Figura 9. Esse modelo determina a massa de metano gerado utilizando a capacidade de geração de metano e da massa de resíduos depositados, seguindo a Equação 15.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0}^1 k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{M_i}{10}\right) \cdot (e^{-kt_{ij}}) \quad (15)$$

Onde:

- Q_{CH_4} é a geração de metano anual no ano de cálculo (m³ ano⁻¹)
- k é a constante de decaimento (0,04 ano⁻¹)
- L_0 é o potencial de geração de metano (100 m³ Mgrsu⁻¹)
- M_i é a massa de resíduo no iésimo ano (Mg)
- t_{ij} é a idade da jésima seção de massa de resíduo M_i aceita no iésimo ano.

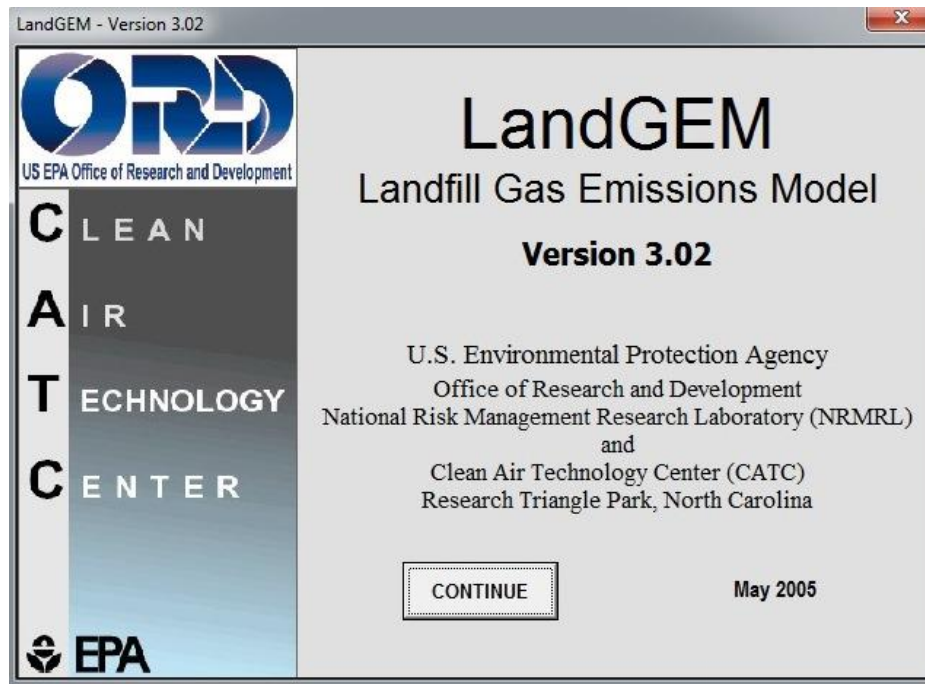


Figura 9. Software LangGEM® – Landfill Gas Emissions Model (USEPA, 2005).

Biogás

A CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo) desenvolveu um software para dimensionar a produção de metano em aterros, biodigestores, além de outras funções, chamado Biogás – Geração e Uso Energético (CETESB, 2006a). O software é livre e passível de alterações no código fonte, o que permite aos usuários ajustarem parâmetros de acordo com suas necessidades, remetendo as informações para o órgão desenvolvedor que pode incorporá-los à novas versões do software. A figura 10 e a equação 16 ilustram a interface do programa e a equação de produção de biogás para aterros, enquanto a figura 11 e a equação 17 o fazem para efluentes e resíduos rurais.

$$Q_{CH_4} = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(x-T)} \quad (16)$$

Onde:

Q_{CH_4} é a vazão de metano anual no ano de cálculo	[m ³ ano ⁻¹]
k é a constante de decaimento	[0,04 ano ⁻¹]
R_x é o fluxo de resíduos no ano x	[kg _{RSU}]
L_0 é o potencial de geração de metano	[m ³ kg _{RSU} ⁻¹]
T é o ano de deposição do resíduo no aterro	[ano]
x é o ano atual	[ano]

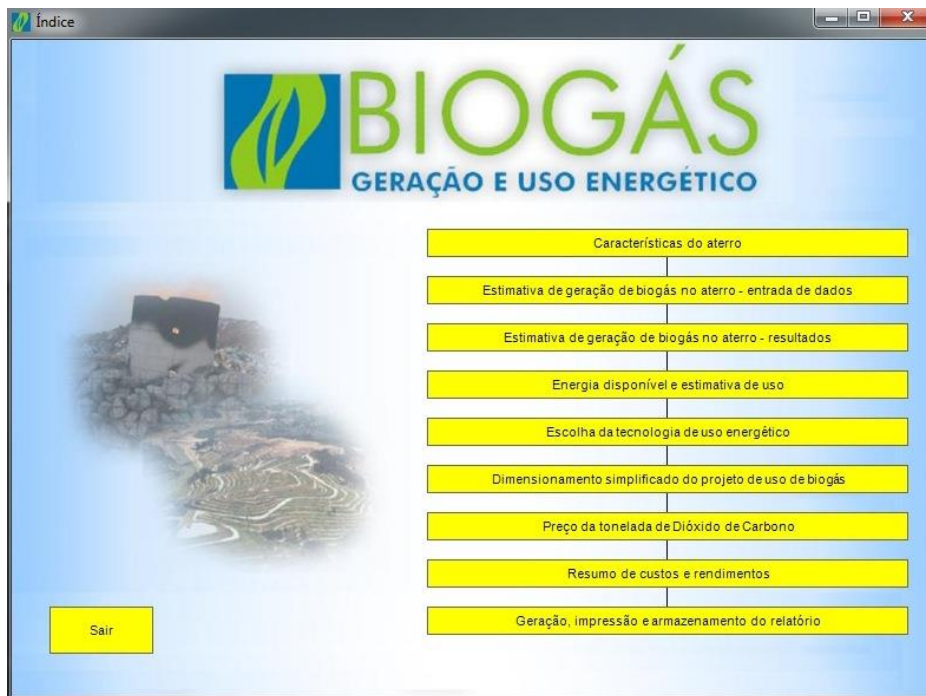


Figura 10. Software Biogás Aterro – Geração e Uso Energético (CETESB, 2006a).

$$Q_i = 30 \cdot VE^{-1} \cdot \sum (Pb_i \cdot Conc_i \cdot Qt_i \cdot Mt_i) \quad (17)$$

Onde:

Q_i é a vazão de metano por mês	[m ³ CH ₄ /mês]
30 é o número de dias por mês	[dia/mês]
VE é o volume específico do metano	[kgCH ₄ /m ³ CH ₄]
Pb é a produção de biogás	[kgbiogás/kgMt]
Conc é a concentração de metano no biogás	[%]
Qt é a quantidade de unidades geradoras de efluente	[unidade geradora]
Mt é a matéria total	[kgMt/(dia. un. geradora)]



Figura 11. Software Biogás Efluentes – Geração e Uso Energético (CETESB, 2006a).

3.3.3. Recuperação em células de aterro

Como é possível observar na Figura 12, uma parcela do gás produzido no interior da célula de aterro “foge” pela camada de cobertura, mesmo com um sistema de coleta do gás, devido à permeabilidade do solo (normalmente argila) aplicado para cobrir e isolar os resíduos do contato com o ar. Durante esse processo de fuga, uma parcela do metano presente no gás sofre oxidação e é transformado em gás carbônico devido ação de microrganismos. Essa parcela do metano fugitivo convertida em gás carbônico é muito pequena, restando uma grande quantidade de CH_4 no gás, que é emitido para a atmosfera.

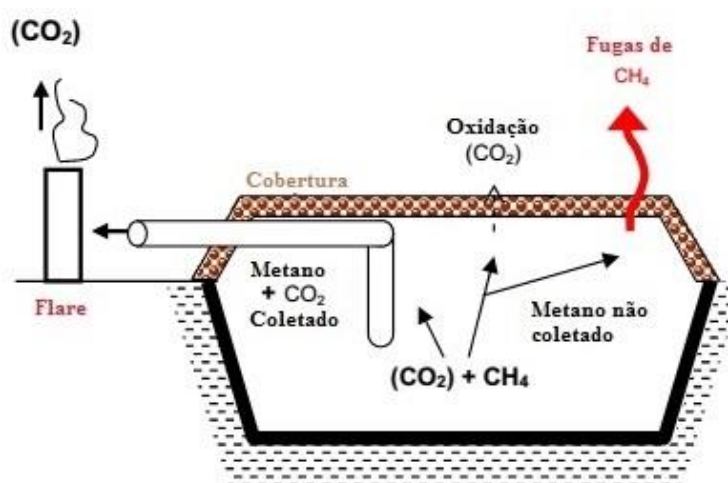


Figura 12. Esquemático do fluxo de gases em célula de aterro com recuperação de gás (Adaptado de Staub *et al*, 2011).

Visando a reduzir as fugas de biogás e conseqüentemente de CH₄, diversas soluções são estudadas e desenvolvidas, as principais consistem em melhorar a capacidade de coleta de gás pelos drenos e a aplicação de diversos tipos de coberturas para a célula de aterro, variando materiais e configurações, assim como exposto por Staub *et al* (2011).

Novos materiais sempre são alvo de publicações com foco na melhoria da camada de cobertura, e grandes avanços com relação à captura de gás vêm sendo mostrados, como em Chen (2011) usando geomembranas de polietileno de alta densidade, por exemplo.

Um dos fatores usados para certificar a recuperação de metano em aterros é o rendimento da recuperação. Ele é importante para avaliar se as perdas por fugas estão dentro de parâmetros impostos por órgãos regulamentadores, por exemplo, assim como para analisar a viabilidade do uso do biogás na geração de energia elétrica ou calor. Di Bella *et al* (2011) expõem a equação geral de balanço de massa para emissões de metano (18).

$$E = P - R - O \quad (18)$$

Sendo *E* as emissões difusas de metano pela superfície do aterro, *P* a produção de metano oriunda da digestão anaeróbia, *R* o total de metano recuperado nos coletores de gás do aterro, e por fim, *O* a quantidade de metano que oxidou ao transpor a superfície do aterro.

A Tabela 8, traz valores de rendimentos de aterros de acordo com alguns autores da literatura. Eles levantaram os rendimentos em localidades distintas, assim como particularidades distintas também (tipo de cobertura, estação do ano, configuração de dutos, tempos de medição e métodos matemáticos para estimar a produção de CH₄).

Tabela 8. Valores de recuperação de CH₄ segundo autores.

Autor	Recuperação	Fuga	Oxidação
Spokas <i>et al</i> (2006)	40,9-98,1%	1,9-59,1%	2,5-28,0%
Staub <i>et al</i> (2011)	50,0-90,0%	10,0-50,0%	0,0-20,0%
Di Trapani <i>et al</i> (2013)	79,5-88,4%	11,6-20,5%	10,0%
Di Bella <i>et al</i> (2011)	78,4-79,5%	20,5-21,6%	10,0-20,0%
Maciel & Jucá (2011)	41,4%	58,6%	20,0%

3.4. Aproveitamento energético do biogás

Somando a necessidade de atender às medidas de proteção ambiental aos estudos em busca de fontes de energias renováveis, o aproveitamento energético do biogás tem sido amplamente estudado por diversos países como Brasil, Itália, Espanha, Estados Unidos,

Malásia, entre outros (Caresana *et al*, 2011; Hosseini & Wahid, 2013; Oliveira *et al*, 2010; Surendra *et al*, 2014; Zamorano *et al*, 2007).

Como mencionado no capítulo 3.3.1., o biogás apresenta grande potencial energético, principalmente devido ao metano, que é o gás de maior concentração em sua composição, e pode ser usado para diversos fins energéticos, como geração de energia elétrica, calor e abastecimento de veículos, por exemplo. Porém junto com o metano estão outros gases que, além de não contribuírem energeticamente, são nocivos ao meio ambiente e aos equipamentos que lidam com o biogás. Para sanar, ou pelo menos amenizar, os efeitos negativos desses gases, é necessário um procedimento de limpeza e/ou purificação do biogás, como é descrito na seção 3.4.1.

3.4.1. Limpeza e purificação do biogás

Como observado por Hosseini & Wahid (2013), geralmente o biogás coletado é tratado e purificado, removendo, por exemplo, vapor d'água que foi condensado e sulfetos. Isso é feito de acordo com a composição do biogás coletado assim como sua finalidade e pré-requisitos de utilização em equipamentos (motores, células de bombustível, caldeiras, etc) como resalta Osorio & Torres (2009), eliminando impurezas de baixo poder calorífico como dióxido de carbono, e prejudiciais à saúde humana e aos equipamentos, como o ácido sulfídrico, que é tóxico ao inalar e causa corrosão, de acordo com Iovane *et al* (2014).

Segundo Yan *et al* (2014), as quatro técnicas geralmente utilizadas para purificar o biogás consiste em absorção química, lavagem com água, separação por membranas e adsorção por oscilação de pressão.

Xiao *et al* (2014), afirmam que absorção com soluções amino-orgânicas são altamente eficientes (para eliminação de CO₂), embora a regeneração da solução normalmente envolva um grande consumo energético e alto potencial corrosivo, o que não é ambientalmente favorável.

No caso de separação por membranas, Dolejš *et al* (2014), levantam que essa é uma técnica competitiva comercialmente com as demais tecnologias convencionais para remoção simultânea de CO₂ e H₂S, pelo menos no que diz respeito às membranas poliméricas. Demais membranas sofrem danos devido a gases agressivos, e é necessário pré tratar o biogás removendo vapor d'água e compostos potencialmente perigosos como sulfeto de hidrogênio, amônia e siloxanos.

Procedimentos que envolvem adsorção na eliminação de CO₂, apesar de não envolverem poluição ambiental e corrosão de equipamentos, possuem altos custos de operação e equipamentos complexos, o que limita sua aplicação segundo Xiao *et al* (2014).

Tabela 9. Vantagens e desvantagens das principais técnicas de remoção de H₂S

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Precipitação físico-química	Viável para substratos processados com altas concentrações de enxofre. Baixo custo. Sem necessidade de investimentos (fácil aplicação em plantas de digestão anaeróbia existentes).	Necessário conhecimento prévio da quantidade de enxofre presente no substrato processado. Difícil controlar o grau de dessulfurização. Não é possível aplicar medidas proativas.
Adsorção de hidróxido ou óxidos metálicos	Viável para substratos processados com altas concentrações de enxofre. Possível remover mercaptanas.	Necessário conhecimento prévio da quantidade de enxofre presente no substrato processado. Regeneração de custo elevado. Sensível à água.
Dessulfurização biológica interna	Baixo custo. Necessita de baixo investimento (fácil aplicação em plantas de digestão anaeróbia existentes).	Necessita de adaptação para flutuação de H ₂ S no biogás. Não se adapta em altas concentrações de H ₂ S. Excesso de O ₂ /N ₂ no biogás pode causar dificuldades nos próximos estágios de purificação.
Filtros biológicos	Custo baixo e de simples operação e manutenção.	Necessita de adaptação para flutuação de H ₂ S no biogás. Não se adapta em altas concentrações de H ₂ S. Excesso de O ₂ /N ₂ no biogás pode causar dificuldades nos próximos estágios de purificação.
Adsorção química	Pode ser usada com média ou alta concentração de enxofre no biogás. Pode ser usada com moderada ou alta concentração de flutuações de H ₂ S. Alta remoção de H ₂ S.	Operação complexa com necessidade de conhecimento em uso de agentes químicos. Provável presença de O ₂ /N ₂ no biogás pode causar dificuldades nos próximos estágios de purificação.
Adsorção física	Também remove CO ₂ . Boa remoção de H ₂ S. Não necessita compressão; o biogás já está na condição de produzir biometano em pressão de entrega.	Alto custo: Altas pressões e baixas temperaturas. Provável presença de O ₂ /N ₂ no biogás pode causar dificuldades nos próximos estágios de purificação.
Adsorção por carbono ativado	Alta eficiência na remoção de H ₂ S. Poucos condicionais de processo.	Alto custo: Altas pressões e baixas temperaturas. Provável presença de O ₂ /N ₂ no biogás pode causar dificuldades nos próximos estágios de purificação. Regeneração a 450°C. Formação de oxidação da água pode obstruir poros desabilitando o carbono ativado.
Separação por membranas	Também remove CO ₂ . Não necessita compressão; o biogás já está na condição de produzir biometano em pressão de entrega.	Problemas com média ou alta concentração de H ₂ S. Alto custo: Altas pressões e baixas temperaturas. Provável presença de O ₂ /N ₂ no biogás pode causar dificuldades nos próximos estágios de purificação.

Fonte: Iovane *et al* (2014).

Os autores ainda descrevem o processo de lavagem com água como um dos mais vantajosos para absorção de CO₂, uma vez que ao utilizar água como absorvente, possui baixo custo, alta estabilidade e segurança, além de ser ambientalmente menos prejudicial.

Para o tratamento que visa a eliminar especificamente H₂S, Iovane *et al* (2014) levantou diversas técnicas, assim como suas principais vantagens e desvantagens. Na Tabela 9, estão os principais pontos levantados pelos autores.

3.4.2. Técnicas de conversão de energia

Existem diversas formas de converter a energia do biogás, para usos distintos como geração de calor, eletricidade, abastecimento de veículos, etc. De acordo com Caresana *et al* (2011), o uso de motores de combustão interna (MCI) é a tecnologia mais empregada para recuperação de energia a partir de biogás de aterro, e embora outras tecnologias também sejam usadas para essa finalidade, como turbinas a gás, turbinas a vapor e até mesmo células combustíveis, os MCI ainda são as alternativas mais economicamente viáveis, ficando à frente de turbinas, principalmente para pequenas plantas de geração. Nesse trabalho são tratadas as técnicas mais comumente aplicadas de acordo com a viabilidade econômica, sendo elas os MCI e Turbinas a gás, como visto nos trabalhos de Zamorano *et al* (2007), Desideri *et al* (2003), Oliveira *et al* (2010), Kang *et al* (2012), J. Y. Kang *et al* (2014), Caresana *et al* (2011), Khan *et al* (2014), entre outros.

Baseando-se em Brunetti (2012), podem-se definir, de forma simplificada, os motores de combustão interna (MCI) como sendo aqueles onde o fluido de trabalho consiste nos produtos da combustão da mistura de ar/combustível, nesse caso ar/biogás. As turbinas a gás, por sua vez, usam o gás resultante da combustão como fluido de trabalho, onde o combustível nesse estudo, é o biogás.

Quando aplicados MCI, os mais comumente usados são de ciclo Diesel ou ciclo Otto, sendo eles adaptados ou não para trabalharem com biogás, como verificado em estudos semelhantes aos de Surata *et al* (2014) e Yingjian *et al* (2014), por exemplo. Também existem pesquisas que procuram formas de aplicar o biogás em sistemas bicompostíveis, que o misturam a diesel ou biodiesel, adaptando os motores para tal finalidade, como se encontra nos trabalhos de Barik & Murugan (2014) e Yoon & Lee (2011). As principais diferenças entre esses dois tipos de ciclo são com relação ao tipo de combustível, ignição, admissão de combustível, controle de rotação, e taxas de compressão, como está representado na Tabela 10.

Tabela 10. Diferenças entre motores de ciclo Diesel e Otto.

	Otto	Diesel
Admissão de combustível	Carburacão Injeção	Injeção
Controle de rotação	Mistura Ar/Combustível	Combustível
Ignição	Fonte externa	Auto ignição
Taxa de compressão	6 a 9 – Gasolina 9 a 14 – Etanol	14 a 22
Tipo de combustível	Leves	Pesados

Fonte: adaptado de Brunetti (2012).

Quando se trata de motores, um fator muito importante do ponto de vista energético e econômico é o rendimento de conversão do mesmo, pois assim é possível comparar as diversas alternativas em busca da solução que atenda aos parâmetros do projeto. Para a conversão de energia proveniente do biogás em elétrica o rendimento é a relação entre a saída e a entrada, ou seja, a energia elétrica total gerada sobre a energia total consumida na forma de biogás. Encontram-se diversos valores de rendimentos elétricos na literatura, a Tabela 11 contém alguns desses valores como referência para MCI, enquanto a Tabela 12 o faz para Turbinas.

Tabela 11. Rendimentos elétricos de MCI de acordo com a literatura.

Autor	Rendimento Elétrico [%]	Particularidade
Caresana <i>et al</i> (2011)	37,7	Motor de 716 kW
Yingjian <i>et al</i> (2014)	28,45	-
Mambeli Barros <i>et al</i> (2014)	33,0	Motor ciclo Otto
Oliveira <i>et al</i> (2010)	30,0	-

Uma vez definida a técnica usada para conversão energética do biogás, os cálculos da potência disponível por ano, e conseqüentemente da energia, são dados pelas equações 19 e 20, adaptadas do software Biogás (CETESB, 2006a).

Tabela 12. Rendimentos elétricos de Turbinas a gás de acordo com a literatura.

Autor	Rendimento Elétrico [%]	Particularidade
Caresana <i>et al</i> (2011)	27,0	Microturbina de 100 kW
Nikpey Somehsaraei <i>et al</i> (2014)	30,0	Microturbina de 100 kW
D. W. Kang <i>et al</i> (2012)	31,92	Ciclo Simples a 15°C
	36,81	Ciclo Recuperativo a 15°C
J. Y. Kang <i>et al</i> (2014)	31,1	Combinado Calor Eletricidade, turbina 5 MW
	38,0	Ciclo Combinado, turbina de 5 MW

$$P_d = Q_g \cdot PCi \cdot \eta \cdot E_r \quad (19)$$

$$E_d = P_d \cdot 8760 \quad (20)$$

Sendo:

P_d a potência disponível por ano	[kW]
Q_g a vazão anual de metano	[m ³ /ano]
PCi o poder calorífico inferior do metano	[J/m ³]
η o rendimento da conversão energética de acordo com a tecnologia escolhida	[%]
E_r a eficiência de recuperação do gás de aterro	[%]
E_d a energia disponível por ano	[kWh]

3.4.3. Custos de implantação e operação

Fator decisivo de um projeto, o custo sempre é parte sensível de uma análise de viabilidade técnico-econômica de implantação e operação. Uma relação de custos é apresentada de acordo com dados encontrados na literatura (tabelas 13 e 14). Vale constar que os trabalhos referenciados datam de períodos próximos à confecção desse estudo, para evitar deturpações de cunho monetário, uma vez que valores econômicos sofrem constantes alterações, devido diversos fatores como inflação, taxas de juros, câmbio, entre outras.

Nos custos de implantação estão inclusos gastos com projetos e equipamentos para instalação da planta de geração de energia a partir de biogás, enquanto nos custos de operação estão inclusos gastos com manutenção e funcionamento da planta. A Tabela 13 apresenta valores, encontrados na literatura, referentes aos custos relacionados à aplicação de projetos usando MCI, enquanto a Tabela 14 o faz para projetos usando Turbinas a gás.

A diferença discrepante entre os custos dos grupos geradores da Tabela 14 são devido à capacidade de geração de energia elétrica de cada planta, sendo no trabalho de J. Y. Kang *et al* (2014), uma usina com capacidade de 5MW empregando grandes turbinas, enquanto em Caresana *et al* (2011), a usina atende à 600kW empregando 6 microturbinas de 100kW. A diferença de três anos entre os trabalhos também pode estar relacionada à diferença acentuada entre os custos encontrados, tanto para MCI, quanto turbinas.

Tabela 13. Custos de implantação e operação de plantas termoelétricas a partir de biogás aplicando MCI, de acordo com a literatura

Autor	Implantação	Operação	Origem do biogás
Mambeli Barros <i>et al</i> (2014) ^a	Grupo gerador	Não informado	Aterro Sanitário
	Incinerador	783,82 US\$/kW	
	Gasoduto	156.764,65 US\$/unidade	
	Gasômetro	195,96 US\$/m	
	Compressão	70,55 US\$/m ³	
	Tratamento	391,91 US\$/m ³	
	Coletores	0,0165 US\$/m ³	
Khan <i>et al</i> (2014) ^b	Grupo gerador	783,82 US\$/unidade	
	Válvulas e encanamento	675,00 US\$/kW	
	Tratamento	62,50 US\$/kW	
	Sistema de proteção e controle	15,00 US\$/kW	
	Gasoduto	70,00 US\$/kW	
		130,00 US\$/kW	0,042 US\$/kWh
Caresana <i>et al</i> (2011) ^c	Grupo gerador	698,32 €/kW	
	Sistema de captura	418,99 €/kW	0,006 €/kWh
	Sistema de extração	279,32 €/kW	0,021 €/kWh
	Projeto	139,66 €/kW	Gerenciamento Manutenção

^a O ano de referência da moeda é 2012

^b O ano de referência da moeda é 2013

^c O ano de referência da moeda é 2008

Tabela 14. Custos de implantação e operação de plantas termoeletricas a partir de biogás aplicando Turbinas a gás, de acordo com a literatura

Autor	Implantação	Operação	Origem do biogás
J. Y. Kang <i>et al</i> (2014) ^a	Grupo gerador	576,40 US\$/kW	0,006 US\$/kWh
	Operação e manutenção		Biodigestor
Caresana <i>et al</i> (2011) ^b	Tratamento e compressão	403,60 US\$/kW	
	Projeto, licenças, inspeções, instalação e despesas eventuais	965,96 US\$/kW	
	Grupo gerador	1100,00 €/kW	0,006 €/kWh
	Sistema de captura	500,00 €/kW	0,014 €/kWh
	Sistema de extração	333,33 €/kW	
	Projeto	166,67 €/kW	

^a O ano de referência da moeda é 2012

^b O ano de referência da moeda é 2008

3.4.4. Seleção da Potência de Operação

Diferentemente de fontes combustíveis de abastecimento constante, como termoelétricas a gás natural, carvão, diesel e outras fontes, o biogás de aterro sanitário apesar de renovável limita-se ao tempo de vida útil de um aterro, e o máximo valor de produção equivale ao último ano de deposição de resíduo, pois após isso, o aterro é encerrado e a produção decai de acordo com a curva da Figura 7. Sendo assim, é necessário dimensionar a potência de aproveitamento de acordo com a relação entre máxima potência (retângulo P2) e maior tempo de operação da termoelétrica (retângulo P1), como pode-se observar na figura 13.

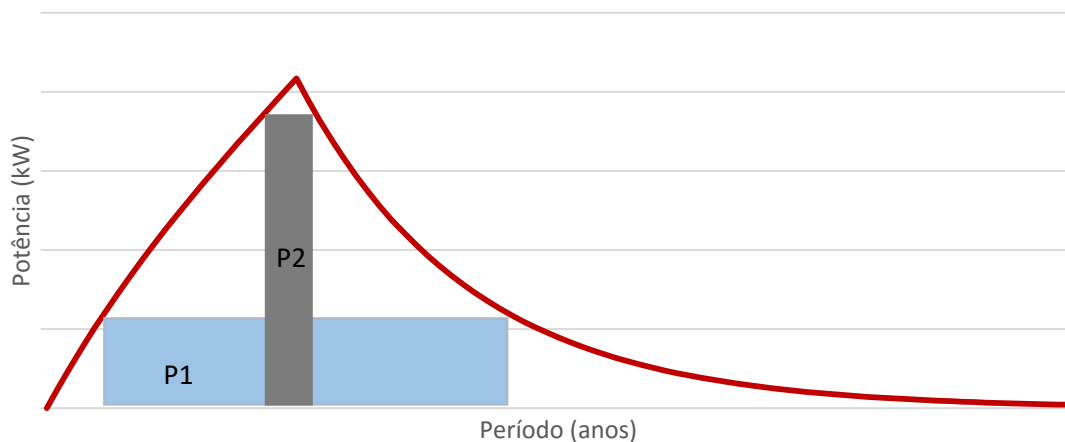


Figura 13. Relação Potência Máxima X Tempo Máximo de operação de acordo com o aproveitamento da potência gerada a partir do biogás de aterro. Adaptado de Santos *et al* (2015).

Estudos realizados por Santos *et al* (2015), chegaram a um ponto ótimo de aproveitamento do potencial de geração seguindo a relação potência máxima *versus* tempo máximo de operação. De acordo com os autores, ao final dos estudos, para o dimensionamento de um grupo gerador a plena carga, o ponto de produção de energia equivale a 45% do potencial máximo.

Adotando uma técnica baseada no dimensionamento da potência ótima de centrais hidrelétricas, Silva (2012) aplica uma metodologia análoga desenvolvida por ele para aterros sanitários. A técnica consiste em encontrar o ponto ótimo a partir de curvas de permanência e análises econômicas.

3.4.4.1. Permanência da Potência e Energia Gerada

A curva de permanência é um histograma de frequências que representa de forma compacta todos os dados históricos de um determinado assunto, como a vazão média anual de metano, por exemplo. Uma vez que se tem a curva de permanência da vazão de metano, pode-se obter a curva de permanência para a potência, e a partir dela a energia média gerada. Para uma determinada potência instalada, a energia gerada corresponde à área (S_1) delimitada pela curva e a respectiva potência (P_1), como é possível observar na figura 14.

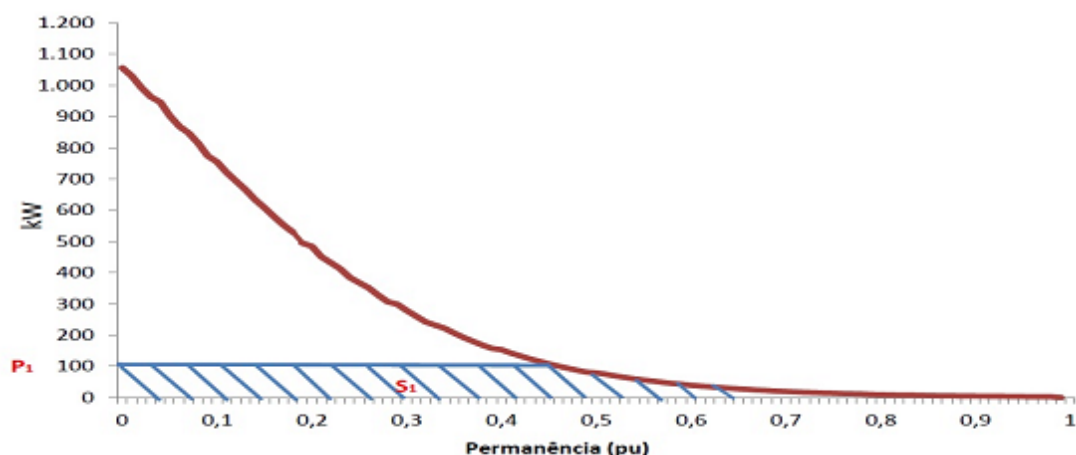


Figura 14. Exemplo da curva de permanência da potência (Silva, 2012).

A potência escolhida determina a energia de base, e qualquer potência superior a ela implicará em acréscimos na mesma, sendo calculada pelas equações 21 e 22, que basicamente são uma aproximação trapezoidal para o cálculo da área, como visto na figura 14, e seus resultados podem ser plotados graficamente como visto na figura 15, que representa um exemplo de curva da Energia Gerada pela Potência Instalada.

$$E(n + 1) = E(n) + \Delta E \quad (21)$$

$$\Delta E = 0,5 \cdot (\rho(n) + \rho(n + 1)) \cdot (P(n + 1) - P(n)) \quad (22)$$

Sendo n a ordem da potência na curva de permanência.

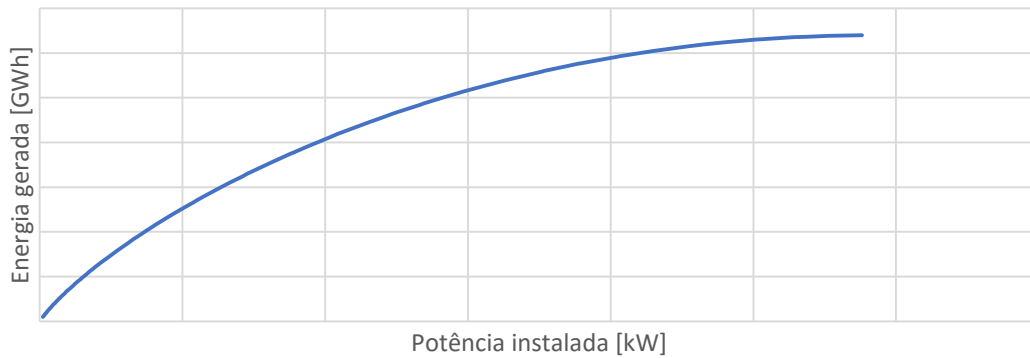


Figura 15. Exemplo de gráfico da curva de Energia Gerada pela Potência Instalada.

3.4.4.2. Análise Econômica e da Potência Ótima

Terminada a etapa de cálculo da energia gerada em função da potência instalada, é necessário realizar as análises econômicas para obter a potência ótima a ser implantada de acordo com a viabilidade econômica. Silva (2012) propõe análises que consistem em cálculos de Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e pelo Máximo Benefício Líquido (MBL). No exemplo da figura 16, uma potência instalada ótima está em torno de 600 kW, de acordo com a TIR de aproximadamente 22%.

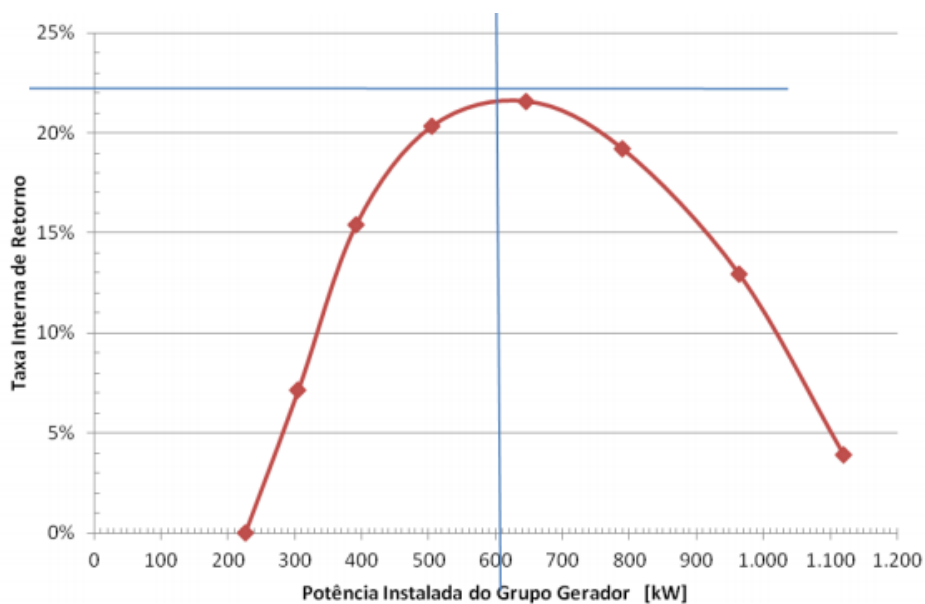


Figura 16. Exemplo da análise da potência ótima instalada de acordo com a viabilidade econômica (Silva, 2012).

Máximo Benefício Líquido.

i. Custo Total

Para determinar o custo total do grupo gerador e demais investimentos associados aplica-se a equação 23.

$$C_t = C_u \cdot P \quad (23)$$

Sendo:

C_t o custo total da central [R\$];
 C_u o custo unitário da central [R\$/kW];
 P a potência da central [kW].

ii. Custo Anual

O custo anual é calculado de acordo com as equações 24, 25 e 26.

$$C_a = C_t \cdot frc + C_{op} \quad (24)$$

Sendo:

C_a o custo anual [R\$];
 C_t o custo total da central [R\$];
 frc o fator de recuperação de capital (equação 25);
 C_{op} o custo de operação anual (equação 26) [R\$].

$$frc = \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (25)$$

Sendo:

frc o fator de recuperação de capital;
 n o tempo de vida econômica do empreendimento [anos];
 i a taxa de atratividade [%].

$$Cop = top \cdot Cuop \cdot E_m \quad (26)$$

Sendo:

Cop o custo de operação anual	[R\$];
top o tempo de operação anual	[horas];
Cuop o custo unitário de operação	[R\$/kw.h];
E _m a energia média gerada pela central	[kW.h].

iii. Benefício Anual

Para o cálculo do benefício anual aplica-se a equação 27.

$$Ba = top \cdot E_m \cdot Te \quad (27)$$

Sendo:

Ba o benefício anual	[R\$];
top o tempo de operação anual	[horas];
E _m a energia média gerada pela central	[kW.h];
Te a tarifa de venda de energia	[R\$/kW.h].

iv. Benefício Líquido

Com os valores de Benefício Anual e Custo Anual calculados é possível encontrar o Benefício Líquido pela subtração dos dois anteriores, como mostra a equação 28.

$$Bl = Ba - Ca \quad (28)$$

Sendo:

Bl o benefício líquido	[R\$];
Ba o benefício anual	[R\$];
Ca o custo anual	[R\$].

v. Critério de Motorização

Para escolher a motorização adotada no empreendimento é considerado o máximo benefício líquido, que consiste no maior retorno financeiro de acordo com a potência instalada. Para calcular o máximo benefício líquido basta igualar a primeira derivada da relação Benefício Líquido/Potência a zero, como mostra a equação 29. Fazendo isso, e seguindo o raciocínio das equações de 30 a 33, conclui-se que o máximo benefício líquido é alcançado quando a variação do Benefício Anual (∂Ba) se iguala a variação do Custo Anual (∂Ca).

$$MáxBl \rightarrow \frac{\partial Bl}{\partial P} = 0 \quad (29)$$

$$\frac{\partial Bl}{\partial P} = \frac{\partial Ba}{\partial P} - \frac{\partial Ca}{\partial P} \quad (30)$$

$$\frac{\partial Ba}{\partial P} - \frac{\partial Ca}{\partial P} = 0 \quad (31)$$

$$\frac{\partial Ba}{\partial P} = \frac{\partial Ca}{\partial P} \quad (32)$$

$$\frac{\partial Ba}{\partial Ca} = 1 \quad (33)$$

Aplicando os valores de potência obtidos constrói-se de forma iterativa uma tabela com os resultados econômicos para encontrar o melhor máximo benefício líquido.

vi. Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno – VPL e TIR

Também usando a tabela gerada de forma iterativa, calcula-se o valor presente líquido (VPL) para cada fluxo de caixa correspondente às potências selecionadas. O VPL transfere para o instante presente todos os lançamentos previstos para cada período de um fluxo de caixa compensando a taxa de juros considerada. O fluxo de caixa relaciona as entradas e saídas financeiras de um empreendimento ao longo do tempo de vida do mesmo. Quanto maior o valor do VPL, maior a atratividade do empreendimento.

Baseada no VPL, a taxa interna de retorno (TIR) corresponde à taxa de juros que zera o valor presente líquido do empreendimento, e que iguala o investimento inicial ao fluxo de caixa equivalente ao período de tempo estipulado.

4. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso apresentado é referente ao município de Itanhandu – MG, e baseia-se na avaliação técnico-econômica de uma possível implantação de sistema de geração de energia elétrica a partir de biogás. As fontes de biogás são o aterro sanitário do município e biodigestores de resíduos gerados por granjas locais, composto basicamente por fezes de aves.

De acordo com dados oficiais do município, localizada próxima a tríplice divisa entre os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo, Itanhandu abrange 143,363 km² na região sul/sudeste de Minas Gerais, em uma região de Mata Atlântica da Mantiqueira (IBGE, [s.d.]). O mapa do município é representado na figura 17.

No último censo realizado (2010), o município contava com uma população de 14.175 habitantes, e estimativa de crescimento para 15.006 no ano de 2014, refletindo 1,43% de crescimento anual, aproximadamente. Baseando-se em técnicas de projeção populacional (método de crescimento logístico), a Figura 18 mostra o perfil de crescimento do município até 2044.

Apesar de sua população de aproximadamente 14 mil habitantes, Itanhandu ocupa o 27º lugar de maior PIB agropecuário do estado (figura 19), com aproximadamente 164 milhões de Reais, segundo IBGE (2012). O maior responsável por esse resultado é o polo pecuário na produção de ovos de galinha. O município é o maior produtor do estado, com um efetivo de rebanhos galináceos em cerca de 4.080.000 de cabeças, e uma produção maior que o dobro do segundo colocado, Montes Claros, como se pode ver na figura 20 (IBGE, [s.d.]).

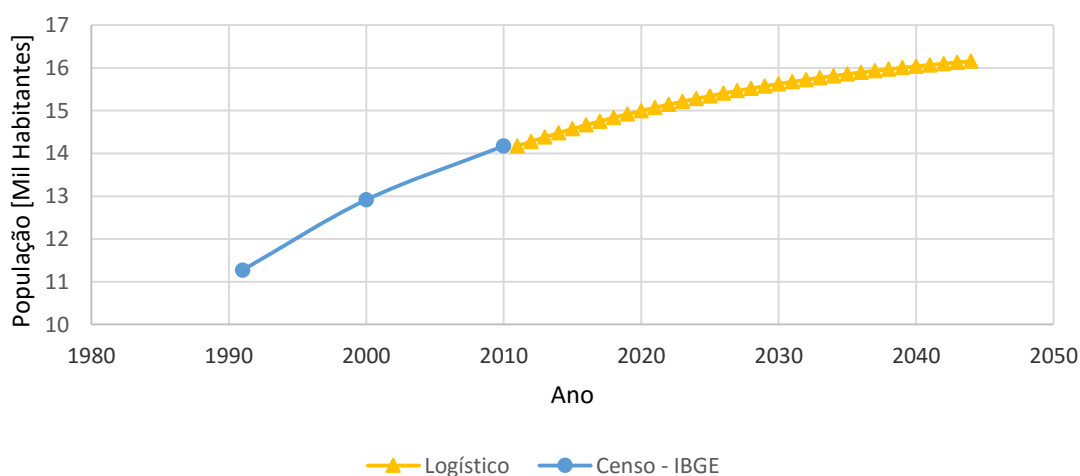


Figura 17. Projeções populacionais para o município de Itanhandu, 2011 até 2044.



Figura 18. Localização do município de Itanhandu – MG (Google Maps).

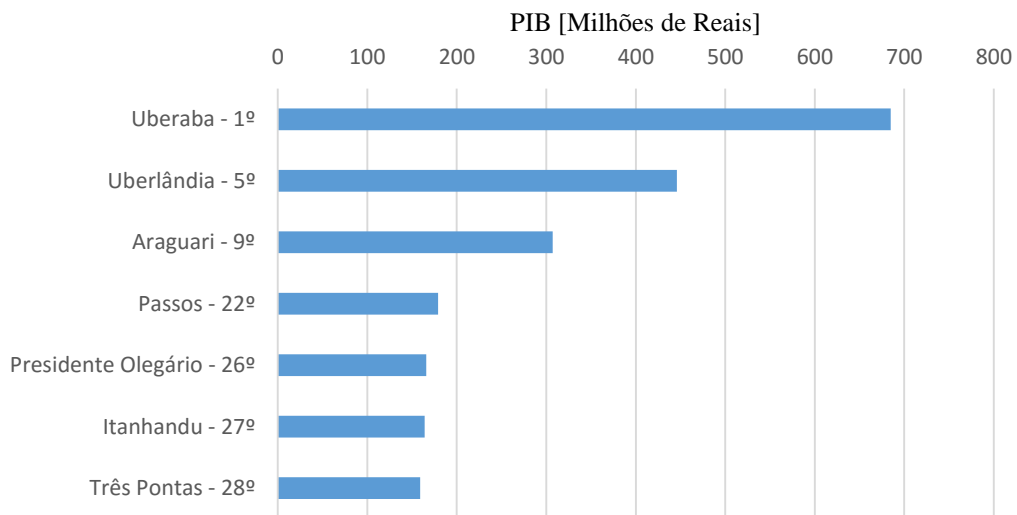


Figura 19. PIB agropecuário, em milhões de reais, de alguns municípios de MG comparados a Itanhandu segundo dados de 2012 (IBGE).

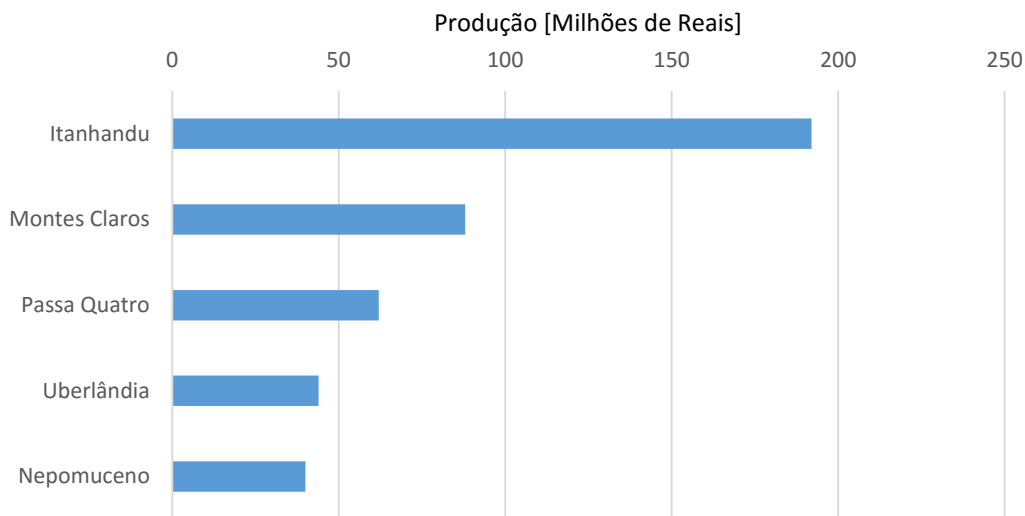


Figura 20. Produção de ovos de galinha, em milhões de reais, dos cinco maiores produtores de MG segundo dados de 2013 (IBGE).

5. MÉTODO

O estudo aqui proposto é a compilação e comparação de três análises de viabilidade de implantação de uma termoelétrica a partir de biogás para o município de Itanhandu. Em uma primeira análise (Análise I), é avaliada a técnica de geração de energia a partir de biogás do aterro sanitário do município. A segunda (Análise II) avalia a geração de energia a partir do biogás produzido pelo biodigestor com dejetos de galinha, também de forma isolada. A terceira (Análise III) consiste na avaliação das duas técnicas anteriores sendo aplicadas de forma simultânea, como uma usina termoelétrica a partir de biogás de origem mista, aterro sanitário e biodigestor de fezes galináceas.

A primeira análise começa pelo cálculo do volume de RSU gerado pelo município baseado nos dados populacionais obtidos pelo método de projeção populacional geométrico, escolhido por adotar um comportamento mais próximo do levantado em dados dos últimos censos. Uma vez obtida a previsão de resíduo gerado, é calculado o volume de biogás produzido por meio do software LandGem[®] já apresentado no capítulo 3.3.2.3. Com essas informações dimensiona-se a potência elétrica disponível para cada ano de acordo com a equação 19, para posteriormente realizar a análise desenvolvida no trabalho de Silva (2012), baseada em curvas de permanência e viabilidade econômica para determinação da potência ótima a ser instalada.

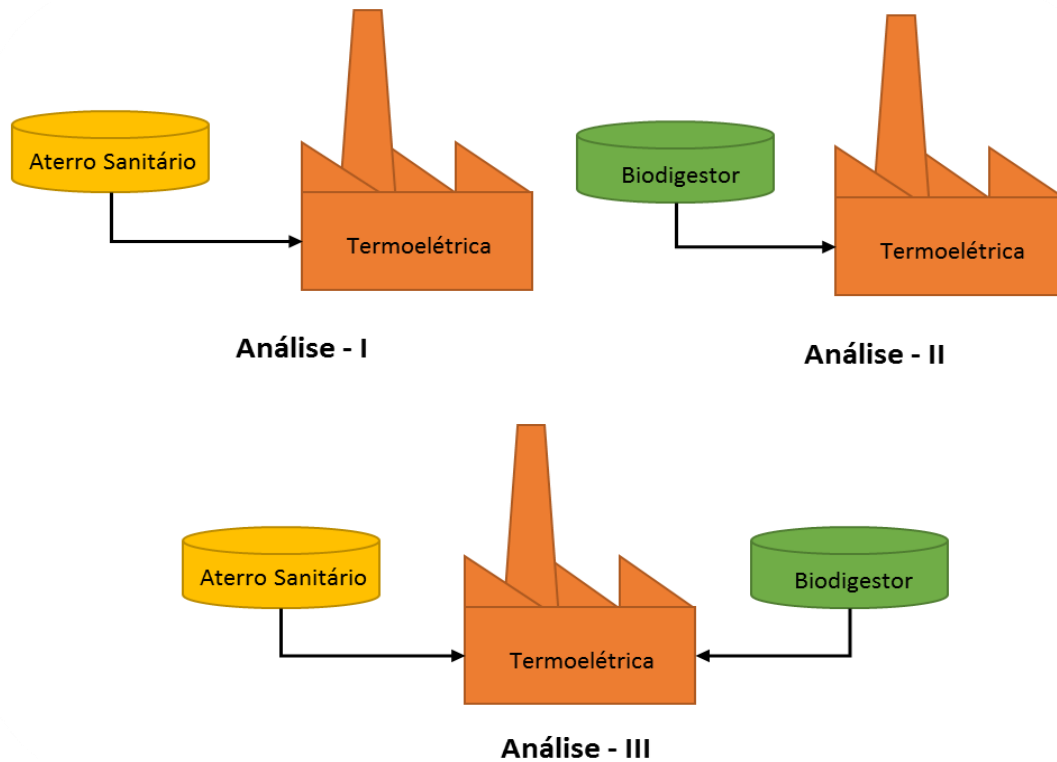


Figura 21. Esquemático das três análises realizadas no estudo.

A segunda análise, de forma análoga, parte do cálculo do volume de resíduo sólido gerado pelas granjas locais, especificamente fezes de aves, ao longo dos anos, e para isso também é necessário realizar uma projeção do rebanho de galináceos. O método adotado para essa projeção é o logístico, devido o perfil dos últimos 10 censos pecuários realizados. Com tais valores é possível dimensionar o volume de biogás gerado por meio do software Biogás - Efluentes e Resíduo Rural (CETESB, 2006), apresentado no capítulo (3.3.2.3). Com essas informações dimensiona-se a potência elétrica disponível para cada ano de acordo com a equação 19, para posteriormente realizar a análise desenvolvida no trabalho de Silva (2012), baseada em curvas de permanência e viabilidade econômica para determinação da potência ótima a ser instalada.

A terceira, e última, análise consiste na junção das duas anteriores. As estimativas de produção de biogás são realizadas separadamente, igual às análises anteriores; porém, a produção de energia, assim como a viabilidade técnica e econômica são calculadas de forma integrada, uma vez que a unidade geradora será uma só para ambas as fontes de biogás.

6. RESULTADOS E ANÁLISE

6.1. Análise I – Aterro Sanitário

Para a primeira análise foi considerada a construção de um novo aterro sanitário para o município de Itanhandu, sendo esse aterro único e atendendo somente ao município, com previsão para 20 anos de operação do projeto até o fechamento do mesmo. Informações sobre a população foram coletadas dos últimos censos realizados pelo IBGE, representados na tabela 15. Para construção da curva de projeção da população foi aplicado o modelo de crescimento logístico (equações 9 a 12), justificado pelo histórico que indicou um perfil que tende a saturação, principalmente quando comparado às taxas decrescentes de natalidade dos últimos anos (BRASIL., [s.d.]). O gráfico da figura 22 apresenta as projeções aritmética, geométrica e logística para comparação, assim como o histórico de natalidade, sendo possível observar o comportamento discrepante dos modelos aritmético e geométrico em relação ao crescimento logístico.

Tabela 15. Total de habitantes dos últimos censos (IBGE).

Ano	População Total (habitantes)
1991	11272
2000	12915
2010	14175

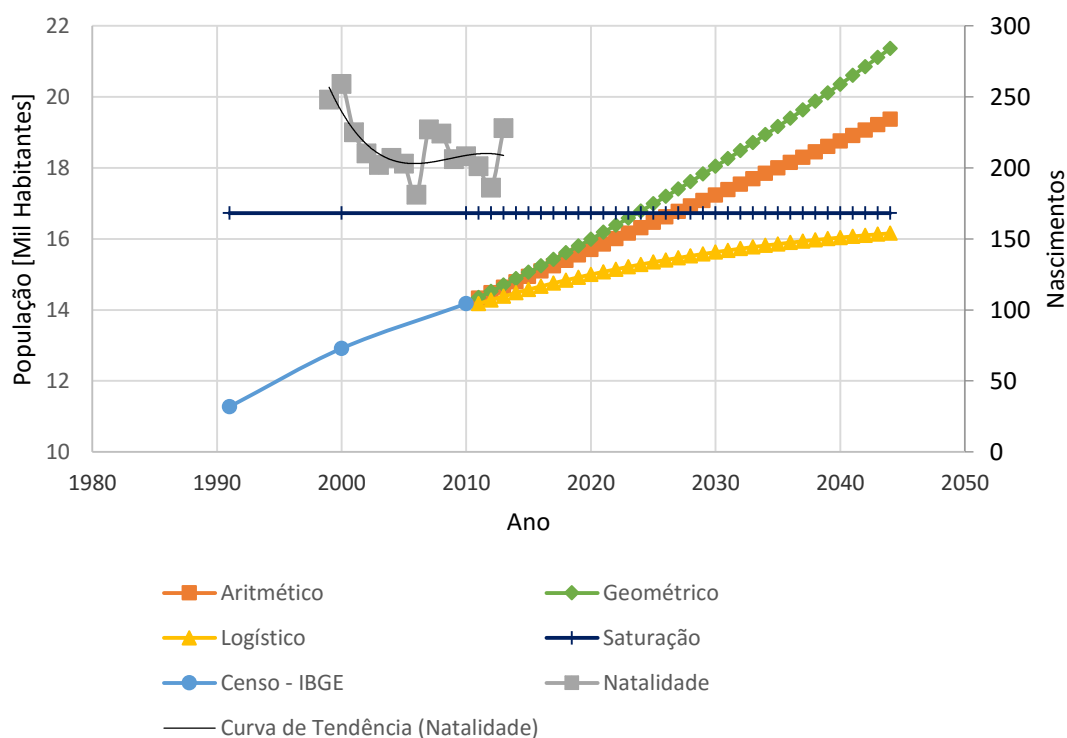


Figura 22. Projeção de habitantes de Itanhandu – comparativo de métodos.

Com a projeção de habitantes, chegou-se à massa de resíduo sólido gerado anualmente pela equação 13. A quantidade de RSU gerado *per capita* diariamente usada é de 0,810 kg/hab.dia para o estado de Minas Gerais, segundo dados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2013). Também é incrementado um crescimento de 1% ao ano, devido crescimento econômico (Barros, 2013). O Panorama da ABRELPE ainda indica um aproveitamento de coleta próximo de 90%, e dessa forma, o perfil da quantidade de resíduos destinada ao aterro é apresentada na figura 23.

Baseado no volume anual de geração de resíduo aplicou-se o modelo de estimativa da produção de biogás no aterro, e conseqüentemente de metano, necessários para o cálculo da potência disponível anualmente, descrito pela equação 19. Adotando o modelo do software LandGEM® (USEPA, 2005), e seguindo os parâmetros da tabela 16 obtiveram-se os resultados expostos no gráfico da figura 24, e apresentados na tabela 29, no anexo A.

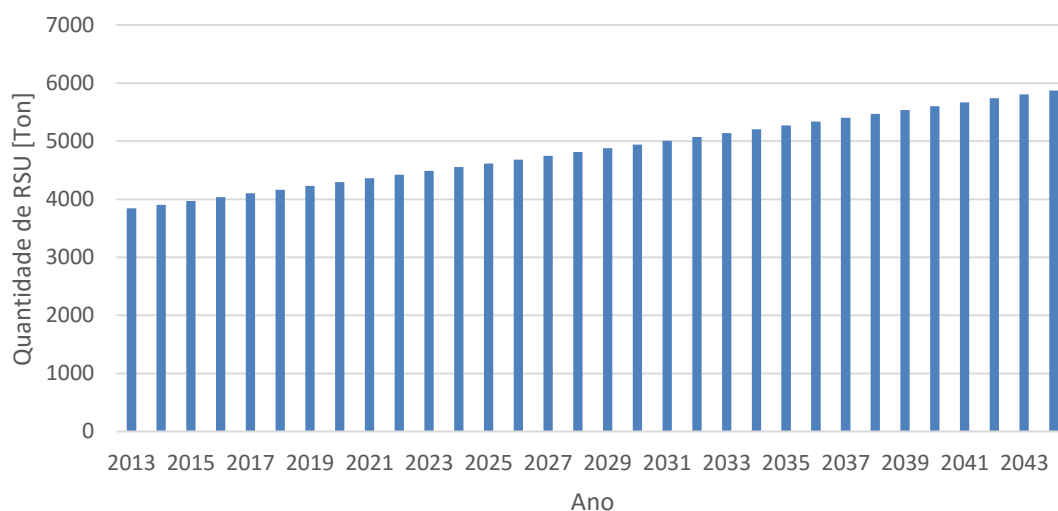


Figura 23. Estimativa da quantidade de RSU gerado por ano no município de Itanhandu.

Tabela 16. Parâmetros utilizados para o cálculo da potência disponível anualmente – Aterro de Itanhandu.

Parâmetro	Valor Adotado	Fonte
PCi - metano	35,53 MJ/m ³	CETESB (2006)
η – motor ciclo Otto	33 %	Barros (2013)
E _r – Eficiência de Recuperação	80 %	Di Trapani <i>et al</i> (2013)
L ₀ – Capacidade de produção de metano por massa de resíduo	170 m ³ /Ton	(USEPA, 2005)
k – Taxa de geração de metano	0,070	(USEPA, 2005)

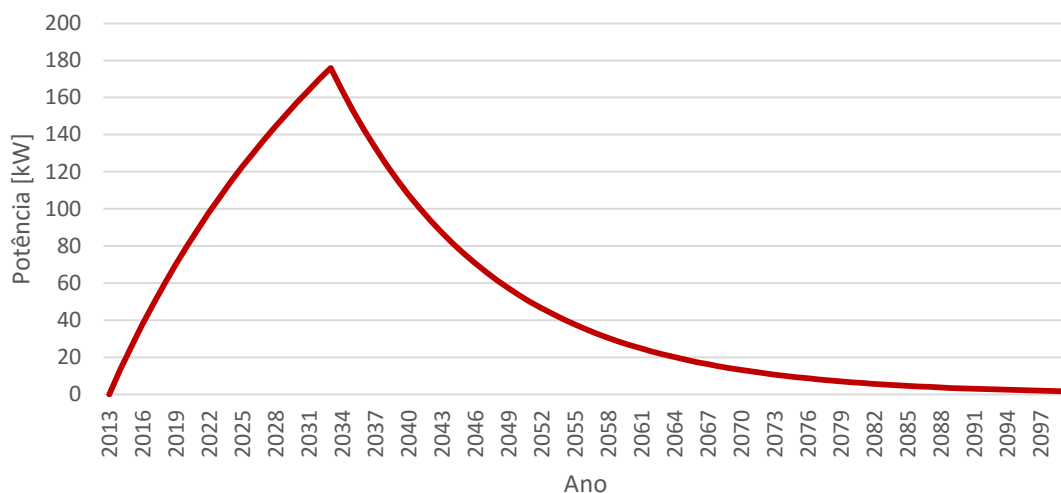


Figura 24. Potência disponível por ano - Aterro de Itanhandu.

Observa-se que a potência disponível do aterro é variável devido ao decaimento na produção de biogás, uma vez que é crescente somente durante o período de deposição de resíduo, e decrescente após o fechamento do mesmo, onde a biodigestão ocorre na massa final de RSU.

Em posse dos valores das potências disponíveis a cada ano, construiu-se a curva de permanência da potência, usada juntamente com a análise econômica para determinação da potência ótima a ser instalada.

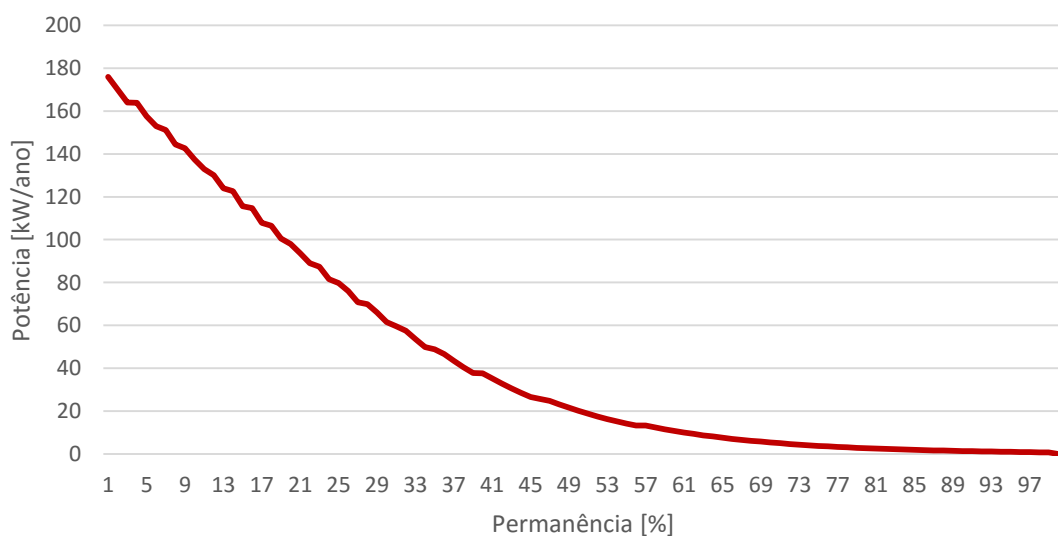


Figura 25. Curva de Permanência da potência disponível – Aterro de Itanhandu.

A partir da curva de permanência calculou-se a curva de energia gerada em função da potência instalada de acordo com as equações 21 e 22, e apresentada na figura 26. Adotou-se um funcionamento do grupo gerador de 8000 horas por ano, reservando 760 horas para rotinas de manutenção.

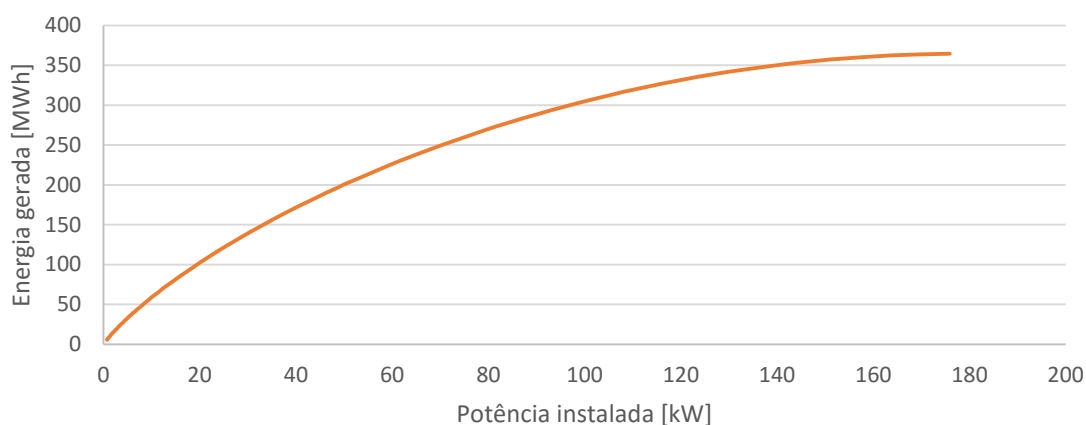


Figura 26. Energia Gerada em função da Potência Instalada – Aterro de Itanhandu.

O gráfico da figura 26 mostra que a energia tende a saturar quando chega a valores de máxima potência instalada, evidenciando que a partir de uma determinada potência a variação na geração de energia é pequena em relação a variação da potência instalada. Por isso, a necessidade de encontrar a potência ótima de operação do grupo gerador que justifique os investimentos necessários para o empreendimento.

Seguindo a análise utilizada por Silva (2012), a viabilidade econômica foi calculada pelo Máximo Benefício Líquido, VPL e TIR de acordo com diversas potências. Os dados utilizados para análise econômica estão relacionados na tabela 17, e a planilha com os cálculos de fluxo de caixa realizados estão na tabela 30 presente no anexo B.

Seguindo as equações de 23 a 33 calculou-se o benefício líquido assim como a relação das taxas do benefício e custo anuais para encontrar o máximo benefício líquido. Os resultados estão expostos na tabela 18.

Tabela 17. Parâmetros utilizados para análise econômica – Aterro de Itanhandu.

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Custo unitário de investimento (grupo gerador, sistema de captura e extração do biogás e projeto)	6336,03	R\$/kW ⁽¹⁾	Caresana <i>et al</i> (2011)
Custo unitário de operação	0,11	R\$/kW.h ⁽¹⁾	Caresana <i>et al</i> (2011)
Tarifa de venda de Energia	169,00	R\$/MW.h	EBC (2014)
Taxa mínima de atratividade	13,15	%	Banco Central do Brasil (2015)

⁽¹⁾ Valores corrigidos e atualizados pela Calculadora do Cidadão (BCB, 2015).

Os dados revelam que não existe potência instalável que convirja a um ponto ótimo de operação. A tendência indica uma possível convergência em pontos de operação que se aproximam de zero, e mesmo nesse ponto hipotético a relação entre as taxas do benefício e custos anuais não ultrapassam 0,73, que é um valor distante da relação ideal de 1,00.

Aplicando as análises de viabilidade econômica baseadas no VPL e TIR, gerou-se a tabela 19.

Os valores de VPL e TIR confirmam a inviabilidade do empreendimento com essas situações de contorno. Não houve ponto positivo de VPL ao longo da vida do projeto, evidenciando a impossibilidade de obter retorno financeiro suficiente para sequer anular os gastos com o investimento inicial, e a TIR não excede, e nem sequer se aproxima da Taxa Mínima de Atratividade para investimentos de risco (13,15%). Os gráficos das figuras 27 e 28 ilustram os resultados obtidos.

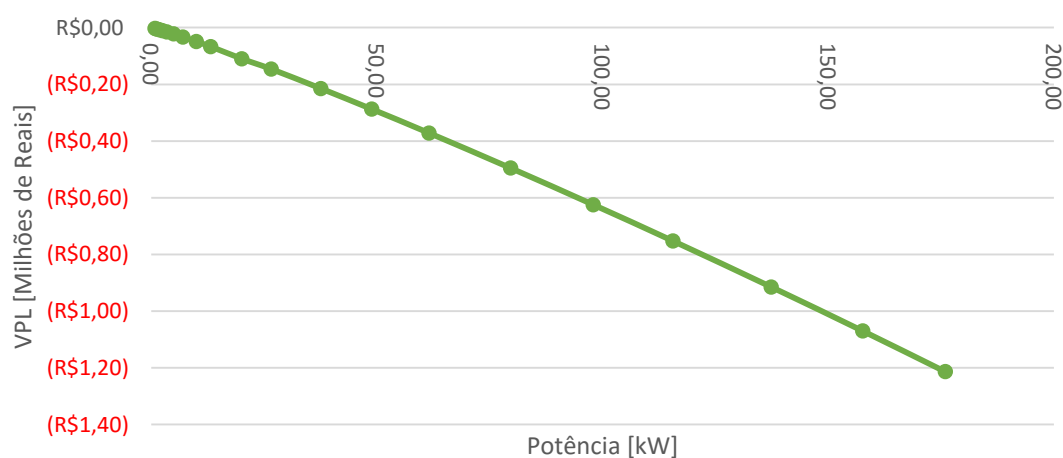


Figura 27. Valor Presente Líquido em função da Potência Adotada – Aterro de Itanhandu.

Tabela 18. Resultados do cálculo do Máximo Benefício Líquido – Aterro de Itanhandu

Permanência [%]	Potência [kW]	Energia Gerada [MW.h]	Custo Anual [R\$]	Benefício Anual [R\$]	Benefício Líquido [R\$]	ΔCa	ΔBa	ΔBa/ΔCa
1%	175,94	364,39	200203,81	61582,63	-138621,18	0	0	0
5%	157,64	360,23	183089,77	60879,19	-122210,59	17114,03	703,44	0,04
10%	137,38	348,11	163319,06	58831,39	-104487,66	19770,72	2047,79	0,10
15%	115,60	326,26	141095,48	55138,33	-85957,15	22223,57	3693,06	0,17
20%	97,94	301,60	122315,75	50970,81	-71344,95	18779,73	4167,53	0,22
25%	79,67	269,32	102129,94	45515,00	-56614,94	20185,81	5455,81	0,27
30%	61,57	229,88	81318,65	38849,20	-42469,45	20811,29	6665,80	0,32
35%	48,87	197,22	66169,26	33330,11	-32839,15	15149,39	5519,09	0,36
40%	37,57	164,03	52231,78	27720,55	-24511,23	13937,48	5609,55	0,40
45%	26,58	127,14	38175,17	21486,79	-16688,38	14056,61	6233,76	0,44
50%	20,09	97,15	28968,18	16417,60	-12550,58	9206,99	5069,19	0,55
55%	13,20	73,77	20126,68	12466,73	-7659,95	8841,50	3950,87	0,45
60%	9,98	58,73	15538,76	9925,06	-5613,69	4587,93	2541,67	0,55
65%	7,03	43,94	11231,45	7426,53	-3804,93	4307,30	2498,54	0,58
70%	4,95	32,70	8105,71	5526,89	-2578,82	3125,74	1899,63	0,61
75%	3,49	24,20	5839,31	4090,34	-1748,98	2266,40	1436,56	0,63
80%	2,46	17,80	4197,30	3009,01	-1188,29	1642,02	1081,32	0,66
85%	1,73	13,01	3008,54	2198,40	-810,15	1188,76	810,62	0,68
90%	1,22	9,43	2148,54	1592,90	-555,64	860,00	605,49	0,70
95%	0,86	6,76	1526,79	1142,07	-384,72	621,75	450,83	0,73
100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1526,79	1142,07	0,75

Tabela 19. Resultados da análise econômica por VPL e TIR – Aterro de Itanhandu

Permanência [%]	Potência [kW]	Energia Gerada [MW.h]	Custo Anual [R\$]	Benefício Anual [R\$]	Benefício Líquido [R\$]	TIR	VPL
1%	175,94	364,39	200203,81	61582,63	-138621,18	-8%	-R\$ 1.213.490,87
5%	157,64	360,23	183089,77	60879,19	-122210,59	-7%	-R\$ 1.069.832,43
10%	137,38	348,11	163319,06	58831,39	-104487,66	-6%	-R\$ 914.685,80
15%	115,60	326,26	141095,48	55138,33	-85957,15	-5%	-R\$ 752.469,54
20%	97,94	301,60	122315,75	50970,81	-71344,95	-5%	-R\$ 624.554,22
25%	79,67	269,32	102129,94	45515,00	-56614,94	-4%	-R\$ 495.607,61
30%	61,57	229,88	81318,65	38849,20	-42469,45	-3%	-R\$ 371.777,89
35%	48,87	197,22	66169,26	33330,11	-32839,15	-3%	-R\$ 287.474,18
40%	37,57	164,03	52231,78	27720,55	-24511,23	-2%	-R\$ 214.571,47
45%	26,58	127,14	38175,17	21486,79	-16688,38	-1%	-R\$ 146.090,20
50%	20,09	97,15	28968,18	16417,60	-12550,58	-1%	-R\$ 109.867,90
55%	13,20	73,77	20126,68	12466,73	-7659,95	0%	-R\$ 67.055,27
60%	9,98	58,73	15538,76	9925,06	-5613,69	1%	-R\$ 49.142,33
65%	7,03	43,94	11231,45	7426,53	-3804,93	1%	-R\$ 33.308,38
70%	4,95	32,70	8105,71	5526,89	-2578,82	2%	-R\$ 22.575,01
75%	3,49	24,20	5839,31	4090,34	-1748,98	3%	-R\$ 15.310,56
80%	2,46	17,80	4197,30	3009,01	-1188,29	3%	-R\$ 10.402,26
85%	1,73	13,01	3008,54	2198,40	-810,15	3%	-R\$ 7.092,03
90%	1,22	9,43	2148,54	1592,90	-555,64	4%	-R\$ 4.864,06
95%	0,86	6,76	1526,79	1142,07	-384,72	4%	-R\$ 3.367,83
100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		R\$ 0,00

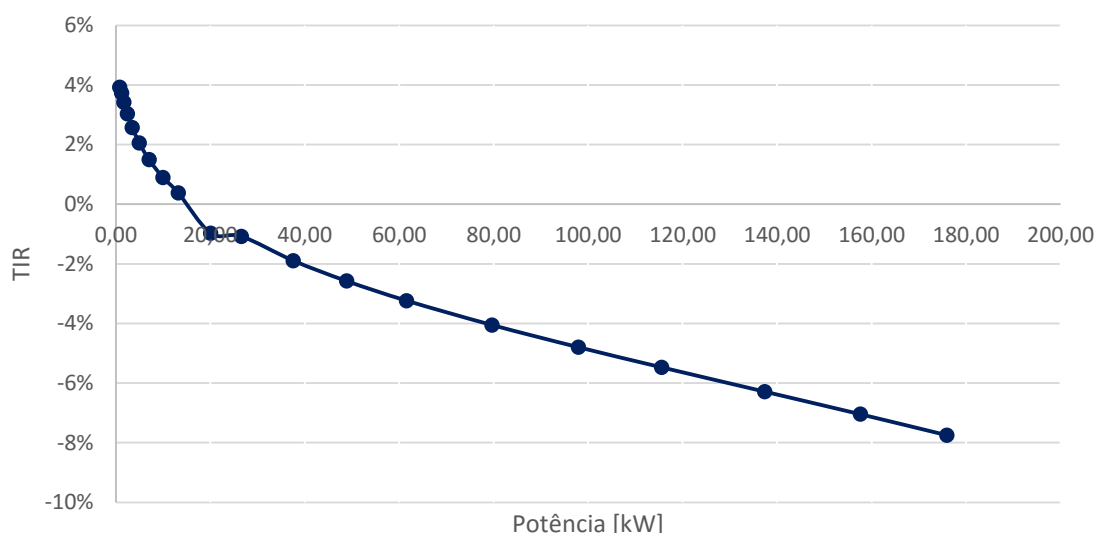


Figura 28. Taxa Interna de Retorno em função da Potência Adotada – Aterro de Itanhandu.

6.2. Análise II – Biodigestor de Resíduos Rurais (Dejetos de Galinha)

Para a segunda análise foi considerada a construção de um biodigestor de dejetos de galinha para atender aos resíduos gerados pelas granjas do município de Itanhandu somente, sendo esse biodigestor único, com previsão para 20 anos de operação do projeto, prazo esse estipulado para acompanhar o mesmo período de operação do aterro proposto na análise anterior. Informações sobre número de cabeças de galinhas foram coletadas dos últimos censos pecuários realizados pelo IBGE, representados na tabela 20. Para construção da curva de projeção da população é considerada uma taxa de crescimento baseada no desempenho econômico do setor, justificado pelo histórico que indicou um perfil que acompanha os valores médios de crescimento do PIB, como vê-se na figura 29.

Segundo projeções da Empresa de Pesquisa Energética, esperam-se taxas de crescimento do PIB nacional próximas de 4% de 2014 a 2023 (EPE, 2014), e na ausência de projeções entre 2024 e 2033, a mesma taxa é adotada para o cálculo da população de galinhas e o resultado apresentado no gráfico da figura 30.

Com a projeção de rebanhos, calculou-se o volume de metano produzido por mês por meio do software Biogás – Efluentes e Resíduo Rural (CETESB, 2006b), seguindo a equação 17, e consequentemente por ano, ao multiplicar o resultado por 12 meses. Os parâmetros de entrada para realizar os cálculos estão na tabela 21, e o perfil do volume de metano produzido anualmente é apresentado na figura 31. A tabela 31, com os valores calculados de metano e potência disponíveis estão no anexo C.

Tabela 20. Total de galinhas dos últimos censos (IBGE, [s.d.]).

Ano	População Total de Galinhas (cabeças)
2004	3.144.606
2005	3.477.983
2006	3.352.170
2007	3.542.375
2008	3.582.000
2009	3.680.794
2010	3.650.025
2011	3.625.980
2012	4.422.600
2013	4.080.000

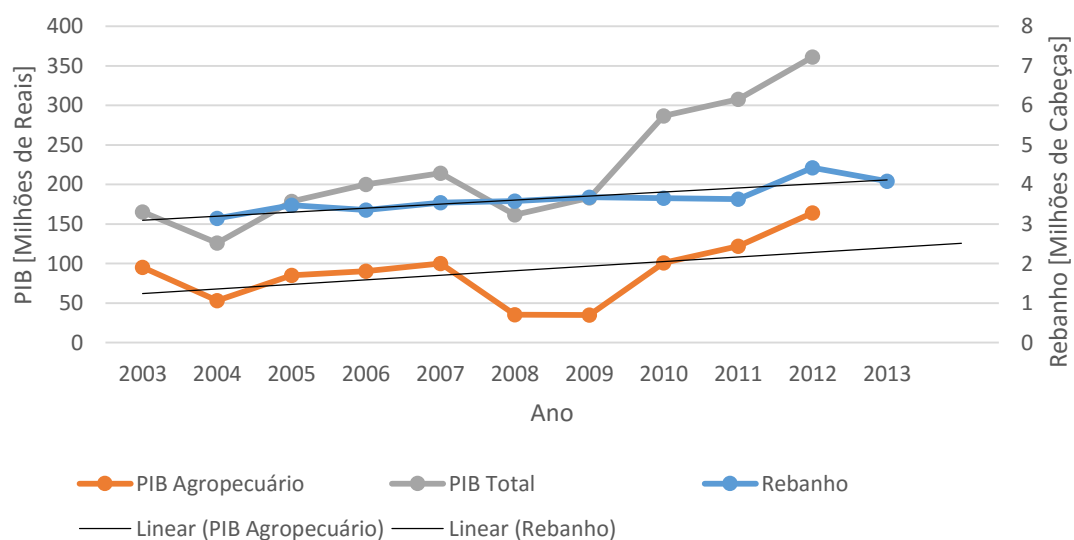


Figura 29. Histórico do rebanho de galinhas comparado ao PIB total e agropecuário – Dados referentes ao município de Itanhandu (IBGE, [s.d.]).

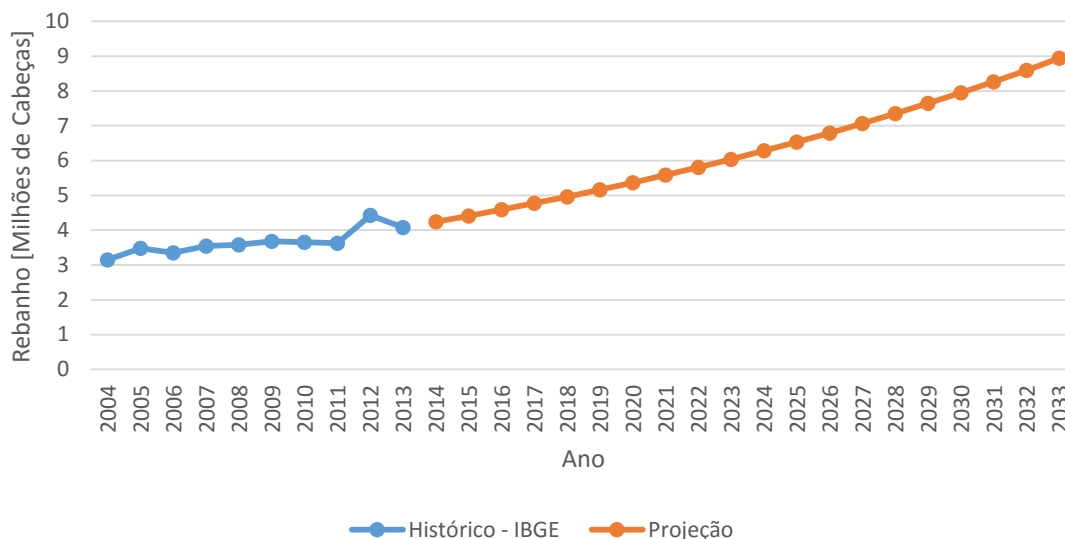


Figura 30. Projeção do rebanho de galinhas baseada na taxa de crescimento do PIB prevista.

Tabela 21. Parâmetros utilizados para dimensionamento do volume de metano produzido por mês – Biodigestor de Resíduos Rurais (CETESB, 2006b)

Parâmetro	Valor	Unidade
Volume Específico - VE	0,67	$\text{Kg}_{\text{CH}_4}/\text{m}^3_{\text{CH}_4}$
Produção de biogás - Pb	0,055	$\text{kgbiogás}/\text{kgMt}$
Concentração de metano - Conc	60	%
Matéria Total - Mt	0,18	$\text{kgMt}/(\text{dia. unidade geradora})$

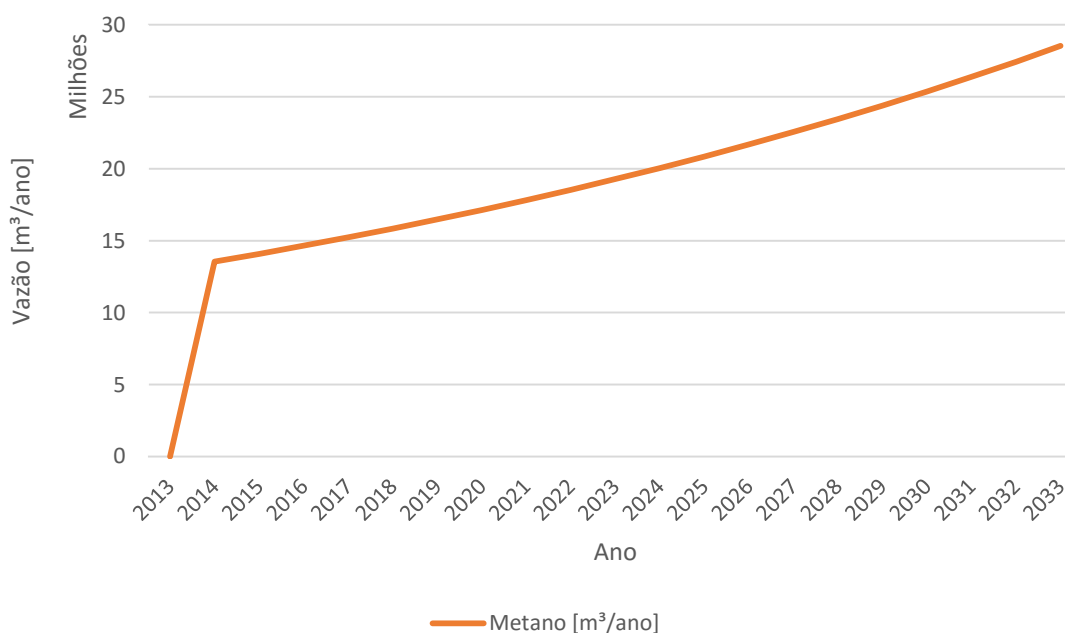


Figura 31. Produção de metano estimada para 20 anos – Biodigestor de Resíduos Rurais.

Diferentemente do perfil de produção de metano em aterros sanitários, os biodigestores de fezes de galinha não têm um encerramento de operações envolvendo decaimento da massa final de resíduo depositada. Como o funcionamento do biodigestor é de fluxo contínuo e quanto maior o rebanho associado ao biodigestor, maior a produção de metano, o perfil do gráfico apresenta essa característica ascendente devido a projeção de rebanho estipulada.

Calculando a potência disponível a partir desse volume de metano, com base nos valores adotados de acordo com a tabela 22, construiu-se a curva de permanência da potência (figura 32), e através das equações 21 e 22 a curva de energia gerada em função da potência instalada (figura 33), considerando 8000 horas de funcionamento do grupo gerador anualmente, reservando 760 horas para rotinas de manutenção.

Tabela 22. Parâmetros utilizados para o cálculo da potência disponível anualmente – Biodigestor de Resíduos Rurais.

Parâmetro	Valor Adotado	Fonte
PCi - metano	35,53 MJ/m ³	CETESB (2006b)
η – motor ciclo Otto	33 %	Barros (2013)

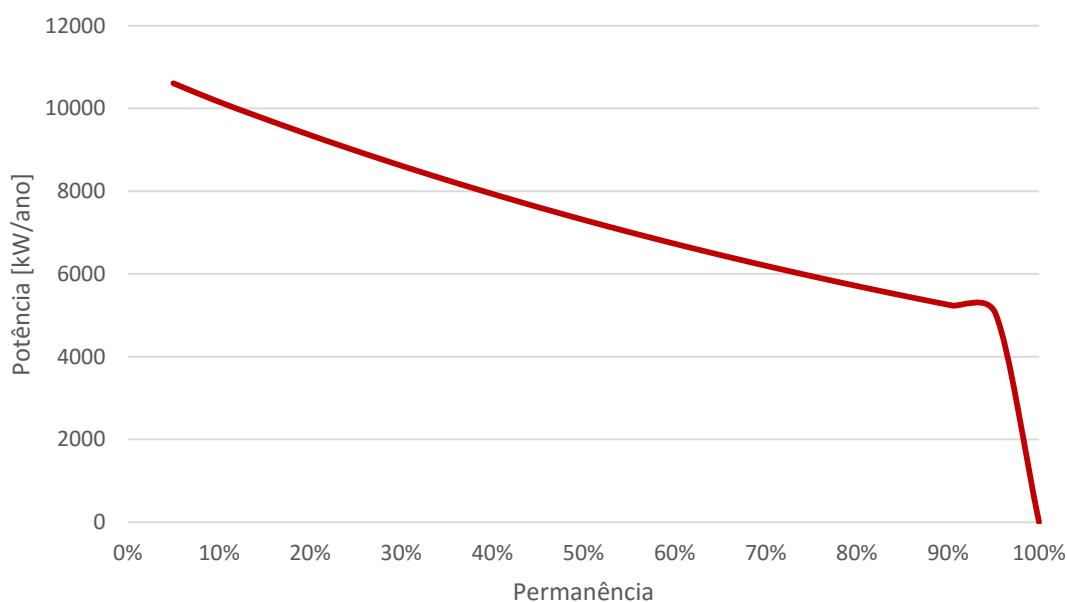


Figura 32. Curva de Permanência da potência disponível – Biodigestor de Resíduos Rurais.

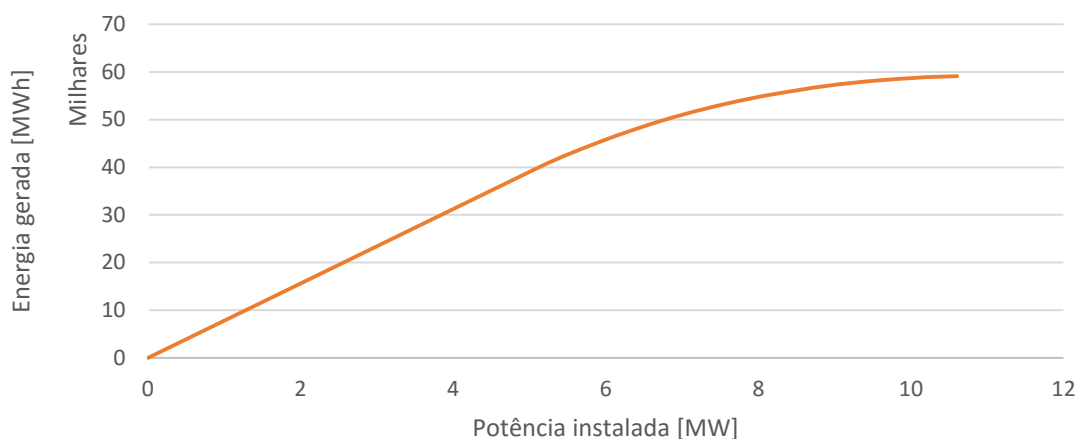


Figura 33. Energia Gerada em função da Potência Instalada – Biodigestor de Resíduos Rurais.

O gráfico da figura 33, apresenta um comportamento semelhante ao da primeira análise, com a energia tendendo a saturar quando chega a valores de máxima potência instalada, evidenciando que a partir de uma determinada potência, a variação na geração de energia é pequena em relação a variação da potência instalada. Por isso, a necessidade de encontrar a potência ótima de operação do grupo gerador que justifique os investimentos necessários para o empreendimento.

Continuando com a análise utilizada por Silva (2012), a viabilidade econômica foi calculada pelo Máximo Benefício Líquido, VPL e TIR de acordo com diversas potências. Os dados utilizados para análise econômica estão relacionados na tabela 23, e a planilha com os cálculos de fluxo de caixa realizados estão na tabela 32 presente no anexo D.

Tabela 23. Parâmetros utilizados para análise econômica – Biodigestor de Resíduos Rurais.

Parâmetro	Valor	Unidade	Fonte
Custo unitário de investimento (grupo gerador, sistema de captura e extração do biogás e projeto)	2135,14	R\$/kW ⁽¹⁾	Khan <i>et al</i> (2014)
Custo unitário de operação	0,09	R\$/kW.h ⁽¹⁾	Khan <i>et al</i> (2014)
Tarifa de venda de Energia	169,00	R\$/MW.h	EBC (2014)
Taxa mínima de atratividade	13,15	%	Banco Central do Brasil (2015)

⁽¹⁾ Valores corrigidos e atualizados pela Calculadora do Cidadão (Banco Central do Brasil, 2015).

Seguindo as equações de 23 a 33 calculou-se o benefício líquido assim como a relação das taxas do benefício e custo anuais para encontrar o máximo benefício líquido. Os resultados estão expostos na tabela 24.

Ficou evidente que existem três pontos que apresentam valores muito próximos do ideal na relação entre as taxas do benefício e custo anuais ($\Delta Ba/\Delta Ca = 1$). Aparentemente o ponto ótimo de potência a instalar está entre 6.8MW e 7,5MW, que deve ser verificado ao aplicar as análises de viabilidade econômica baseadas no VPL e na TIR, contidos na tabela 25.

Analisando os valores da tabela 25, encontraram-se dois pontos próximos do máximo VPL, com potências próximas de 7,1MW e 7,5MW. Ao plotar os gráficos da figura 34 observou-se que o ponto de máximo VPL converge para valores próximos de 7,4MW. A TIR assumiu um comportamento decrescente para valores crescentes de potência; porém, não apresentou valores negativos ou então inferiores à taxa mínima de atratividade para investimentos de risco, o que também confirma a viabilidade econômica do empreendimento.

Compilando todos os resultados apresentados nessa análise, é evidente a viabilidade econômica do projeto, estabelecendo um ponto ótimo de motorização do grupo gerador de 7,4MW, onde o VPL assume o máximo valor de, aproximadamente, 11,61 milhões de reais com uma TIR de, também aproximadamente, 26%.

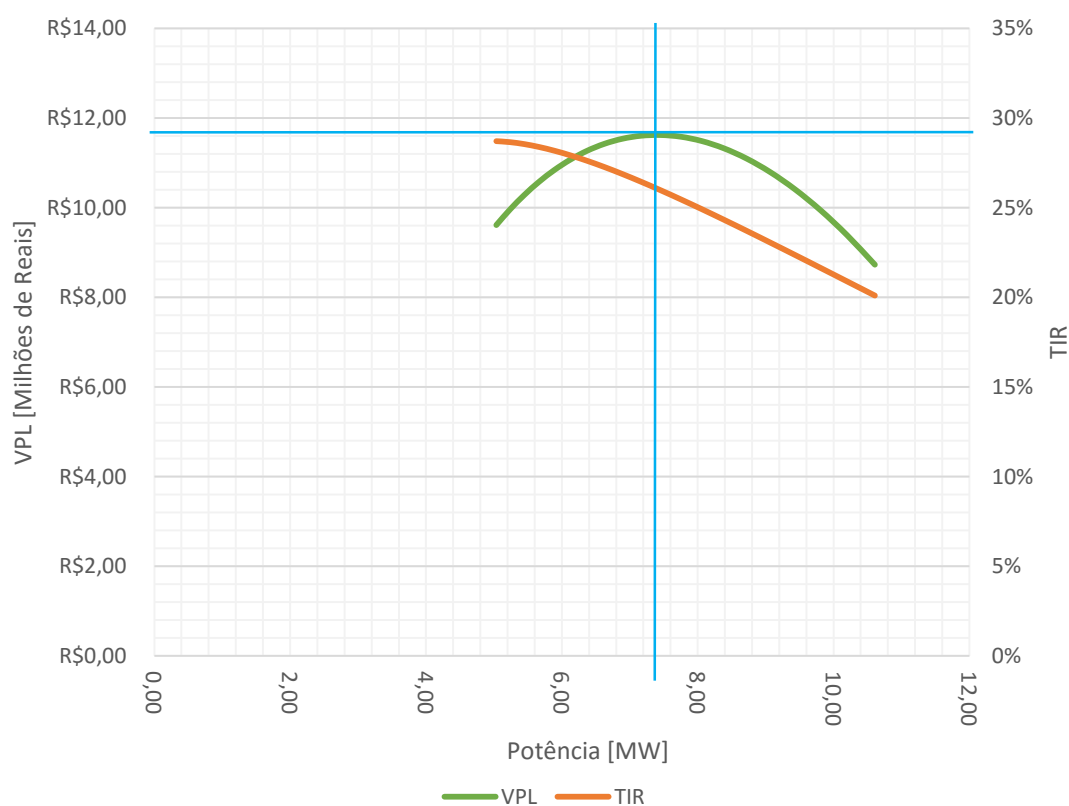


Figura 34. VPL e TIR em relação a Potência Instalada – Biodigestor de Resíduos Rurais.

Tabela 24. Resultados do cálculo do Máximo Benefício Líquido – Biodigestor de Resíduos Rurais

Permanência [%]	Potência [kW]	Energia Gerada [MW.h]	Custo Anual [R\$]	Benefício Anual [R\$]	Benefício Líquido [R\$]	ΔCa	ΔBa	ΔBa/ΔCa
5%	10608,25	59143,10	8576314,74	9995184,59	1418869,85	0	0	0,00
10%	10200,24	58906,07	8429849,87	9955125,92	1525276,05	146464,87	40058,67	0,27
14%	9807,92	58532,43	8275903,01	9891981,45	1616078,44	153946,87	63144,47	0,41
19%	9430,69	58029,46	8114944,17	9806979,56	1692035,40	160958,84	85001,88	0,53
24%	9067,97	57407,66	7947739,55	9701894,54	1754154,99	167204,62	105085,02	0,63
29%	8719,21	56676,91	7775008,92	9578397,78	1803388,85	172730,62	123496,76	0,71
33%	8383,85	55846,51	7597423,13	9438059,88	1840636,76	177585,80	140337,90	0,79
38%	8061,40	54925,21	7415612,16	9282359,77	1866747,61	181810,96	155700,11	0,86
43%	7751,34	53921,22	7230163,14	9112686,23	1882523,09	185449,03	169673,54	0,91
48%	7453,21	52842,28	7041626,26	8930345,78	1888719,52	188536,88	182340,45	0,97
52%	7166,55	51695,63	6850511,63	8736562,12	1886050,49	191114,63	193783,67	1,01
57%	6890,91	50488,08	6657296,84	8532485,57	1875188,74	193214,79	204076,54	1,06
62%	6625,88	49226,01	6462427,29	8319195,80	1856768,51	194869,55	213289,78	1,09
67%	6371,04	47915,40	6266314,96	8097702,16	1831387,20	196112,33	221493,63	1,13
71%	6126,00	46561,84	6069344,05	7868951,61	1799607,57	196970,91	228750,55	1,16
76%	5890,38	45170,59	5871870,40	7633829,67	1761959,27	197473,65	235121,94	1,19
81%	5663,83	43746,54	5674224,50	7393165,34	1718940,84	197645,90	240664,33	1,22
86%	5445,99	42294,27	5476711,45	7147732,45	1671021,00	197513,05	245432,89	1,24
90%	5236,53	40818,07	5279613,87	6898254,40	1618640,53	197097,58	249478,05	1,27
95%	5035,12	39321,92	5083191,52	6645404,84	1562213,32	196422,35	252849,55	1,29
100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5083191,52	6645404,84	1,31

Tabela 25. Resultados da análise econômica por VPL e TIR – Biodigestor de Resíduos Rurais.

Permanência [%]	Potência [kW]	Energia Gerada [MW.h]	Custo Anual [R\$]	Benefício Anual [R\$]	Benefício Líquido [R\$]	TIR	VPL
5%	10608,25	59143,10	8576314,74	9995184,59	1418869,85	20%	R\$ 8.728.142,22
10%	10200,24	58906,07	8429849,87	9955125,92	1525276,05	21%	R\$ 9.384.727,70
14%	9807,92	58532,43	8275903,01	9891981,45	1616078,44	22%	R\$ 9.943.417,23
19%	9430,69	58029,46	8114944,17	9806979,56	1692035,40	22%	R\$ 10.410.765,63
24%	9067,97	57407,66	7947739,55	9701894,54	1754154,99	23%	R\$ 10.792.975,45
29%	8719,21	56676,91	7775008,92	9578397,78	1803388,85	24%	R\$ 11.095.901,86
33%	8383,85	55846,51	7597423,13	9438059,88	1840636,76	24%	R\$ 11.325.080,98
38%	8061,40	54925,21	7415612,16	9282359,77	1866747,61	25%	R\$ 11.485.736,01
43%	7751,34	53921,22	7230163,14	9112686,23	1882523,09	25%	R\$ 11.582.799,50
48%	7453,21	52842,28	7041626,26	8930345,78	1888719,52	26%	R\$ 11.620.924,94
52%	7166,55	51695,63	6850511,63	8736562,12	1886050,49	26%	R\$ 11.604.502,87
57%	6890,91	50488,08	6657296,84	8532485,57	1875188,74	27%	R\$ 11.537.672,62
62%	6625,88	49226,01	6462427,29	8319195,80	1856768,51	27%	R\$ 11.424.336,52
67%	6371,04	47915,40	6266314,96	8097702,16	1831387,20	28%	R\$ 11.268.170,27
71%	6126,00	46561,84	6069344,05	7868951,61	1799607,57	28%	R\$ 11.072.636,35
76%	5890,38	45170,59	5871870,40	7633829,67	1761959,27	28%	R\$ 10.840.993,69
81%	5663,83	43746,54	5674224,50	7393165,34	1718940,84	28%	R\$ 10.576.309,63
86%	5445,99	42294,27	5476711,45	7147732,45	1671021,00	29%	R\$ 10.281.468,13
90%	5236,53	40818,07	5279613,87	6898254,40	1618640,53	29%	R\$ 9.959.181,25
95%	5035,12	39321,92	5083191,52	6645404,84	1562213,32	29%	R\$ 9.611.995,61
100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		R\$ 0,00

6.3. Análise III – Aterro Sanitário e Biodigestor de Resíduos Rurais.

Nessa terceira análise foi considerada a implantação de uma termoelétrica abastecida por biogás oriundo de duas fontes distintas, um aterro sanitário (proposto na análise I) e um biodigestor de resíduos rurais (proposto na análise II), ambos no município de Itanhandu-MG.

Os dados de entrada para dimensionamento do potencial energético, como projeções populacionais e volume de metano produzido, são os mesmos contidos nas análises anteriores, assim como o tempo de vida do projeto (20 anos). Para o cálculo da potência total disponível anualmente foram somadas as potências individuais das duas fontes geradoras de metano, calculadas de acordo com a equação 19 e os parâmetros das tabelas 16 e 22. O volume de metano total disponível anualmente é representado no gráfico da figura 35, e os valores calculados estão na tabela 33 do anexo E.

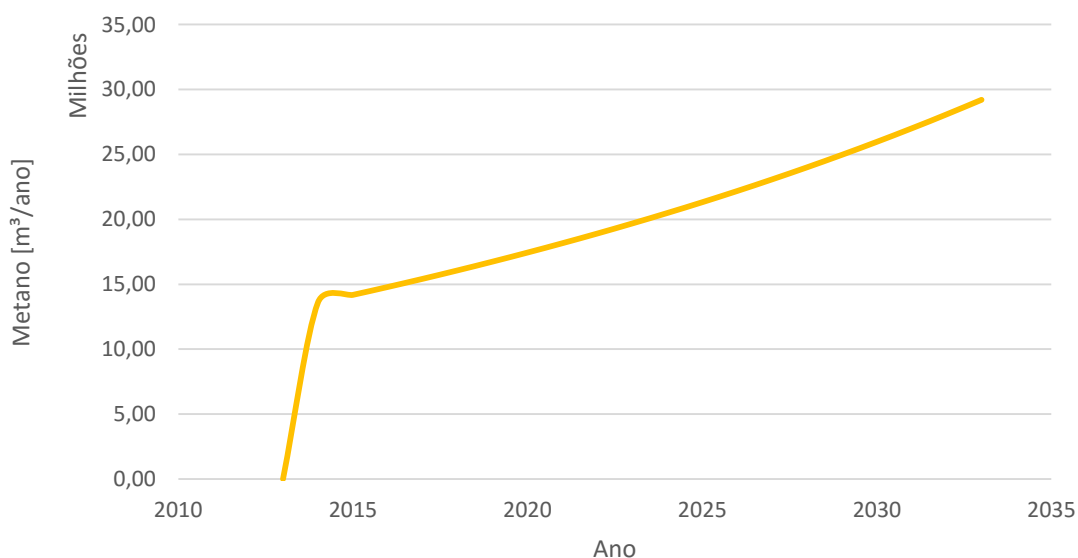


Figura 35. Volume de total de metano produzido anualmente a partir do biogás do aterro sanitário somado ao biodigestor de resíduos rurais.

Lembrando que a análise realizada nesse estudo baseou-se nos trabalhos de Silva (2012), construiu-se a curva de permanência da potência, e na sequência o cálculo da energia gerada em função da potência instalada, de acordo com as equações 21 e 22.

Não diferente do comportamento apresentado nas duas análises anteriores, a energia tende a saturar quando chega a valores de máxima potência instalada, evidenciando que a partir de uma determinada potência a variação na geração de energia é pequena em relação a variação da potência instalada. Por isso, a necessidade de encontrar a potência ótima de operação do grupo gerador que justifique os investimentos necessários para o empreendimento.

Novamente, a viabilidade econômica foi calculada pelo Máximo Benefício Líquido, VPL e TIR de acordo com diversas potências. Os dados utilizados para análise econômica estão relacionados nas tabelas 17 e 23, aplicadas em suas devidas proporções de acordo com a potência e energia fornecidas por cada fonte geradora de metano, e a planilha com os cálculos de fluxo de caixa realizados estão na tabela 34 presente no anexo F. O valor do grupo gerador adotado é o sugerido por Khan *et al* (2014), devido a relevância da potência fornecida pelo biodigestor de resíduos rurais frente ao aterro.

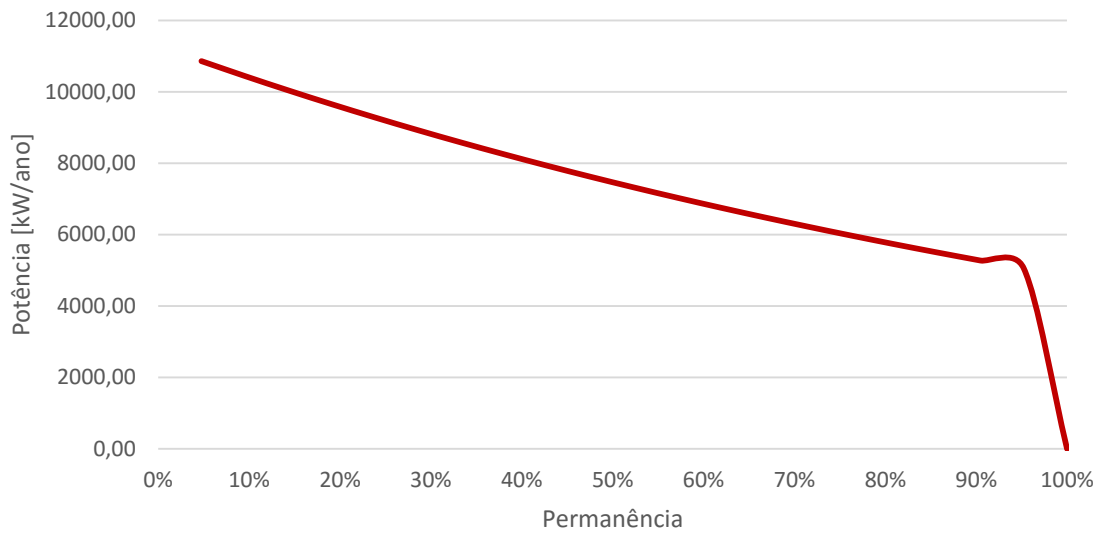


Figura 36. Curva de Permanência da potência disponível – Aterro e Biodigestor de Resíduos Rurais.

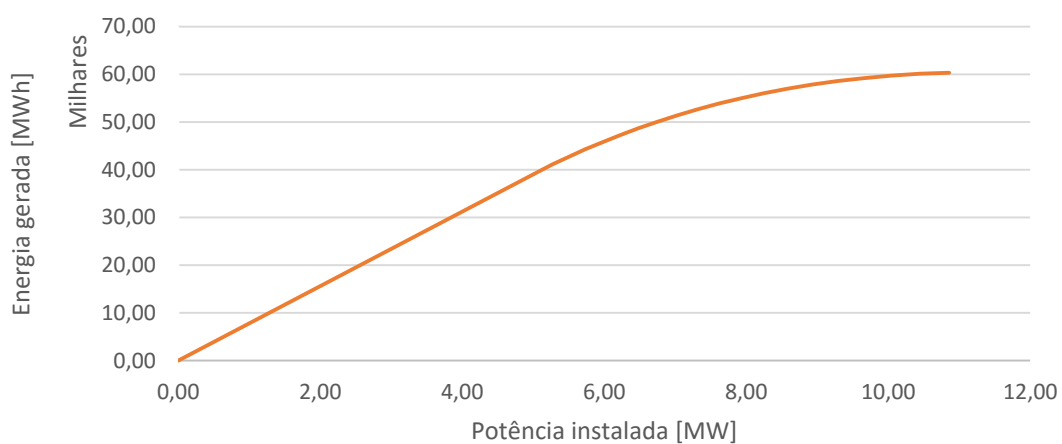


Figura 37. Energia Gerada em função da Potência Instalada – Aterro e Biodigestor de Resíduos Rurais.

De acordo com a tabela 26, três pontos apresentaram valores muito próximos do ideal na relação entre as taxas do benefício e custo anuais ($\Delta Ba/\Delta Ca = 1$). Aparentemente, o ponto ótimo de potência a instalar está entre 7,0MW e 7,7MW, que deve ser verificado ao aplicar as análises de viabilidade econômica baseadas no VPL e na TIR, contidos na tabela 27.

Analisando os valores da tabela 27 encontraram-se dois pontos próximos do máximo VPL, com potências próximas de 7,3MW e 7,7MW. Ao plotar as curvas da figura 38 observou-se que o ponto de máximo VPL converge para valores próximos de 7,5MW. A TIR assumiu um comportamento decrescente para valores crescentes de potência, assim como na análise II, porém não apresentou valores negativos ou então inferiores à taxa mínima de atratividade, o que também confirma a viabilidade econômica do empreendimento.

Ao término dessa análise é possível confirmar a viabilidade econômica do projeto, estabelecendo um ponto ótimo de motorização do grupo gerador próxima de 7,5MW, onde o VPL assume o máximo valor de, aproximadamente, 11,27 milhões de reais com uma TIR, também aproximada de 25%.

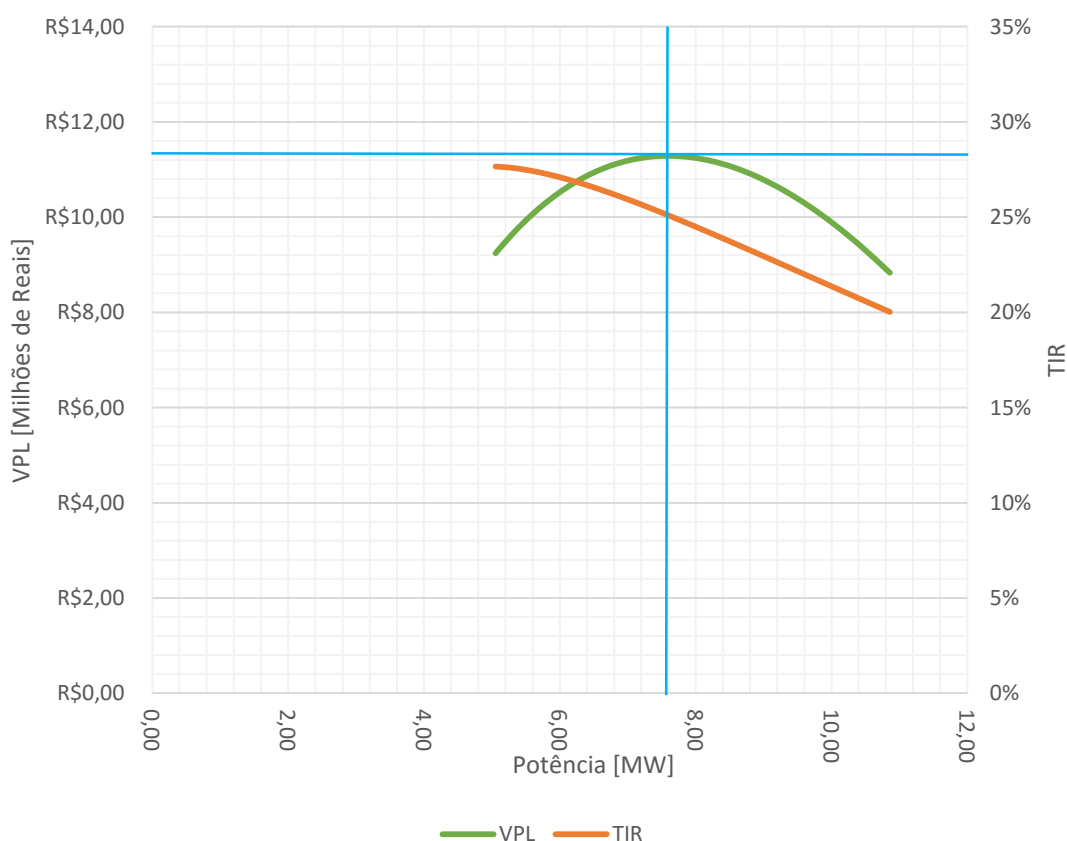


Figura 38. VPL e TIR em relação a Potência Instalada – Aterro e Biodigestor de Resíduos Rurais.

Tabela 26. Resultados do cálculo do Máximo Benefício Líquido – Aterro e Biodigestor de Resíduos Rurais

Permanência [%]	Potência [kW]	Energia Gerada [MW.h]	Custo Anual [R\$]	Benefício Anual [R\$]	Benefício Líquido [R\$]	ΔCa	ΔBa	ΔBa/ΔCa
5%	10858,56	60322,77	8806915,23	10194548,80	1387633,57	0	0	0,00
10%	10442,15	60084,82	8655005,11	10154335,06	1499329,96	151910,12	40213,74	0,26
14%	10041,16	59702,93	8495053,58	10089794,67	1594741,09	159951,52	64540,39	0,40
19%	9654,97	59188,01	8327852,86	10002773,81	1674920,96	167200,73	87020,86	0,52
24%	9282,98	58550,32	8154138,53	9895003,59	1740865,06	173714,32	107770,22	0,62
29%	8924,62	57799,45	7974596,08	9768107,58	1793511,50	179542,45	126896,01	0,71
33%	8579,31	56944,40	7789857,29	9623603,44	1833746,15	184738,79	144504,14	0,78
38%	8246,51	55993,56	7600507,17	9462911,61	1862404,44	189350,12	160691,83	0,85
43%	7925,71	54954,77	7407080,18	9287356,31	1880276,13	193426,99	175555,30	0,91
48%	7616,39	53835,34	7210064,16	9098172,89	1888108,73	197016,02	189183,42	0,96
52%	7318,07	52642,05	7009894,27	8896506,63	1886612,35	200169,88	201666,26	1,01
57%	7030,27	51381,19	6806957,08	8683421,57	1876464,48	202937,19	213085,06	1,05
62%	6752,52	50058,59	6601586,20	8459902,44	1858316,24	205370,88	223519,13	1,09
67%	6484,39	48679,61	6394055,06	8226854,32	1832799,26	207531,14	233048,12	1,12
71%	6225,43	47249,17	6184574,89	7985109,61	1800534,72	209480,18	241744,71	1,15
76%	5975,22	45771,76	5973284,13	7735428,09	1762143,96	211290,76	249681,52	1,18
81%	5733,36	44251,48	5760238,63	7478500,83	1718262,20	213045,50	256927,26	1,21
86%	5499,44	42692,01	5545394,94	7214950,43	1669555,49	214843,69	263550,40	1,23
90%	5273,07	41096,65	5328591,37	6945334,54	1616743,17	216803,57	269615,89	1,24
95%	5053,87	39468,32	5109518,75	6670145,27	1560626,52	219072,62	275189,27	1,26
100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	5109518,75	6670145,27	1,31

Tabela 27. Resultados da análise econômica por VPL e TIR – Aterro e Biodigestor de Resíduos Rurais.

Permanência [%]	Potência [kW]	Energia Gerada [MW.h]	Custo Anual [R\$]	Benefício Anual [R\$]	Benefício Líquido [R\$]	TIR	VPL
5%	10858,56	60322,77	8806915,23	10194548,80	1387633,57	20%	R\$ 8.831.086,31
10%	10442,15	60084,82	8655005,11	10154335,06	1499329,96	21%	R\$ 9.376.768,51
14%	10041,16	59702,93	8495053,58	10089794,67	1594741,09	21%	R\$ 9.847.058,53
19%	9654,97	59188,01	8327852,86	10002773,81	1674920,96	22%	R\$ 10.244.886,41
24%	9282,98	58550,32	8154138,53	9895003,59	1740865,06	23%	R\$ 10.573.337,52
29%	8924,62	57799,45	7974596,08	9768107,58	1793511,50	23%	R\$ 10.835.577,03
33%	8579,31	56944,40	7789857,29	9623603,44	1833746,15	24%	R\$ 11.034.811,73
38%	8246,51	55993,56	7600507,17	9462911,61	1862404,44	24%	R\$ 11.174.239,46
43%	7925,71	54954,77	7407080,18	9287356,31	1880276,13	25%	R\$ 11.257.024,51
48%	7616,39	53835,34	7210064,16	9098172,89	1888108,73	25%	R\$ 11.286.268,45
52%	7318,07	52642,05	7009894,27	8896506,63	1886612,35	25%	R\$ 11.264.992,54
57%	7030,27	51381,19	6806957,08	8683421,57	1876464,48	26%	R\$ 11.196.119,01
62%	6752,52	50058,59	6601586,20	8459902,44	1858316,24	26%	R\$ 11.082.460,21
67%	6484,39	48679,61	6394055,06	8226854,32	1832799,26	27%	R\$ 10.926.707,10
71%	6225,43	47249,17	6184574,89	7985109,61	1800534,72	27%	R\$ 10.731.422,22
76%	5975,22	45771,76	5973284,13	7735428,09	1762143,96	27%	R\$ 10.499.032,94
81%	5733,36	44251,48	5760238,63	7478500,83	1718262,20	27%	R\$ 10.231.827,47
86%	5499,44	42692,01	5545394,94	7214950,43	1669555,49	27%	R\$ 9.931.949,91
90%	5273,07	41096,65	5328591,37	6945334,54	1616743,17	28%	R\$ 9.601.398,45
95%	5053,87	39468,32	5109518,75	6670145,27	1560626,52	28%	R\$ 9.242.021,01
100%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00		R\$ 0,00

6.4. Resumo comparativo

Para melhor ilustrar os resultados obtidos nas três análises realizadas, elaborou-se a tabela 28.

Tabela 28. Resumo comparativos dos resultados obtidos.

Análise	Motorização Ótima	VPL estimado	TIR estimado	Viabilidade
I	Não encontrada	- R\$ 3.367,83*	4%	Não
II	7,4 MW	R\$ 11,61M	26%	Sim
III	7,5 MW	R\$ 11,27M	25%	Sim

*Máximo VPL calculado.

Os resultados apresentados na tabela anterior são referentes aos valores estimados graficamente e margeados pelos pontos expostos nas tabelas de Resultados da Análise Econômica por VPL e TIR, de acordo com a conclusão das análises econômicas de cada caso estudado.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho apresentado é contundente ao estabelecer Itanhandu-MG como objeto de estudo, que atende aos critérios estabelecidos para caracterizar um município com baixo número de habitantes e alta atividade rural, evidenciados pelos dados expostos referentes aos censos realizados nos últimos anos.

As populações envolvidas nas análises foram fatores determinantes nos resultados, interferindo diretamente no volume de metano produzido, e conseqüentemente na potência disponível anualmente. Enquanto a população de habitantes do município caracteriza uma cidade pequena que não justifica financeiramente o investimento em uma termoelétrica a partir de biogás de aterro, o rebanho de galinhas das granjas locais posiciona o município no topo da lista de maiores produtores de ovos do estado de Minas Gerais, e o montante de cabeças gera resíduo suficiente para tornar atrativo um projeto de aproveitamento energético a partir de resíduo rural, especificamente dejetos de galinha.

As análises dos três cenários propostos expõem a viabilidade econômica de um empreendimento de geração de energia a partir do aproveitamento do biogás oriundo da biodigestão de dejetos de galinha para uma potência ótima do grupo gerador próxima de 7,4MW. Em contrapartida, o aproveitamento do biogás da biodigestão de resíduos sólidos urbanos não conseguiu apresentar valores satisfatórios de motorização que justificassem sua aplicação. O investimento para a iniciativa do aproveitamento de RSU, somado aos

custos operacionais dos períodos funcionais, não são compensados ao longo do tempo de vida do projeto, sequer alcançando um patamar de quitação financeira, revelado por valores negativos de VPL. Esse resultado está de acordo com os obtidos por Mambeli Barros (2014), que indicam viabilidade econômica para empreendimentos que atendem populações superiores a 200 mil habitantes somente. Por outro lado, o biogás de resíduos rurais, não só amortiza o investimento e custos associados, como gera alto retorno financeiro, superando a taxa mínima de atratividade do empreendimento de 13,15% com uma TIR de 26%.

Ao unir ambos aproveitamentos em um só empreendimento, notou-se uma queda no retorno financeiro do projeto, vide VPL de 11,27 Milhões de Reais, quando comparado à aplicação apenas do resíduo rural (análise II), com VPL de 11,61 Milhões de Reais. A atratividade da Análise III também sofreu uma queda, de 1%, quando comparada à Análise II. Esses resultados evidenciaram uma compensação financeira para o uso da técnica baseada no aproveitamento de resíduo sólido urbano que se mostrou não lucrativo, com máximo VPL de R\$ 3.367,83 negativos. Porém, se for considerado o ganho ambiental tangente à compensações financeiras, a aplicação da configuração proposta na análise III representa maior atratividade, criando uma solução economicamente viável e sustentável para ambos problemas ambientais.

Os softwares utilizados, tanto o LandGEM quanto o Biogás, são de fácil utilização e fornecem mais informações de saída, além das utilizadas nesse trabalho. O LandGEM, apesar de se tratar de uma macro de Excel, apresenta uma interface amigável, com resultados organizados em abas sendo a última um relatório resumido do estudo realizado. O Biogás, por sua vez, já é um programa que necessita de instalação no sistema do computador utilizado, mas também apresenta interface amigável e intuitiva, e se mesmo assim o usuário apresentar dúvidas, é possível consultar o manual do software disponível na mesma página da CETESB onde se baixa o instalador.

7.1. Recomendações para trabalhos futuros

Os valores de contorno utilizados para esse estudo restringiram-se ao município de Itanhandu e ao rebanho de galinhas apenas. Ao ampliar a situação de contorno, é possível que novas configurações de aproveitamento energético a partir de biogás possam ser viabilizadas, como por exemplo, estender o atendimento do aterro municipal aos municípios vizinhos, assim como o uso de resíduos rurais gerais, demais criações do ramo pecuário (bovinos, caprinos, etc.) e biomassa residual da agricultura para abastecimento do biodigestor.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 8419 Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. p. 1–7, 1992.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13896 - Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação. p. 12, 1997.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10004 - Resíduos Sólidos - Classificação. 2004.

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15849 - Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. p. 24, 2010.

ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013. p. 114, 2013.

AFAZELI, H. et al. An investigation of biogas production potential from livestock and slaughterhouse wastes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 380–386, jun. 2014.

AGÊNCIA BRASIL, E. **Aneel faz leilão para contratação de energia de reserva | Agência Brasil**. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2014-10/aneel-faz-leilao-para-contratacao-de-energia-de-reserva>>. Acesso em: 9 maio. 2015.

ARONICA, S. et al. Estimation of biogas produced by the landfill of Palermo, applying a Gaussian model. **Waste Management**, v. 29, n. 1, p. 233–239, jan. 2009.

BARIK, D.; MURUGAN, S. Investigation on combustion performance and emission characteristics of a DI (direct injection) diesel engine fueled with biogas–diesel in dual fuel mode. **Energy**, v. 72, p. 760–771, ago. 2014.

BARROS, R. M. **TRATADO SOBRE RESÍDUOS SÓLIDOS Gestão, uso e Sustentabilidade**. 1ª Edição ed.[s.l.] Editora Interciência, 2013.

BATSTONE, D.J. KELLER, J. ANGELIDAKI, I. KALYUZHNYI, S.V. PAVLOSTATHIS, S.G. ROZZI, A. SANDERS, W.T.M. SIEGRIST, H. VAVILIN, V. A. The IWA Anaerobic Digestion Model No 1 (ADM1). **IWA Scientific and Technical Report**, v. No 13, p. 77, 1 abr. 2002.

BCB. Banco Central do Brasil. **Consulta à Taxa Selic Diária**. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/htms/selic/selicdia.asp>>. Acesso em: 9 maio. 2015a.

BCB. Banco Central do Brasil. **Calculadora do cidadão**. Disponível em: <<http://www.bcb.gov.br/?calculadora>>. Acesso em: 9 maio. 2015b.

BIDONE, F. R. A.; POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. [s.l.: s.n.].

BRASIL. Diário Oficial da União. **Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.** Brasília: DOU, 2010. Disponível em:

<http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 16 jun. 2015a.

BRASIL. Diário Oficial da União. **Decreto nº 7.404, de 23 de Dezembro de 2010. Regulamenta a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Co.** Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/Decreto/D7404.htm>. Acesso em: 16 jun. 2015b.

BRASIL. Ministério da Saúde. **DATASUS Tecnologia da Informação a Serviço do SUS. Brasília: MS, [s.d.].** Disponível em: <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/defthtm.exe?sinasc/cnv/nvbr.def>>. Acesso em: 11 set. 2015.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna - Volume 1.** [s.l.] Editora Blucher, 2012.

CARESANA, F. et al. Energy production from landfill biogas: An italian case. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 10, p. 4331–4339, out. 2011.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. DE. **Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários.** 1ª Edição ed.Rio de Janeiro: ABES RJ, 2006.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Biogás - Aterros. Manual do usuário do programa de computador**São Paulo - SP, 2006a.

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Biogás - Efluentes e Resíduo Rural. Manual do usuário do programa de computador.**, 2006b.

CHERNICHARO, C. A. DE L. **Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias - Reatores anaeróbios Vol. 5.** 2ª Edição ed.Belo Horizonte: Editora UFMG, 1997.

COIMBRA-ARAÚJO, C. H. et al. Brazilian case study for biogas energy: Production of electric power, heat and automotive energy in condominiums of agroenergy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 40, p. 826–839, dez. 2014.

CONVENÇÃO-QUADRO DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE A MUDANÇA DO CLIMA, U. **Status dos projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil.** [s.l: s.n.].

COSTA, D. F. DA. **COSTA, D. F. Geração de Energia Elétrica a Partir do Biogás do Tratamento de Esgoto. Dissertação (mestrado em Energia). Universidade de São Paulo – USP. São Paulo, 2006.** [s.l.] Universidade de São Paulo - USP, 2006.

DESIDERI, U. et al. Sanitary landfill energetic potential analysis: a real case study. **Energy Conversion and Management**, v. 44, n. 12, p. 1969–1981, jul. 2003.

DI BELLA, G.; DI TRAPANI, D.; VIVIANI, G. Evaluation of methane emissions from Palermo municipal landfill: Comparison between field measurements and models. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 31, n. 8, p. 1820–6, ago. 2011.

DI TRAPANI, D.; DI BELLA, G.; VIVIANI, G. Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: influence of landfill features and side slopes. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 33, n. 10, p. 2108–15, out. 2013.

DOLEJŠ, P. et al. Simultaneous hydrogen sulphide and carbon dioxide removal from biogas by water-swollen reverse osmosis membrane. **Separation and Purification Technology**, v. 131, p. 108–116, jun. 2014.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Caracterização do Cenário Macroeconômico para os próximos 10 anos (2014-2023)**. Rio de Janeiro: Ministério de Minas e Energia (MME), 2014. [s.l: s.n.].

GOOGLE MAPS. **Itanhandu - Google Maps**. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Itanhandu,+MG/@-22.5204705,-44.918173,11z/data=!4m2!3m1!1s0x9e014d14f54ac9:0xd4dfd3b6a6440647>>. Acesso em: 19 abr. 2015.

GRIMA-OLMEDO, C.; RAMÍREZ-GÓMEZ, Á.; ALCALDE-CARTAGENA, R. Energetic performance of landfill and digester biogas in a domestic cooker. **Applied Energy**, v. 134, p. 301–308, dez. 2014.

GUERMOUD, N. et al. Municipal solid waste in Mostaganem city (Western Algeria). **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 29, n. 2, p. 896–902, fev. 2009.

HOSSEINI, S. E.; WAHID, M. A. Biogas utilization: Experimental investigation on biogas flameless combustion in lab-scale furnace. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 426–432, out. 2013.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE | Cidades | Minas Gerais | Itanhandu**. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/GFA>>. Acesso em: 19 abr. 2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IOVANE, P. et al. Experimental test with polymeric membrane for the biogas purification from CO₂ and H₂S. **Fuel**, v. 135, p. 352–358, nov. 2014.

KANG, D. W. et al. The effect of firing biogas on the performance and operating characteristics of simple and recuperative cycle gas turbine combined heat and power systems. **Applied Energy**, v. 93, p. 215–228, maio 2012.

KANG, J. Y. et al. Comparative economic analysis of gas turbine-based power generation and combined heat and power systems using biogas fuel. **Energy**, v. 67, p. 309–318, abr. 2014.

KHAN, E. U. et al. Techno-economic analysis of small scale biogas based polygeneration systems: Bangladesh case study. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 7, p. 68–78, set. 2014.

KOTHARI, R. et al. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 174–195, nov. 2014.

LEME, M. M. V. et al. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 87, p. 8–20, jun. 2014.

LOGA. Logística Ambiental de São Paulo. **Foto Aérea do Aterro Bandeirantes na grande São Paulo.** Disponível em: <http://www.loga.com.br/IMAGES/LOGA-ATERROBANDEIRANTES_01.jpg>. Acesso em: 14 set. 2015.

LUCAS JÚNIOR, J. DE. **Algumas considerações sobre o uso do estrume de suínos como substrato para três sistemas de biodigestores anaeróbios.** [s.l.] Universidade Estadual Paulista – UNESP. Jaboticabal, 1994.

MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 31, n. 5, p. 966–77, maio 2011.

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

MONTEIRO, J. H. P. **Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos.** Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

NIKPEY SOMEHSARAEI, H. et al. Performance analysis of a biogas-fueled micro gas turbine using a validated thermodynamic model. **Applied Thermal Engineering**, v. 66, n. 1-2, p. 181–190, maio 2014.

OLIVEIRA, L. B.; HENRIQUES, R. M.; PEREIRA, A. O. Use of wastes as option for the mitigation of CO₂ emissions in the Brazilian power sector. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 3247–3251, dez. 2010.

OSORIO, F.; TORRES, J. C. Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production. **Renewable Energy**, v. 34, n. 10, p. 2164–2171, out. 2009.

OZKAYA, B.; DEMIR, A.; BILGILI, M. S. Neural network prediction model for the methane fraction in biogas from field-scale landfill bioreactors. **Environmental Modelling and Software**, v. 22, n. 6, p. 815–822, jun. 2007.

QASIN, S. R. **Wastewater Treatment Plants – Planning design and operation.** 2^a ed. Lancaster, Pennsylvania: USA Technomic Publishing Company, 1999.

SALOMON, K. R.; SILVA LORA, E. E. Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, v. 33, n. 9, p. 1101–1107, set. 2009.

SANTOS, I. F. S. . ET AL. Um estudo das relações de operação e potência instalada de uma usina termelétrica em aterros sanitários. **PCH Notícias & SHP News**, v. 62., p. 25–28, 2015a.

SANTOS, I. F. S. . ET AL. Uma avaliação energética, econômica e ambiental das opções de aproveitamento energético do biogás de um aterro sanitário no Brasil. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, fev. 2015b.

SILES, J. A et al. Impact of ammonia and sulphate concentration on thermophilic anaerobic digestion. **Bioresource technology**, v. 101, n. 23, p. 9040–8, dez. 2010.

SILVA, T. R. Metodologia para a determinação teórica da potência ótima conseguida a partir da combustão do biogás gerado em aterro sanitário: Estudo de caso do aterro sanitário de Itajubá-MG. p. 0–164, 2012.

SOSA, R. CHAO, R. DEL RÍO, J. Aspectos Bioquímicos y Tecnológicos del Tratamiento de Residuales Agrícolas con Producción de Biogas. **Revista Computadorizada de Producción Porcina**, 1999.

SOUZA, S. N. M. DE et al. Electric energy micro-production in a rural property using biogas as primary source. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 385–391, dez. 2013.

SPOKAS, K. et al. Methane mass balance at three landfill sites: what is the efficiency of capture by gas collection systems? **Waste management (New York, N.Y.)**, v. 26, n. 5, p. 516–25, jan. 2006.

STAUB, M. J. et al. An incremental model to assess the environmental impact of cap cover systems on MSW landfill emissions. **Geotextiles and Geomembranes**, v. 29, n. 3, p. 298–312, jun. 2011.

SURATA, I. W. et al. Simple Conversion Method from Gasoline to Biogas Fueled Small Engine to Powered Electric Generator. **Energy Procedia**, v. 52, p. 626–632, 2014.

SURENDRA, K. C. et al. Biogas as a sustainable energy source for developing countries: Opportunities and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 31, p. 846–859, mar. 2014.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Methane Emissions**. Disponível em: <<http://epa.gov/climatechange/ghgemissions/gases/ch4.html>>. Acesso em: 11 maio. 2015.

USEPA. United States Environmental Protection Agency. **Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide** Washington - DC, 2005.

VILHENA, A. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. 3ª Edição ed.[s.l.] CEMPRE, 2010.

XIAO, Y. et al. CO₂ Removal from Biogas by Water Washing System. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 22, n. 8, p. 950–953, ago. 2014.

YAN, C. et al. Influence of influent methane concentration on biogas upgrading and biogas slurry purification under various LED (light-emitting diode) light wavelengths using *Chlorella* sp. **Energy**, v. 69, p. 419–426, maio 2014.

YINGJIAN, L. et al. Energy balance and efficiency analysis for power generation in internal combustion engine sets using biogas. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 6, p. 25–33, jun. 2014.

YOON, S. H.; LEE, C. S. Experimental investigation on the combustion and exhaust emission characteristics of biogas–biodiesel dual-fuel combustion in a CI engine. **Fuel Processing Technology**, v. 92, n. 5, p. 992–1000, maio 2011.

ZAMORANO, M. et al. Study of the energy potential of the biogas produced by an urban waste landfill in Southern Spain. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 11, n. 5, p. 909–922, jun. 2007.

**ANEXO A – TABELA 29 – CÁLCULO DA POTÊNCIA DISPONÍVEL
BASEADA NA PROJEÇÃO DE PRODUÇÃO DE METANO DE ACORDO COM O
SOFTWARE LANDGEM – ANÁLISE I.**

Tabela 29. Cálculo da Potência disponível baseada na projeção de produção de metano de acordo com o software LandGEM.

Ano	Biogás de aterro total <i>[m³/ano]</i>	Metano <i>[m³/ano]</i>	Potência <i>[kW]</i>
2013	0,00	0,00	0,00
2014	88593,05	44296,53	13,18
2015	172691,80	86345,90	25,68
2016	252599,26	126299,63	37,57
2017	328598,07	164299,04	48,87
2018	400951,84	200475,92	59,63
2019	469906,49	234953,25	69,88
2020	535691,47	267845,74	79,67
2021	598520,90	299260,45	89,01
2022	658594,60	329297,30	97,94
2023	716099,12	358049,56	106,50
2024	771208,61	385604,30	114,69
2025	824085,70	412042,85	122,56
2026	874882,28	437441,14	130,11
2027	923740,25	461870,12	137,38
2028	970792,20	485396,10	144,37
2029	1016162,04	508081,02	151,12
2030	1059965,61	529982,81	157,64
2031	1102311,24	551155,62	163,93
2032	1143300,24	571650,12	170,03
2033	1183027,40	591513,70	175,94
2034	1103047,43	551523,72	164,04
2035	1028474,61	514237,31	152,95
2036	958943,37	479471,69	142,61
2037	894112,87	447056,44	132,97
2038	833665,32	416832,66	123,98
2039	777304,39	388652,19	115,60
2040	724753,81	362376,90	107,78
2041	675755,97	337877,99	100,50
2042	630070,69	315035,35	93,70
2043	587474,02	293737,01	87,37
2044	547757,15	273878,57	81,46
2045	510725,38	255362,69	75,95
2046	476197,19	238098,59	70,82
2047	444003,31	222001,66	66,03

Ano	Biogás de aterro total <i>[m³/ano]</i>	Metano <i>[m³/ano]</i>	Potência <i>[kW]</i>
2048	413985,94	206992,97	61,57
2049	385997,94	192998,97	57,40
2050	359902,09	179951,05	53,52
2051	335570,48	167785,24	49,91
2052	312883,85	156441,92	46,53
2053	291730,96	145865,48	43,39
2054	272008,15	136004,07	40,45
2055	253618,72	126809,36	37,72
2056	236472,52	118236,26	35,17
2057	220485,52	110242,76	32,79
2058	205579,34	102789,67	30,57
2059	191680,90	95840,45	28,51
2060	178722,09	89361,04	26,58
2061	166639,37	83319,69	24,78
2062	155373,52	77686,76	23,11
2063	144869,31	72434,65	21,54
2064	135075,25	67537,62	20,09
2065	125943,33	62971,66	18,73
2066	117428,78	58714,39	17,46
2067	109489,87	54744,93	16,28
2068	102087,68	51043,84	15,18
2069	95185,92	47592,96	14,16
2070	88750,76	44375,38	13,20
2071	82750,66	41375,33	12,31
2072	77156,21	38578,10	11,47
2073	71939,97	35969,99	10,70
2074	67076,38	33538,19	9,98
2075	62541,61	31270,80	9,30
2076	58313,41	29156,70	8,67
2077	54371,06	27185,53	8,09
2078	50695,24	25347,62	7,54
2079	47267,93	23633,96	7,03
2080	44072,32	22036,16	6,55
2081	41092,76	20546,38	6,11
2082	38314,64	19157,32	5,70
2083	35724,33	17862,17	5,31

Ano	Biogás de aterro total <i>[m³/ano]</i>	Metano <i>[m³/ano]</i>	Potência <i>[kW]</i>
2084	33309,15	16654,57	4,95
2085	31057,24	15528,62	4,62
2086	28957,58	14478,79	4,31
2087	26999,87	13499,93	4,02
2088	25174,51	12587,26	3,74
2089	23472,56	11736,28	3,49
2090	21885,67	10942,83	3,25
2091	20406,06	10203,03	3,03
2092	19026,49	9513,24	2,83
2093	17740,18	8870,09	2,64
2094	16540,83	8270,42	2,46
2095	15422,57	7711,29	2,29
2096	14379,91	7189,95	2,14
2097	13407,74	6703,87	1,99
2098	12501,29	6250,65	1,86
2099	11656,13	5828,06	1,73
2100	10868,10	5434,05	1,62
2101	10133,35	5066,68	1,51
2102	9448,27	4724,14	1,41
2103	8809,51	4404,76	1,31
2104	8213,93	4106,97	1,22
2105	7658,62	3829,31	1,14
2106	7140,85	3570,43	1,06
2107	6658,09	3329,04	0,99
2108	6207,96	3103,98	0,92
2109	5788,26	2894,13	0,86
2110	5396,94	2698,47	0,80
2111	5032,07	2516,04	0,75
2112	4691,87	2345,94	0,70
2113	4374,67	2187,34	0,65
2114	4078,92	2039,46	0,61
2115	3803,16	1901,58	0,57
2116	3546,04	1773,02	0,53
2117	3306,31	1653,15	0,49
2118	3082,78	1541,39	0,46
2119	2874,37	1437,18	0,43

Ano	Biogás de aterro total [m³/ano]	Metano [m³/ano]	Potência [kW]
2120	2680,04	1340,02	0,40
2121	2498,85	1249,43	0,37
2122	2329,92	1164,96	0,35
2123	2172,40	1086,20	0,32
2124	2025,53	1012,77	0,30
2125	1888,59	944,30	0,28
2126	1760,91	880,46	0,26
2127	1641,86	820,93	0,24
2128	1530,86	765,43	0,23
2129	1427,37	713,68	0,21
2130	1330,87	665,43	0,20
2131	1240,89	620,45	0,18
2132	1157,00	578,50	0,17
2133	1078,78	539,39	0,16
2134	1005,85	502,92	0,15
2135	937,85	468,92	0,14
2136	874,44	437,22	0,13
2137	815,33	407,66	0,12
2138	760,20	380,10	0,11
2139	708,81	354,40	0,11
2140	660,89	330,44	0,10
2141	616,21	308,10	0,09
2142	574,55	287,28	0,09
2143	535,71	267,85	0,08
2144	499,49	249,74	0,07
2145	465,72	232,86	0,07
2146	434,24	217,12	0,06
2147	404,88	202,44	0,06
2148	377,51	188,75	0,06
2149	351,98	175,99	0,05
2150	328,19	164,09	0,05
2151	306,00	153,00	0,05
2152	285,31	142,66	0,04
2153	266,02	133,01	0,04

ANEXO B – TABELA 30 – FLUXO DE CAIXA – ANÁLISE I.

Tabela 30. Fluxo de Caixa – Análise I.

Potência	175,94	157,64	137,38	115,60	97,94	79,67	61,57	48,87	37,57	26,58
Energia	364,39	360,23	348,11	326,26	301,60	269,32	229,88	197,22	164,03	127,14
Taxa de desconto anual	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Investimento	-R\$ 1.114.742,50	-R\$ 998.783,90	-R\$ 870.421,53	-R\$ 732.438,01	-R\$ 620.580,21	-R\$ 504.771,11	-R\$ 390.090,48	-R\$ 309.631,24	-R\$ 238.019,12	-R\$ 168.406,17
1	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
2	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
3	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
4	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
5	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
6	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
7	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
8	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
9	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
10	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
11	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
12	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
13	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
14	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
15	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
16	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
17	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
18	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
19	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
20	R\$ 21.499,26	R\$ 21.253,68	R\$ 20.538,77	R\$ 19.249,48	R\$ 17.794,54	R\$ 15.889,85	R\$ 13.562,74	R\$ 11.635,95	R\$ 9.677,59	R\$ 7.501,31
VPL	-R\$ 852.909,23	-R\$ 751.938,05	-R\$ 642.892,32	-R\$ 528.877,66	-R\$ 438.971,62	-R\$ 348.340,74	-R\$ 261.306,28	-R\$ 202.052,93	-R\$ 150.812,82	-R\$ 102.680,36
TIR	-8%	-7%	-6%	-5%	-5%	-4%	-3%	-3%	-2%	-1%

	20,09	13,20	9,98	7,03	4,95	3,49	2,46	1,73	1,22	0,86
Potência	20,09	13,20	9,98	7,03	4,95	3,49	2,46	1,73	1,22	0,86
Energia	97,15	73,77	58,73	43,94	32,70	24,20	17,80	13,01	9,43	6,76
Taxa de desconto anual	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Investimento	-R\$ 127.278,64	-R\$ 83.628,03	-R\$ 63.204,70	-R\$ 44.539,60	-R\$ 31.386,53	-R\$ 22.117,71	-R\$ 15.586,09	-R\$ 10.983,33	-R\$ 7.739,82	-R\$ 5.454,16
1	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
2	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
3	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
4	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
5	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
6	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
7	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
8	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
9	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
10	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
11	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
12	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
13	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
14	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
15	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
16	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
17	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
18	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
19	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
20	R\$ 5.731,59	R\$ 4.352,29	R\$ 3.464,96	R\$ 2.592,69	R\$ 1.929,51	R\$ 1.427,99	R\$ 1.050,48	R\$ 767,49	R\$ 556,10	R\$ 398,71
VPL	-R\$ 77.221,30	-R\$ 47.130,19	-R\$ 34.539,97	-R\$ 23.410,99	-R\$ 15.866,98	-R\$ 10.761,12	-R\$ 7.311,29	-R\$ 4.984,67	-R\$ 3.418,73	-R\$ 2.367,10
TIR	-1%	0%	1%	1%	2%	3%	3%	3%	4%	4%

**ANEXO C – TABELA 31 – CÁLCULO DA POTÊNCIA DISPONÍVEL
BASEADA NA PROJEÇÃO DE PRODUÇÃO DE METANO DE ACORDO COM O
SOFTWARE BIOGÁS – ANÁLISE II.**

Tabela 31. Cálculo da Potência disponível baseada na projeção de produção de metano de acordo com o software Biogás – Análise II.

Ano	População de Galinhas [Cabeças]	Metano [m³/mês]	Metano [m³/mês]	Potência [kW]
2013		0,00	0,00	0,00
2014	4.243.200	1.128.564,54	13.542.774,44	5035,12
2015	4.412.928	1.173.707,12	14.084.485,43	5236,53
2016	4.589.445	1.220.655,37	14.647.864,46	5445,99
2017	4.773.023	1.269.481,64	15.233.779,68	5663,83
2018	4.963.944	1.320.260,93	15.843.131,12	5890,38
2019	5.162.502	1.373.071,43	16.476.857,12	6126,00
2020	5.369.002	1.427.994,26	17.135.931,16	6371,04
2021	5.583.762	1.485.114,01	17.821.368,16	6625,88
2022	5.807.112	1.544.518,45	18.534.221,34	6890,91
2023	6.039.397	1.606.299,32	19.275.591,85	7166,55
2024	6.280.973	1.670.551,33	20.046.615,91	7453,21
2025	6.532.211	1.737.373,14	20.848.477,62	7751,34
2026	6.793.500	1.806.868,21	21.682.418,51	8061,40
2027	7.065.240	1.879.142,94	22.549.715,24	8383,85
2028	7.347.850	1.954.308,76	23.451.705,13	8719,21
2029	7.641.763	2.032.480,85	24.389.770,15	9067,97
2030	7.947.434	2.113.780,21	25.365.362,48	9430,69
2031	8.265.331	2.198.331,32	26.379.975,84	9807,92
2032	8.595.945	2.286.264,78	27.435.177,30	10200,24
2033	8.939.782	2.377.715,15	28.532.581,84	10608,25

ANEXO D – TABELA 32 – FLUXO DE CAIXA – ANÁLISE II.

Tabela 32. Fluxo de Caixa – Análise II.

Potência	10.608,25	10.200,24	9.807,92	9.430,69	9.067,97	8.719,21	8.383,85	8.061,40	7.751,34	7.453,21
Energia	59.139,22	58.906,07	58.532,43	58.029,46	57.407,66	56.676,91	55.846,51	54.925,21	53.921,22	52.842,28
Taxa de desconto anual	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%
Investimento	-R\$ 22.650.091,92	-R\$ 21.778.936,49	-R\$ 20.941.283,23	-R\$ 20.135.850,13	-R\$ 19.361.393,19	-R\$ 18.616.726,66	-R\$ 17.900.697,73	-R\$ 17.212.209,36	-R\$ 16.550.199,95	-R\$ 15.913.656,03
1	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
2	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
3	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
4	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
5	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
6	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
7	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
8	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
9	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
10	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
11	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
12	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
13	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
14	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
15	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
16	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
17	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
18	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
19	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
20	R\$ 4.671.998,24	R\$ 4.653.579,57	R\$ 4.624.062,33	R\$ 4.584.327,72	R\$ 4.535.205,14	R\$ 4.477.475,88	R\$ 4.411.874,15	R\$ 4.339.091,25	R\$ 4.259.776,40	R\$ 4.174.540,34
VPL	R\$ 8.728.142,22	R\$ 9.384.727,70	R\$ 9.943.417,23	R\$ 10.410.765,63	R\$ 10.792.975,45	R\$ 11.095.901,86	R\$ 11.325.080,98	R\$ 11.485.736,01	R\$ 11.582.799,50	R\$ 11.620.924,94
TIR	20%	21%	22%	22%	23%	24%	24%	25%	25%	26%

Potência	7.166,55	6.890,91	6.625,88	6.371,04	6.126,00	5.890,38	5.663,83	5.445,99	5.236,53	5.035,12
Energia	51.695,63	50.488,08	49.226,01	47.915,40	46.561,84	45.170,59	43.746,54	42.294,27	40.818,07	39.321,92
Taxa de desconto anual	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%
Investimento	-R\$ 15.301.992,04	-R\$ 14.713.068,01	-R\$ 14.147.181,95	-R\$ 13.603.059,76	-R\$ 13.078.865,34	-R\$ 12.576.793,02	-R\$ 12.093.070,02	-R\$ 11.627.951,46	-R\$ 11.180.722,84	-R\$ 10.750.695,04
1	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
2	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
3	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
4	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
5	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
6	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
7	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
8	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
9	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
10	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
11	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
12	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
13	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
14	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
15	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
16	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
17	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
18	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
19	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
20	R\$ 4.083.955,07	R\$ 3.988.558,35	R\$ 3.888.854,84	R\$ 3.785.316,39	R\$ 3.678.385,67	R\$ 3.568.476,59	R\$ 3.455.976,70	R\$ 3.341.247,71	R\$ 3.224.627,79	R\$ 3.106.431,85
VPL	R\$ 11.604.502,87	R\$ 11.537.672,62	R\$ 11.424.336,52	R\$ 11.268.170,27	R\$ 11.072.636,35	R\$ 10.840.993,69	R\$ 10.576.309,63	R\$ 10.281.468,13	R\$ 9.959.181,25	R\$ 9.611.995,61
TIR	26%	27%	27%	28%	28%	28%	28%	29%	29%	29%

**ANEXO E – TABELA 33 – CÁLCULO DA POTÊNCIA DISPONÍVEL BASEADA
NA PROJEÇÃO DE PRODUÇÃO DE METANO DE ACORDO COM A UNIÃO DAS
ANÁLSES I E II – ANÁLISE III.**

Tabela 33. Cálculo da Potência disponível baseada na projeção de produção de metano de acordo com a união das análises I e II – Análise III.

Ano	Metano do Aterro [m ³ /ano]	Metano do Biodigestor [m ³ /ano]	Metano Total [m ³ /ano]	Potência Aterro [kW]	Potência Biodigestor [kW]	Potência Total [kW]
2013	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2014	63.023,62	13.542.774,44	13.593.193,34	18,75	5.035,12	5053,87
2015	122.850,07	14.084.485,43	14.182.765,48	36,54	5.236,53	5273,07
2016	179.694,91	14.647.864,46	14.791.620,40	53,45	5.445,99	5499,44
2017	233.759,20	15.233.779,68	15.420.787,04	69,53	5.663,83	5733,36
2018	285.230,47	15.843.131,12	16.071.315,50	84,84	5.890,38	5975,22
2019	334.283,66	16.476.857,12	16.744.284,05	99,43	6.126,00	6225,43
2020	381.082,00	17.135.931,16	17.440.796,76	113,35	6.371,04	6484,39
2021	425.777,81	17.821.368,16	18.161.990,40	126,64	6.625,88	6752,52
2022	468.513,24	18.534.221,34	18.909.031,93	139,35	6.890,91	7030,27
2023	509.421,00	19.275.591,85	19.683.128,65	151,52	7.166,55	7318,07
2024	548.624,97	20.046.615,91	20.485.515,89	163,18	7.453,21	7616,39
2025	586.240,86	20.848.477,62	21.317.470,30	174,37	7.751,34	7925,71
2026	622.376,70	21.682.418,51	22.180.319,87	185,12	8.061,40	8246,51
2027	657.133,45	22.549.715,24	23.075.422,00	195,45	8.383,85	8579,31
2028	690.605,42	23.451.705,13	24.004.189,47	205,41	8.719,21	8924,62
2029	722.880,77	24.389.770,15	24.968.074,77	215,01	9.067,97	9282,98
2030	754.041,90	25.365.362,48	25.968.596,01	224,28	9.430,69	9654,97
2031	784.165,88	26.379.975,84	27.007.308,54	233,24	9.807,92	10041,16
2032	813.324,77	27.435.177,30	28.085.837,12	241,91	10.200,24	10442,15
2033	841.586,01	28.532.581,84	29.205.850,64	250,32	10.608,25	10858,56

ANEXO F – TABELA 34 – FLUXO DE CAIXA – ANÁLISE III.

Tabela 34. Fluxo de Caixa – Análise III.

	10858,56	10442,15	10041,16	9654,97	9282,98	8924,62	8579,31	8246,51	7925,71	7616,39
	60322,77	60084,82	59702,93	59188,01	58550,32	57799,45	56944,40	55993,56	54954,77	53835,34
Taxa de desconto anual	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%
Potência										
Energia										
Taxa de desconto anual										
Investimento	-R\$ 23.184.554,60	-R\$ 22.405.213,52	-R\$ 21.636.467,66	-R\$ 20.880.636,95	-R\$ 20.139.499,40	-R\$ 19.414.406,13	-R\$ 18.706.333,38	-R\$ 18.015.970,04	-R\$ 17.343.750,16	-R\$ 16.689.910,37
1	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
2	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
3	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
4	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
5	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
6	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
7	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
8	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
9	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
10	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
11	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
12	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
13	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
14	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
15	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
16	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
17	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
18	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
19	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
20	R\$ 4.765.499,14	R\$ 4.742.243,76	R\$ 4.708.256,96	R\$ 4.664.348,19	R\$ 4.611.274,30	R\$ 4.549.743,79	R\$ 4.480.418,08	R\$ 4.403.915,85	R\$ 4.320.813,74	R\$ 4.231.649,82
VPL	R\$ 8.831.086,31	R\$ 9.376.768,51	R\$ 9.847.058,53	R\$ 10.244.886,41	R\$ 10.573.337,52	R\$ 10.835.577,03	R\$ 11.034.811,73	R\$ 11.174.239,46	R\$ 11.257.024,51	R\$ 11.286.268,45
TIR	20%	21%	21%	22%	23%	23%	24%	24%	25%	25%

Potência	7318,07	7030,27	6752,52	6484,39	6225,43	5975,22	5733,36	5489,44	5273,07	5053,87
Energia	52642,05	51381,19	50058,59	48679,61	47249,17	45771,76	44251,48	42692,01	41096,65	39468,32
Taxa de desconto anual	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%	13,15%
Investimento	-R\$ 16.054.506,02	-R\$ 15.437.460,61	-R\$ 14.838.583,76	-R\$ 14.257.582,50	-R\$ 13.694.090,56	-R\$ 13.147.675,50	-R\$ 12.617.854,71	-R\$ 12.104.100,74	-R\$ 11.605.853,64	-R\$ 11.122.522,96
1	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
2	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
3	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
4	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
5	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
6	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
7	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
8	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
9	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
10	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
11	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
12	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
13	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
14	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
15	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
16	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
17	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
18	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
19	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
20	R\$ 4.136.923,09	R\$ 4.037.097,49	R\$ 3.932.602,78	R\$ 3.823.834,21	R\$ 3.711.155,66	R\$ 3.594.899,53	R\$ 3.475.368,40	R\$ 3.352.834,98	R\$ 3.227.543,60	R\$ 3.099.709,79
VPL	R\$ 11.264.992,54	R\$ 11.196.119,01	R\$ 11.082.460,21	R\$ 10.926.707,10	R\$ 10.731.422,22	R\$ 10.499.032,94	R\$ 10.231.827,47	R\$ 9.931.949,91	R\$ 9.601.398,45	R\$ 9.242.021,01
TIR	25%	26%	26%	27%	27%	27%	27%	27%	28%	28%