

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

**Proposta de um método escalonado para a motorização do
Aproveitamento do Biogás Gerado por Aterros Sanitários para Fins de
Geração de Energia Elétrica**

Ivan Felipe Silva dos Santos

Itajubá, Junho de 2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ (MG)
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Ivan Felipe Silva dos Santos

**Proposta de um método escalonado para a motorização do
Aproveitamento do Biogás Gerado por Aterros Sanitários para Fins de
Geração de Energia Elétrica**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Energia
como parte dos requisitos para obtenção do
título de Mestre em Ciências em
Engenharia de Energia**

**Área de concentração: Energia, Sociedade e
Meio Ambiente**

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

**Co-Orientador: Prof. Dr. Geraldo Lúcio
Tiago Filho**

Junho de 2015

Itajubá - MG
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA DE ENERGIA

Ivan Felipe Silva dos Santos

Proposta de um método escalonado para a motorização do Aproveitamento do Biogás Gerado por Aterros Sanitários para Fins de Geração de Energia Elétrica

Dissertação aprovada por banca examinadora em 08 de junho de 2015, conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em Engenharia de Energia**

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Regina Mambeli Barros (Orientador)

Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho (Co-orientador)

Prof. Dr. Rubenildo Vieira Andrade

Prof. Dr. Valdir Schalch

Itajubá 2015

AGRADECIMENTOS

Agradeço acima de todas as coisas a Deus. O Sol que nunca se põe e ilumina o meu caminhar desajeitado.

Aos meus amados pais e irmãos pelo amor, apoio e companheirismo. Vocês são raios de sol ofuscantes!

Aos meus orientadores, a Prof. Dr^a Regina Mambeli Barros e o Prof. Dr. Geraldo Lúcio Tiago Filho, com os quais tenho uma enorme dívida de gratidão por todo suporte, auxílio e incentivos.

Aos amigos que fiz durante o mestrado e que me ajudaram e alegraram muito neste tempo de estudos.

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado.

RESUMO

Os aterros sanitários caracterizam uma forma de destinação final de resíduos predominante e crescente no Brasil. Nestes, verifica-se a produção de biogás pela digestão anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos. O biogás produzido pode ser utilizado para diversos fins, dentre os quais se destaca a geração de energia elétrica por meio de motores a combustão interna ou turbinas a gás. Apesar de vantajosa em termos ambientais e de planejamento energético, a geração elétrica por meio do gás do aterro esbarra muitas vezes na inviabilidade econômico-financeira. Neste contexto, o presente trabalho objetiva definir, caracterizar e avaliar um método para planejamento do aproveitamento energético do aterro, baseado num escalonamento de potências dado pelo acréscimo de unidades geradoras ao longo da vida útil do aproveitamento, que permita a viabilização do empreendimento e a obtenção do máximo benefício econômico, sem que seja necessário diminuir excessivamente a produção energética.

Palavras chave: Aterros sanitários, biogás, geração de energia elétrica, viabilidade econômica e método de motorização.

ABSTRACT

The landfills are a form of final disposal of waste, predominant and growing in Brazil. In these, there is the production of biogas by anaerobic digestion of municipal solid waste. The biogas can be used for various purposes, chief among which is the generation of electric energy by means of engines internal combustion or gas turbines. Although advantageous in terms of the environment and energy planning, electricity generation by means of the landfill gas is often economic-financial unfeasible. In this context, the present work aims to present and evaluate a method for planning and optimization of the harnessing of energy from landfill, based on a power variation given by the addition of generating units along the life of the landfill, which would permit the viability of the project and the achievement of maximum economic benefit, without it being necessary to reduce excessively energy production.

Keywords: Landfills, Biogas, Electricity generation, economical feasibility and motorization method.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Justificativa	2
1.2. Objetivos	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1. Os Resíduos sólidos	4
2.1.1. Classificação	4
2.1.2. Propriedades dos Resíduos	5
2.1.3. O Crescimento da geração de resíduos sólidos	8
2.1.4. Opções para gestão de resíduos sólidos urbanos	12
2.1.4.1. Lixões	12
2.1.4.2. Aterros controlados	12
2.1.4.3. Aterros sanitários	14
2.1.4.4. Tratamento térmico de resíduos	14
2.1.4.5. Compostagem	16
2.1.4.6. Comparações entre as opções de gestão	19
2.1.5. Métodos para projeção do crescimento de resíduos	23
2.2. Os Aterros sanitários	26
2.2.1. Aspectos construtivos e operacionais de um aterro sanitário	26
2.2.2. Aterros sanitários no Brasil	29
2.2.3. Digestão anaeróbia	31
2.2.4. Fases da produção de gás no aterro sanitário	34
2.2.5. Sistema de coleta de gás de aterro sanitário	36
2.3. O Biogás	37
2.3.1. Definição	37
2.3.2. Possíveis utilizações do biogás	38
2.3.2. Métodos para estimativa da produção de biogás em aterros sanitários	39
2.4. Produção energética a partir do biogás	42
2.4.1. Conversão energética do biogás de aterro sanitário	42
2.4.2. Componentes necessários para a implantação de uma usina para aproveitamento energético do biogás	45
2.4.3. Custos de implantação de uma usina de aproveitamento energético de aterros sanitários	47
2.4.4. Determinação da potência teórica a ser aproveitada no aterro sanitário	48
2.4.5. Potencial Brasileiro de aproveitamento energético do biogás	50
3. METODOLOGIA	52
4. RESULTADOS	54

4.1. Definição do novo método de motorização do aproveitamento energético dos aterros sanitários	54
4.2. Aplicação do método de motorização	56
4.3. Proposta de alteração no método de Silva (2012)	63
4.4. Avaliação econômica do método escalonado e comparação dos resultados	65
4.5. Resultados do método escalonado em cenários alternativos	73
4.6. Análises de Sensibilidade	75
5. CONCLUSÕES	81
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
7. REFERÊNCIAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Geração de resíduos e relação com PIB per capita na América Latina e Caribe. Fonte: Modificado de Espinoza et al. (2010).....	9
Figura 2: Hierarquia recomendada na gestão de resíduos sólidos. Fonte: Traduzido de USEPA (2013).....	11
Figura 3: Exemplo de lixão a céu aberto. Fonte: FGM (2014).....	12
Figura 4: Esquema representativo de um aterro controlado. Fonte: Monteiro et al. (2001).....	13
Figura 5: Fases da Compostagem. Fonte: FDR (2013).....	18
Figura 6: Exemplo de aplicação dos modelos de projeção populacional.....	26
Figura 7: Crescimento dos aterros sanitários entre 2012 e 2013 no Brasil. Fonte: ABRELPE (2013).....	31
Figura 8: Fluxograma esquemático da digestão anaeróbia de RSU. Fonte: Castilhos Jr. et al. (2003).....	33
Figura 9: Variação da composição do gás produzido no aterro ao longo das diversas fases de atividade microbiológica. Fonte: Tchobanoglous et al. (1993, <i>apud</i> USEPA, 2005a).....	35
Figura 10: Sistema de coleta do biogás de aterro sanitário. (a) Sistema de extração vertical. (b) Sistema horizontal. Fonte: Mazo-Nix (s/d).....	37
Figura 11: Esquema representativo de uma usina de aproveitamento energético em um aterro sanitário.....	46
Figura 12: Exemplo da relação entre potencial aproveitado e tempo de funcionamento de uma usina de geração em aterros sanitários. Fonte: Santos et al. (2015b).....	48
Figura 13: Curvas para otimização da potência teórica de um aterro sanitário. (a) Curva de permanência da potência de gás. (b) Curva de máxima rentabilidade econômica. Fonte: Silva (2012).....	50
Figura 14: Potência de máxima produção energética.....	55
Figura 15: Escalonamento dos grupos geradores (a): Definição da potência de maior produção energética P1; (c) Potências intermediárias (P2 e P3); e (b) Implantação destas potências na curva de produção de gás do aterro.	55
Figura 16: Correlação entre resíduos e população das cidades contribuintes ao aterro no ano de 2013.....	57
Figura 17: Índice de geração de resíduos nas cidades contribuintes ao aterro no ano de 2015.	58
Figura 18: Projeção populacional e de geração de resíduos.....	58
Figura 19: Evolução temporal da potência disponível devido à combustão do gás do aterro...	60
Figura 20: Relação entre tempo de disponibilidade, potência e energia produzida.	61
Figura 21: Incremento energético da utilização de módulos geradores adicionais nos pontos de máximo incremento energético.....	62
Figura 22: Potência disponível e potência implantada para N = 7.....	62
Figura 23: Aumento da produção energética com o aumento do número de grupos geradores.	63
Figura 24: Exemplo do funcionamento do método de Silva modificado.....	64
Figura 25: Cálculo da energia a cada ano pelo método de Silva modificado, durante a fase do aproveitamento a plena carga.	65

Figura 26: Planejamento energético e disposição dos geradores no método escalonado. (a) Aplicação com três módulos geradores; (b) Aplicação com dois grupos geradores e (c) Aplicação com um único grupo gerador.	68
Figura 27: Resultados obtidos pela aplicação da metodologia de Silva (2012) e Silva modificado.	69
Figura 28: Evolução das energias E1 e E2 em função da potência no método de Silva modificado (2012).	69
Figura 29: Produção energética ao longo de toda vida útil do aterro sanitário, pelos diversos métodos de aproveitamento utilizados.	71
Figura 30: Avaliação econômica dos diversos métodos avaliados para aproveitamento energético do aterro sanitário	72
Figura 31: Custo de energia nivelada dos diversos métodos avaliados para aproveitamento energético do aterro sanitário	72
Figura 32: Deposição de sílica nos equipamentos de conversão energética. Fonte: DESOTEC (2015).	74
Figura 33: análise de sensibilidade do método escalonado com relação à tarifa de venda de energia.....	77
Figura 34: Análise de sensibilidade do VPL do método escalonado com relação à taxa de desconto.....	78
Figura 35: Análise de sensibilidade do LCOE do método escalonado com relação à taxa de desconto.....	78
Figura 36: Análise de sensibilidade do VPL do método escalonado com relação ao valor da tonelada de carbono.	79
Figura 37: Análise de sensibilidade do VPL do método de Silva (2012) (Original e modificado) com relação ao valor da tarifa de venda de energia.....	80

SIMBOLOGIA

C/N – Relação Carbono Nitrogênio

pH – Potencial Hidrogeniônico

PCI – Poder Calorífico Inferior

EBC – Empresa Brasil de Comunicação

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

W(t) – Geração anual de resíduos

P(t) – População a cada ano.

I – Índice de geração de resíduos *per capita*

d – Número de dias de geração

K_a – Constante de projeção populacional do método linear

K_g – Constante de projeção populacional do método geométrico

K_d – Constante de projeção populacional do método de crescimento decrescente

K_s – Constante de saturação

NBR – Norma Brasileira

a e c – Constantes do método de projeção populacional logístico

r – Taxa de crescimento populacional média ao longo dos anos analisados

k – Taxa de geração de metano

L₀ – Potencial de geração de metano

MSW_f – Fração de resíduos

MCF – Fator de correção de metano

OX – Fração de oxidação

DOC – Carbono orgânico degradável

DOC_f – Fração do DOC degradado

A - Percentual de papel e têxtil no RSU

B – Percentual de poda, jardim e outros tipos de MO Putrescível (exceto restos de comida) presente no RSU

C - Percentual de restos de comida no RSU

D - Percentual de madeira ou palha no RSU

P_{dis} – Potência disponível

P – Potência instalada

η – Rendimento da tecnologia de conversão energética

E_c – Eficiência de coleta

$Q_{gás}$ – Vazão de biogás

N_D – Número de drenos

A_A – Área do aterro

r – Raio de abrangência de cada dreno

C_{un} – Custo unitário

C_{om} – Custo de operação e manutenção

E – Energia

ΔE – Incremento energético correspondente a adição da operação de um novo grupo gerador.

ρ – Permanência da vazão de biogás

T – Tarifa de venda de energia

i – Taxa de desconto

C_{MCI} – Custo unitário por kW do motor de combustão interna

C_{TUB} – Custo unitário por m da tubulação de transporte do gás

C_{CMP} – Custo unitário por m^3/hr do compressor

C_{QMD} – Custo de um queimador

C_{GSM} – Custo unitário por m^3 do gasômetro

F_{ev} – Fator de emissão evitada

V_c – Valor da tonelada do crédito de carbono

f_1 – Fator de equivalência entre o potencial de aquecimento global do CH_4 e CO_2

E_{queima} – Eficiência da combustão no queimador

C_{queima} – Créditos de carbono obtidos devido à queima do biogás

$C_{\text{geração}}$ – Créditos de carbono obtidos devido à geração de eletricidade

N – Número de unidades geradoras

Δt – Tempo de operação das unidades geradoras

n – Tempo em anos (Notação adotada somente para os parâmetros de viabilidade econômica)

t – Tempo em anos

VPL – Valor presente líquido

LCOE – Custo de energia nivelada

1. Introdução

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010) classificam os resíduos sólidos como o material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível, e estabelece uma distinção entre resíduos e rejeitos, sendo os rejeitos os resíduos sólidos que depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

No Brasil a alternativa mais utilizada para disposição de resíduos são os aterros sanitários. O uso de aterros sanitários constitui uma forma barata de disposição de resíduos e, no cenário Brasileiro, é a forma de disposição com maior tendência ao crescimento nos próximos anos devido à política nacional de resíduos sólidos que prevê a eliminação dos lixões no Brasil.

Com o aumento do número de aterros sanitários tem-se uma oportunidade excelente de desenvolvimento de aproveitamentos energéticos descentralizados, por meio da combustão do biogás gerado pela digestão anaeróbia dos resíduos orgânicos do aterro. A disposição de resíduos em aterros sanitários, apesar de a mais barata, não é a mais eficaz em termos ambientais e requer grandes áreas, sendo que o uso energético do biogás dos aterros diminui os passivos ambientais gerados pelo aterro (LEME et al., 2014). Contudo, empreendimentos de geração de energia em aterros podem se tornar caros, e a viabilidade econômica destes nem sempre é assegurada. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é definir e avaliar um método para a utilização de motogeradores para o aproveitamento energético do gás de aterro, considerando-se a viabilidade econômica do empreendimento.

1.1. Justificativa

Em face da necessidade de diminuição do consumo de combustíveis fósseis devido ao esgotamento das reservas e a emissão de gases de efeito estufa e do fato da produção energética ser um limitante ao desenvolvimento econômico, o uso de fontes limpas e renováveis de energia deve ser incentivado, pesquisado e desenvolvido. Além disso, a principal forma de disposição de resíduos sólidos no Brasil é através de aterros sanitários. Entretanto, o aproveitamento energético do biogás produzido nestes aterros depende da viabilidade econômica e financeira, sendo que em algumas vezes o biogás produzido é queimado sem que nenhuma utilização deste seja feita. Barros et al. (2014) estimou que a instalação de usinas termelétricas em aterros se tornam viáveis a partir de uma população de 200.000 habitantes, sendo que estas podem atingir uma produção energética de até 450000 [tep] em 2030. Neste contexto, o projeto proposto se torna importante por desenvolver e avaliar um método padronizado para utilização do biogás em motores de combustão interna (sendo que a literatura sobre tal metodologia é escassa), objetivando a viabilização de empreendimentos energéticos em aterros de populações menores, ampliando o aproveitamento do potencial de produção de energia destes, o que resultará em um aumento da matriz energética renovável brasileira.

1.2. Objetivos

Os objetivos gerais do presente trabalho são: definir e avaliar um método escalonado (onde a potência instalada varia ao longo do tempo) para a operação de geradores durante o aproveitamento energético do biogás gerado em aterros sanitários com vista a uma maximização da rentabilidade do empreendimento e padronização de uma metodologia para definição da capacidade instalada do aterro.

Para que se possam atingir os objetivos gerais propõe-se os seguintes objetivos específicos:

- Definição da metodologia de motorização;

- Aplicação ao aproveitamento energético do biogás do aterro em uma cidade específica;
- Cálculos energéticos e econômicos do aproveitamento deste biogás;
- Comparação da metodologia proposta no presente trabalho com a metodologia que adapta o método do máximo benéfico líquido usado em centrais hidrelétricas ao caso do aterro sanitário, conforme apresentado por Silva (2012).

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Os Resíduos sólidos

2.1.1. Classificação

A Lei Nº 12.305, que estabelece a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS/Brasil, 2010) classifica os resíduos com relação à origem e a periculosidade, conforme a seguir:

I) Quanto à origem:

- a) Resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) Resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) Resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas *a* e *b*;
- d) Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas *b*, *e*, *g*, *h* e *j*;
- e) Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea *c*;
- f) Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional do Meio ambiente (SISNAMA) e da Agência Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS);
- h) Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;
- i) Resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) Resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira; e
- k) Resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios.

II) Quanto a Periculosidade:

Quanto à periculosidade, a PNRS/Brasil (2010) classifica os resíduos em:

- a) Resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- b) Resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea *a*.

Por sua vez, os resíduos não perigosos podem ser classificados em dois grupos (PNRS/Brasil, 2010)

- a) Não Inertes: Que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B – Inertes. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
- b) Inertes: São quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente 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 10.004/2004 (ABNT, 2004).

2.1.2. Propriedades dos Resíduos

As principais propriedades físicas e químicas dos resíduos sólidos, conforme listada apresentada por Barros (2012), estão apresentadas nas tabelas 1 e 2.

Tabela 1: Propriedades físicas dos resíduos sólidos. Fonte: Compilado com base em Barros (2012)

Propriedades físicas	Definição
Teor de umidade	O teor de umidade de resíduos sólidos exibe papel fundamental da velocidade de degradação aeróbia ou anaeróbia. Este reflete o percentual, em peso, de água em uma amostra de resíduo sólido.
Composição Gravimétrica	A composição gravimétrica reflete os valores percentuais (em peso) dos diferentes componentes dos resíduos sólidos em uma amostra dos mesmos. Estes componentes podem ser apresentados de modo geral (p. ex. plásticos) ou de modo mais detalhado (plástico mole, duro, etc.), dependendo do nível de detalhamento requerido pelo estudo.
Peso específico aparente	O peso específico aparente consiste na relação entre o peso de resíduo (em kg) não compactado, ou seja, livre, solto, em relação ao volume que ocupa (em m ³), resultando em uma variável de unidade, kg/m ³ . Possui importância para o dimensionamento de equipamentos de coleta e transporte de resíduos, devido à resistência mecânica associada.
Compressividade	A compressividade traduz 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.

Tabela 2: Propriedades químicas dos resíduos sólidos. Fonte: Compilado com base em Barros (2012)

Propriedades químicas	Definição
Proporção Carbono/Nitrogênio (C/N)	Expressa o grau de decomposição de determinada massa de resíduos, quer seja em condições aeróbias, quer seja em condições anaeróbias, ou seja, em uma compostagem ou em deposição em aterros sanitários. Isto se dá em razão de que as magnitudes de Carbono e Nitrogênio são metabolizadas em proporções diferentes.
Poder Calorífico Inferior (PCI)	Traduz a energia (na forma de calor, não contando a energia necessária a vaporização da umidade dos resíduos), que dada massa de resíduos irá desprender ao ser submetido a um processo térmico, como por exemplo, a incineração. Varia com a composição dos resíduos.
Potencial Hidrogeniônico (pH)	Equivale à concentração de íons de H^+ e traduz se o ambiente da massa de resíduos é ácido ($pH < 7$), neutro ($pH = 7$) ou alcalino ($pH > 7$), estando intimamente ligado as atividades microbiológicas de degradação.
Composição Química	Muito importante para processos biológicos de tratamento, uma vez que compreende as análises da presença de macro e micronutrientes, fundamentais para os metabolismos dos micro-organismos durante a degradação da matéria orgânica. Esta degradação pode se

Tabela 2: Propriedades químicas dos resíduos sólidos. Fonte: Compilado com base em Barros (2012)

	dar por processos oxidativos (Nitrato, Oxigênio, etc. que recebem elétrons) ou fermentativos (nos quais ocorrem rearranjos de elétrons).
--	--

2.1.3. O Crescimento da geração de resíduos sólidos

O constante crescimento das populações urbanas com todas suas demandas, a forte industrialização, a melhoria no poder aquisitivo dos povos de uma forma geral, vêm promovendo a aceleração na geração de grandes volumes de resíduos sólidos, principalmente, ao redor das grandes cidades (BIDONE e POVINELLI, 1999). Este crescimento se reflete nas estimativas do Hoornweg e Bhada-Tata (2012), que prognosticaram uma geração atual de RSU é de aproximadamente 1,3 bilhões de toneladas/ano, sendo a expectativa de crescimento para aproximadamente 2,2 bilhões de toneladas anuais, para 2025.

A geração de resíduos está relacionada (além do crescimento populacional) também com o poderio econômico da população. Ainda segundo estimativas do Hoornweg e Bhada-Tata (2012), 44% dos RSU são gerados nos 34 países desenvolvidos participantes da Organização para cooperação e desenvolvimento econômico (OECD, sigla em inglês). A taxa de geração média *per capita* nestes países é em torno de 2,2 [kg/hb.dia] que contrasta com valores de 0,65 [kg/hb.dia] na África. A relação entre renda e geração de resíduos também pode ser observada na figura 1, que compara o PIB per capita [em US\$/hab] com a geração de resíduos sólidos domésticos (RSD) e Urbanos (RSU) em países da América Latina demonstrando claramente uma tendência do crescimento da geração de resíduos com o aumento do PIB.

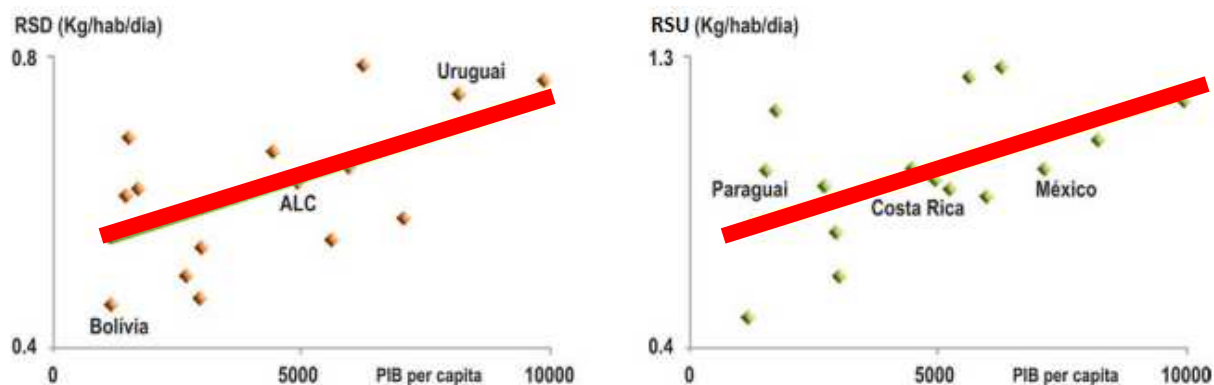


Figura 1: Geração de resíduos e relação com PIB per capita na América Latina e Caribe.

Fonte: Modificado de Espinoza et al. (2010).

Na Índia, devido o crescimento populacional e a alteração da qualidade de vida nas regiões urbanas (KALYANYA e PANDEY, 2014), houve, desde 2001, em uma década, um crescimento de 50% dos resíduos gerados. A geração per capita também cresceu de 0,44 a 0,5 [kg/hb.dia] (ANNEPU, 2012). A geração de resíduos também tem sido crescente no Brasil. A tabela 3, Elaborada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea, 2012a) apresenta o crescimento do número de toneladas de resíduos domiciliares enviadas diariamente para disposição final no Brasil, demonstrando um crescimento absoluto próximo a 35 %, entre 2000 e 2008. O crescimento relativo, em termos de geração per capita, também cresceu por volta de 20 %. Este crescimento da geração de resíduos também pode ser verificado, em anos mais recentes, em estimativas da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013), que reportou um crescimento de 201.058 para 209.280 [t/dia] (4,3%) na geração de RSU entre 2012 e 2013. No mesmo período a população Brasileira cresceu 0,9% (EBC, 2013), o que demonstra um crescimento da geração de resíduos superior ao populacional.

Tabela 3: Comparação da geração de resíduos no Brasil entre 2000 e 2008. Elaborada por Ipea (2012a), com base em dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Unidade de Análise	Quantidade de resíduos encaminhados para destinação final (t/d)		Per capita [kg/hb.dia]	
	2000	2008	2000	2008
Brasil	140.080	188.815	1	1,2
Norte	10.929	14.229,2	1,2	1,3
Nordeste	33.876,7	55.723,2	1	1,4
Sudeste	67.656,1	84.227	1	1,1
Sul	16.893,2	21.919,3	0,8	0,9
Centro-Oeste	10.725	12.706,2	1,1	1

Apesar de relacionado com o desenvolvimento econômico, o crescimento de geração de resíduos acarreta problemas que implicam em impactos socioeconômicos e ambientais, tais como: maior consumo de energia para tratamento e disposição, maior necessidade de área, gastos mais elevados, prejuízos para a saúde pública e meio ambiente quando os resíduos são dispostos de modo inadequado, etc. Além disto, como afirmam Johari et al. (2012), o gerenciamento dos resíduos domésticos está entre os principais desafios das economias em crescimento, ao lado de problemas globais, como a emissão de gases de efeito estufa. Estes fatores demonstram a necessidade de uma gestão eficiente de resíduos, que auxilie a combinação da solução da problemática da diminuição de geração e disposição adequada de resíduos e mantenha o desenvolvimento econômico.

A fim de auxiliar o gerenciamento sustentável de resíduos sólidos, a Agência Americana de Proteção Ambiental (Em inglês: *United States Environmental Protection Agency*, ou USEPA, 2013), apresenta uma hierarquia de ações preferenciais de gestão de resíduos não perigosos (Figura 2). Segundo esta hierarquia, a redução e a reutilização (que permite a economia de matéria prima e a diminuição do volume de resíduos a serem tratados), é a ação preferencial na gestão sustentável de resíduos, sendo o tratamento e disposição final na natureza, a ação menos indicada. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010) caminha no mesmo sentido, e estabelece em seus

planos de gestão integrada de resíduos metas de redução, reutilização, coleta seletiva e reciclagem, entre outras, com vistas a reduzir a quantidade de rejeitos encaminhados para disposição final ambientalmente adequada.

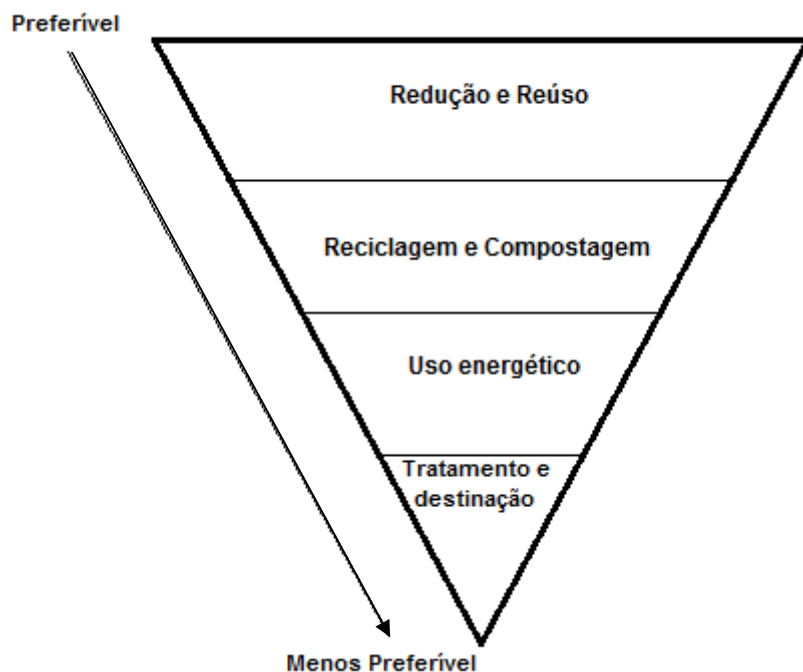


Figura 2: Hierarquia recomendada na gestão de resíduos sólidos. Fonte: Traduzido de USEPA (2013).

No Brasil, o Plano Nacional de Gestão de Resíduos Sólidos (2011) estabelece algumas estratégias para a redução da geração de resíduos, a saber: i) Varejo e consumo sustentáveis; ii) Agenda Ambiental na Administração pública; iii) Educação para o consumo sustentável; iv) Aumento da reciclagem de resíduos; v) Compras públicas sustentáveis; vi) Promoção de iniciativas voltadas à construção sustentável; vii) Incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos; viii) Divulgação e consolidação de conceitos e ix) Rotulagem e análise de ciclos de vida como orientação de consumo responsável.

2.1.4. Opções para gestão de resíduos sólidos urbanos

2.1.4.1. Lixões

No Lixão (ou Vazadouro, como também pode ser denominado o lixão – Figura 3) não existe nenhum controle quanto aos tipos de resíduos depositados e quanto ao local de disposição dos mesmos. Nesses casos, resíduos domiciliares e comerciais de baixa periculosidade são depositados juntamente com os industriais e hospitalares, de alto poder poluidor. Neste ambiente, podem ocorrer outros problemas, como, por exemplo, a presença de animais (como urubus ou até mesmo criações de porcos), a presença de catadores (que na maioria dos casos residem no local), além de riscos de incêndios causados pelos gases gerados pela decomposição dos resíduos e de escorregamentos, quando da formação de pilhas muito íngremes, sem critérios técnicos (UNESP, 2001). Devido as suas características como ausência de controle e alto risco ambiental os lixões estão proibidos de serem construídos no Brasil e caracterizam uma antiga opção de gestão de resíduos sólidos que não deve mais ser considerada.



Figura 3: Exemplo de lixão a céu aberto. Fonte: FGM (2014).

2.1.4.2. Aterros controlados

Segundo a norma ABNT/NBR 8849 (ABNT, 1985) os aterros controlados constituem uma técnica de disposição de RSU no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e sua segurança, minimizando os impactos ambientais, que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho.

Esta forma de disposição produz, em geral, poluição localizada, pois similarmente ao aterro sanitário, a extensão da área de disposição é minimizada. Porém, geralmente não dispõe de impermeabilização de base (comprometendo a qualidade das águas subterrâneas), nem sistemas de tratamento de chorume ou de dispersão dos gases gerados. Este método é preferível ao lixão, mas, devido aos problemas ambientais que causa e aos seus custos de operação, a qualidade é inferior ao aterro sanitário (BIBLIOTECA VIRTUAL DO AMAZONAS, 2015).

A figura 4 apresenta uma representação esquemática de um aterro controlado. Estes são utilizados para cidades que recebam até 50 [t/dia] de resíduos, sendo recomendado que apresentem no mínimo 3 metros de distância até a zona saturada do solo (MONTEIRO et al., 2001).

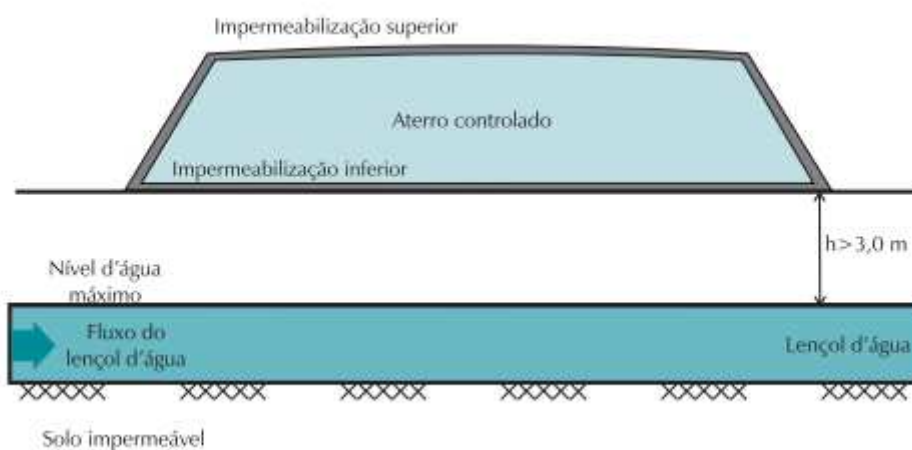


Figura 4: Esquema representativo de um aterro controlado. Fonte: Monteiro et al. (2001).

2.1.4.3. Aterros sanitários

O aterro sanitário é um aprimoramento de uma das técnicas mais antigas utilizadas pelo homem para descarte de seus resíduos, que é o aterramento. Modernamente, é uma obra de engenharia que tem por objetivo acomodar no solo resíduos no menor espaço possível, causando o menor dano possível ao meio ambiente ou à saúde pública. Esta técnica consiste basicamente, na compactação dos resíduos no solo, na forma de camadas que são periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte (CETESB, 2015). De modo simplificado, um aterro de resíduos sólidos pode ser considerado um reator biológico onde as principais entradas são, os resíduos e a água e as principais saídas são os gases (mistura gasosa que caracteriza o biogás) e o chorume (MINISTÉRIO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE - MMA, 2014). Os aterros sanitários são preferíveis aos lixões e aterros controlados. Estas estruturas são discutidas de modo mais detalhado na seção 3.2.

2.1.4.4. Tratamento térmico de resíduos

As usinas de tratamento térmico de RSU, com geração de energia elétrica, podem reduzir o volume de resíduo municipal em aproximadamente 80%. A qualidade da queima do resíduo depende naturalmente, do poder calorífico do combustível, neste caso, do poder calorífico dos resíduos sólidos municipais, e dos parâmetros de combustão (FEAM, 2010). Dentre os tipos de tratamentos térmicos pode-se citar: a incineração, a gaseificação e a pirólise.

Conforme descrito por Barros (2012), a incineração é uma tecnologia de tratamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU), por meio da combustão destes na presença de oxigênio e combustível auxiliar, em um sistema fechado, do qual resultam sólidos (cinzas), gases e líquidos. Dentre as vantagens da incineração, estão: eficiência na redução dos volumes dos resíduos, diminuição do trajeto de veículos transportadores de resíduos pela implantação da planta de incineração em locais estratégicos (o que dificilmente pode ser feito com um aterro sanitário, devido às restrições de área), as cinzas geradas pelo processo de combustão podem ser reutilizadas, diminuindo a área necessária no aterro e possibilidade de geração de energia pela combustão dos resíduos. Contudo, as plantas

de incineração requerem alto custo de capital e de operação e manutenção e mão de obra especializada (BANCO MUNDIAL, 1999).

Outros processos térmicos para tratamento de resíduos são a gaseificação e a pirólise. Ambos ocorrem em reatores. A primeira consiste na degradação térmica dos resíduos em condições pobres de oxigênio (menores que as condições estequiométricas de combustão), criando assim o chamado gás de síntese (LAMERS et al., 2013) ou mais adequadamente, gás pobre (Andrade, 2015). Já a pirólise é um processo formado por uma série de reações complexas, iniciadas com o aquecimento do material (de 400 a 800 °C), na ausência de oxigênio, para produzir vapores condensáveis e não condensáveis e outros resíduos. O calor fragmenta a estrutura molecular dos resíduos, liberando compostos de carbono na forma líquida, sólida e gasosa, que poderão ser utilizados como combustíveis (FEAM, 2010). A tabela 4 apresenta, de modo resumido, as diferenças entre a gaseificação e pirólise.

Tabela 4: Principais características dos tratamentos térmicos dos resíduos sólidos.

Fonte: Adaptado de Arena e Mastellone (2009, *apud* Arena 2012).

	Gaseificação	Pirólise
Objetivo do processo	Maximizar conversão dos resíduos em gases com poder calorífico, principalmente CO, H ₂ e CH ₄	Maximizar decomposição térmica dos resíduos em gases e condensados
Condições de operação	Ambiente redutor (quantidade de oxidante abaixo da estequiométrica)	Ambiente sem presença de oxidante
Gases reagentes	Ar, Oxigênio Puro, Oxigênio enriquecido e vapor.	Nenhum
Temperatura	Entre 550-900 °C ou 1000-1600 °C	Entre 500 e 800 °C.
Pressão	Atmosférica ou pressurizado	Ligeiro excesso de pressão
Gases Produzidos	CO, H ₂ , CH ₄ , H ₂ O e CO ₂	CO, H ₂ , CH ₄ e outros hidrocarbonetos.
Gases Poluentes	H ₂ S, HCl, Particulados, NH ₃ , HCN,	H ₂ S, HCl, Particulados,

Tabela 4: Principais características dos tratamentos térmicos dos resíduos sólidos.

Fonte: Adaptado de Arena e Mastellone (2009, *apud* Arena 2012).

	dentre outros.	NH ₃ , HCN, dentre outros.
Cinzas	Cinzas podem ser tratadas para recuperação de matérias ferrosos (aço e ferro), não ferrosos (alumínio, cobre e zinco) e materiais inertes (Que podem eventualmente ser reutilizados como material de construção sustentável). As cinzas são freqüentemente produzidas como escórias vítreas e podem ser utilizadas como material de preenchimento de estradas	Freqüentemente, possuem teor de carbono que não pode ser desprezado. Devem ser tratadas e dispostas como um resíduo industrial especial.

Segundo Paolucci et al. (2010), a gaseificação poderia exercer um papel importante no tratamento de resíduos sólidos municipais. Entretanto, os autores (*op. cit.*) mencionaram que a grande variação da composição dos resíduos e as diferenças dos tamanhos dos componentes minerais, dificultam a utilização destes em tecnologias de gaseificação, sendo necessário ainda, um aumento da proporção entre resíduos secos e úmidos. Para solução destes problemas os autores (*op. cit.*) indicam ações como coleta seletiva dos resíduos ou mistura dos resíduos com resíduos industriais não perigosos e de elevado poder calorífico.

2.1.4.5. Compostagem

A compostagem é um processo natural de transformação dos materiais orgânicos (aqueles que possuem predominantemente carbono em sua estrutura), de origem vegetal e animal (COOPER et al., 2010). Ainda segundo Cooper et al. (2010), são empregadas neste processo técnicas de controle que procuram fomentar a atividade microbiológica de agentes como: fungos, bactérias, etc., a fim de que se obtenha em menor tempo possível, a decomposição do material grosseiro dos resíduos agroindústrias e domésticos em material estável, rico em húmus, nutrientes minerais e microorganismos

desejáveis, com atributos físicos, químicos e biológicos de alta qualidade, principalmente, sob o aspecto agronômico.

Segundo Freire et al. (2010) três são os tipos básicos de compostagem: i) natural: em que os resíduos são dispostos sobre o solo em leiras com dimensões predefinidas e faz-se um processo periódico de revolvimento e umidificação. ii) Aeração forçada: Também nas leiras, sem revolvimento do material, colocando a massa a ser compostada sobre um sistema de tubulação perfurada pela qual se fará a aeração da pilha de resíduos; e, iii) Reator Biológico: consiste na colocação da massa de resíduos a ser compostada em um reator biológico, fechado, que permite controlar os parâmetros sem interferência do ambiente externo. Nestes, pode-se acelerar a primeira fase do processo, reduzindo a fase inicial, variando o tempo de retenção do material nos reatores de 7 a 20 dias, reduzindo o tempo total para cerca de 70 a 80 dias

Embora a decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos possa ser feita por processos aeróbios e anaeróbios, a compostagem é o processo de decomposição da matéria orgânica por meio da digestão aeróbia. Por se tratar de processo biológico, requer um balanceamento adequado da relação Carbono – Nitrogênio (C/N) e determinadas condições de temperatura, umidade e aeração em seus diversos estágios (FREIRE et al., 2010). As diversas fases da compostagem, nas quais há variação da relação C/N, estão apresentadas na figura 5.

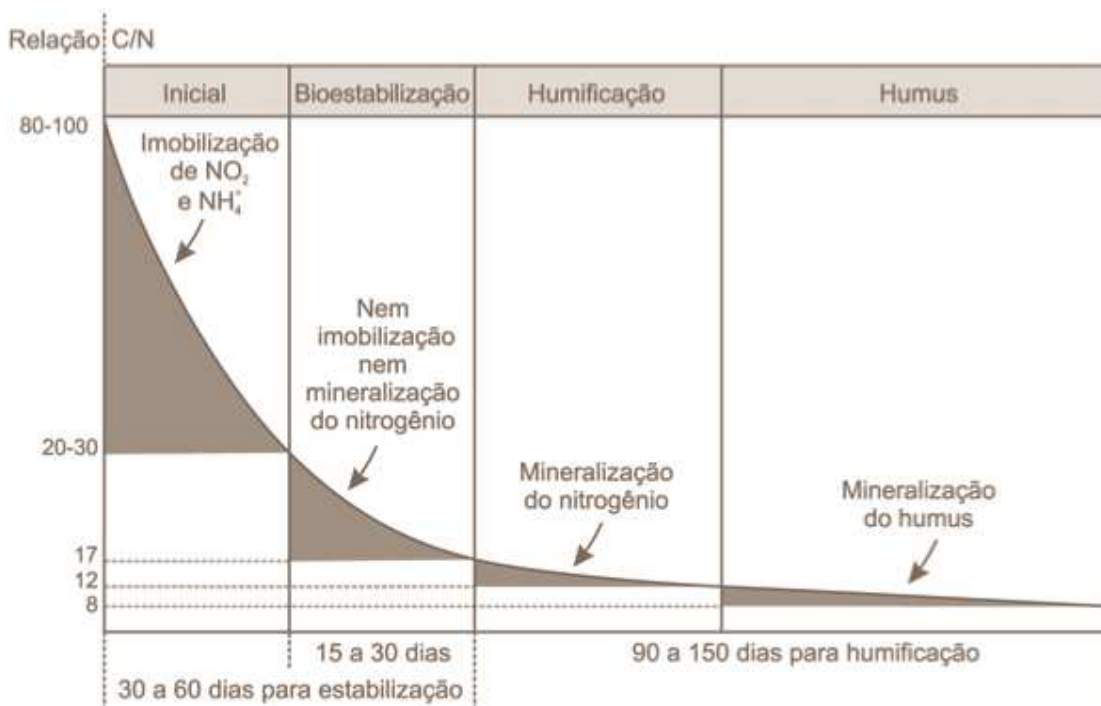


Figura 5: Fases da Compostagem. Fonte: FDR (2013).

Na compostagem de resíduos heterogêneos, a exemplo da fração orgânica dos RSU, não há grande necessidade de adicionar materiais auxiliares ao processo, porém sua adição, na maioria dos casos, auxilia o processo; (ALMEIDA et al., 2012). Apesar de acarretar vários benefícios, alguns cuidados devem ser tomados com as usinas de compostagem a fim de se prevenir os riscos que estas podem infligir a saúde humana, como demonstra a tabela 5 (DOMINGO E NADAL, 2009).

Tabela 5: Recomendações para prevenção dos riscos a saúde humana em usinas de compostagens. Fonte: Domingo e Natal (2009).

População Potencialmente afetada	Riscos a saúde	Recomendações
Funcionários das usinas	Riscos biológicos: Bactérias (Principalmente <i>Gram</i> negativa), Fungos, Endotoxinas, Protozoários parasitas. Riscos químicos: Compostos	Controle exaustivo dos riscos biológicos Medição da concentração de microorganismos na compostagem e no ar no interior do composto Monitoramento de compostos

Tabela 5: Recomendações para prevenção dos riscos a saúde humana em usinas de compostagens. Fonte: Domingo e Natal (2009).

	orgânicos voláteis (COVs) – Principalmente Benzeno.	orgânicos voláteis nos trabalhadores Medidas de proteção para evitar a exposição a compostos orgânicos voláteis e bioagentes
Indivíduos que não são funcionários expostos	Metais (principalmente As, Cd, Cr, Hg, Ni, Pb), Pesticidas, Poluentes orgânicos, Microorganismos, etc.	Monitorização de microorganismos e compostos orgânicos voláteis no redor do reator Análise periódica do adubo a fim de rejeitar porções do composto com concentrações de agentes químicos ou biológicos que podem implicar em danos a saúde humana

A compostagem também pode ser realizada de modo anaeróbio em biodigestores fechados. Nestes são dispostos a fração orgânica dos RSU e verifica-se a produção de biogás por meio da digestão anaeróbia desta fração (Vide seção 3.2.3). Segundo Verma (2002), até 2002 existiam digestores comerciais disponíveis com capacidade variável entre 70 e 5000 m³, sendo os digestores menores capazes de produzir biogás para seu aquecimento próprio e os maiores capazes de produzir uma quantidade de gás suficiente para uma potência superior a 2 [MW] de energia elétrica. Ainda segundo Verma (2002), o campo principal desta tecnologia é a Europa, sobretudo Dinamarca e Alemanha. De acordo com De Baere e Mattheeuws (2013), nenhuma outra tecnologia de tratamento de resíduos tem um potencial de crescimento tão amplo como esta, sendo que até 2015 as plantas de compostagem de países como Holanda e Bélgica terão a digestão anaeróbia como seu principal processo de tratamento.

2.1.4.6. Comparações entre as opções de gestão

Lou e Nair (2009) revisaram a literatura sobre as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do aterramento e compostagem. Segundo estes autores, de modo geral as emissões de GEE dos aterros sanitários tendem a ser mais elevadas do que as da

compostagem devido à formação de metano (CH_4 , gás de potencial de aquecimento global 23 vezes superior ao dióxido de carbono) nestes ambientes. Contudo, dependendo das práticas de operação, as emissões do aterro podem vir a ser inferiores as das usinas de compostagem.

Análises ambientais, econômicas e de ciclo de vida (ACV) demonstram ainda que a incineração produza mais energia por unidade de resíduos e apresentam um menor nível de emissões de GEE do que os aterros sanitários, sendo que as emissões dos aterros podem ser diminuídas no caso do aproveitamento do biogás para geração de energia elétrica, especialmente quando se utilizam turbinas a gás. Contudo, os custos da incineração e o potencial com relação à toxicidade humana são mais elevados que o dos aterros (DONG et al., 2014; LEME et al., 2014; TAN et al., 2014).

Uma comparação detalhada, contendo vantagens e desvantagens entre três das opções de gestão de resíduos sólidos, a saber: Os aterros sanitários, os biodigestores anaeróbios e a incineração, estão apresentados na tabela 6 (CPHEEO, 2000 *apud* KALYANI e PANDEY, 2014). Os custos, por tonelada de resíduo destinada, para as principais opções de disposição e tratamento dos resíduos também são comparados na tabela 7. Por meio das tabelas 6 e 7 observa-se que os lixões são a opção mais barata de destinação final, sendo contudo extremamente inapropriados. A digestão anaeróbia apresenta vantagens mais impactantes que os aterros sanitários (menor área, mais eficiência, melhor controle, etc.), mas podem vir a ser mais dispendiosas. O custo também é um dos empecilhos para desenvolvimento de incineradores de RSU, bem como as emissões vinculadas ao processo de incineração que devem ser cuidadosamente tratadas.

Tabela 6: Comparação entre digestão anaeróbia, aterros sanitários e incineração. Fonte: Traduzido de CPHEEO (2000 *apud* Kalyani e Pandey, 2014).

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Digestão	<ul style="list-style-type: none"> *Produção de energia e de solo rico *Não requer energia para peneiramento da pilha de resíduos *Controle das emissões de GEE – 	<ul style="list-style-type: none"> *Inviável para resíduos com baixo teor de material orgânico *Requer coleta seletiva

Tabela 6: Comparação entre digestão anaeróbia, aterros sanitários e incineração. Fonte:
Traduzido de CPHEEO (2000 *apud* Kalyani e Pandey, 2014).

anaeróbia	<p>Sistema fechado auxilia captura de gás</p> <ul style="list-style-type: none"> *Ausência de mau odor, moscas, roedores e resistência social *Menor requerimento de área *Pode ser realizado em pequena escala *Produção biogás e consequentemente energia 	
Aterros sanitários com coleta de gás	<ul style="list-style-type: none"> *Opção mais barata *Possibilidade de geração de energia *Não há necessidade de mão de obra especializada *Resíduos decompostos no solo – retorno do recurso natural 	<ul style="list-style-type: none"> *Escoamento superficial devido à chuva pode acarretar impactos *Solo e aquíferos podem ser contaminados pelo lixiviado *Captura de apenas 30 – 40% do gás produzido *Grande requerimento de área *Riscos de explosões caso ocorra escapamento de gás *Custo de tratamento do lixiviado
Incineração	<ul style="list-style-type: none"> *Mais adequado para resíduos de elevado poder calorífico * Usinas podem apresentar alto rendimento e taxa de alimentação *Produção de energia térmica ou elétrica * Nível baixo de ruídos e odores 	<ul style="list-style-type: none"> *Pouco indicada para resíduos úmidos, de baixo poder calorífico ou compostos clorados * Presença de materiais tóxicos nas cinzas *Emissão de particulados,

Tabela 6: Comparação entre digestão anaeróbia, aterros sanitários e incineração. Fonte: Traduzido de CPHEEO (2000 *apud* Kalyani e Pandey, 2014).

	<p>*Requer pouca área</p> <p>*Pode ser implantada de modo localizado, nos limites da cidade, o que reduz custos e emissões dos veículos de transporte</p> <p>* Opção Higiênica</p>	<p>SOx, NOx, compostos clorados (até mesmo a dioxina e furanos – carcinogênicos).</p> <p>*Altos custos de capital e de operação e manutenção</p> <p>*Requer mão de obra qualificada</p>
--	--	---

Tabela 7: Uma comparação entre os custos das diversas opções de disposição dos resíduos sólidos. Fonte: Traduzido de Hoornweg e Bhada-Tata (2012)

	Países de baixa renda	Países de renda inferior a média	Países de renda superior a média	Países de alta renda
Renda per capita [US\$/hab].	< 876	876 – 3.465	3.466 – 10.725	> 10.725
Eficiência de coleta de resíduos	43%	68%	85%	98%
Custos* [US\$/tonelada]				
Coleta	20 – 50	30 - 75	40 - 90	85 – 250
Aterros Sanitários	10 - 30	15 - 40	25 - 65	40 – 100
Lixões	2 – 8	3 - 10	-	-
Compostagem	5 - 30	10 - 40	20 - 75	35 – 90
Incineração	-	40 - 100	60 - 150	70 – 200
Digestão anaeróbia em bioreatores (Com venda de energia)	-	20 - 80	50 - 100	65 -150

Tabela 7: Uma comparação entre os custos das diversas opções de disposição dos resíduos sólidos. Fonte: Traduzido de Hoornweg e Bhada-Tata (2012)

produzida pelo biogás)				
*Cotação do Dólar no dia da confecção da tabela (22/02/2015): 2,86 R\$.				

2.1.5. Métodos para projeção do crescimento de resíduos

A projeção da quantidade de RSU é de fundamental importância para as diversas etapas do gerenciamento do RSU, uma vez que os projetos são objeto de uma vida útil de 20 a 30 anos (BARROS, 2012). Sha’Ato et al. (2007) argumentam que os fatores críticos para projeções do volume futuro de resíduos são: população atual da cidade, taxa de crescimento populacional e índice de geração per capita. Todos estes fatores são considerados na equação 1.

$$W(t) = P(t).I(t).d \quad (1)$$

Onde: $W(t)$ = massa de resíduos gerada no ano t , $P(t)$ = população do ano t , $I(t)$ = índice de geração de resíduos no ano t [kg/hab.dia] e d = número de dias no ano t .

O crescimento do índice de geração per capita cresce ou decresce a cada ano em função de variáveis como crescimento econômico do país, eficiência na redução da geração de resíduos, etc. Barros (2012) sugere a utilização do crescimento de 1 % a cada ano para projeções futuras.

Para a projeção populacional podem ser usados diversos modelos matemáticos. Quasin (1999) apresenta uma série métodos de projeção em função somente do histórico populacional local ($[P_0, t_0]$, $[P_1, t_1]$, $[P_2, t_2]$). Estes são explicados nas seções a seguir e, um exemplo de aplicação dos mesmos, são apresentados na figura 6 (Com exceção do modelo de Sha’Ato et al. 2007) a uma cidade hipotética de população de 50.000 habitantes em 1990, 75.000 habitantes em 2000 e 85.000 habitantes em 2010.

i) Modelo aritmético

Este modelo assume que a população P cresce a uma taxa constante, igual à taxa de crescimento entre os dois últimos anos de dados. Este é geralmente utilizado para estimativas curtas (1 – 5 anos). A equação 2 apresenta a estimativa do crescimento populacional. A constante K_a é a constante de proporcionalidade, representa a taxa de crescimento populacional entre os dois últimos anos do histórico populacional e pode ser calculada pela equação 3 (QUASIN,1999).

$$P(t) = K_a(t - t_2) \quad (2)$$

$$K_a = \frac{P_2 - P_1}{t_2 - t_1} \quad (3)$$

ii) Modelo geométrico

O modelo geométrico admite que a população P cresce em proporção com seu valor atual. Este método é geralmente utilizado para estimativas curtas (1 – 5 anos). A equação 4 apresenta a estimativa do crescimento populacional. A constante K_g é a constante de proporcionalidade, representa a taxa de crescimento do logaritmo dos valores de população entre os dois últimos anos do histórico populacional e pode ser calculada pela equação 5 (QUASIN,1999).

$$P(t) = P_2 \cdot e^{K_g \cdot (t - t_2)} \quad (4)$$

$$K_g = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{t_2 - t_1} \quad (5)$$

iii) Modelo de taxa decrescente de crescimento

Este modelo assume que a população P possui um valor limite ou ponto de saturação (K_s – equação 6). Este valor K_s é atingido após um crescimento contínuo, porém decrescente. Observa-se neste modelo uma restrição com relação aos valores de população, dado que a inequação $P_1^2 \neq P_0 P_2$ deve ser satisfeita. A equação 7 apresenta a

estimativa do crescimento populacional por este método. A constante K_d é a constante de proporcionalidade (Equação 8) (QUASIN,1999).

$$K_s = \frac{2P_0 \cdot P_1 \cdot P_2 - P_1^2 \cdot (P_0 + P_2)}{P_0 \cdot P_2 - P_1^2} \quad (6)$$

$$P(t) = P_2 + (K_s - P_2) \cdot [1 - e^{-K_d(t-t_2)}] \quad (7)$$

$$K_d = \frac{\ln [(K_s - P_2) / (K_s - P_1)]}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

iv) Modelo logístico

Inicialmente apresentado por Verhust, e posteriormente aplicado, de diversas formas, por diversos autores, tais como Qasin (1999), Barros (2012), etc. Este modelo assume que o crescimento populacional P segue uma relação matemática logística (Curva em S). Assim como no método de crescimento decrescente a constante K_s deve ser calculada (Equação 6). Como no caso anterior, permanece a restrição que deve ser respeitada: $P_1^2 \neq POP_2$. A previsão da população (equação 9) pode ser calculada após o cálculo das constantes a e c (Equações 10 e 11) (QUASIN,1999).

$$P(t) = \frac{K_s}{1 + ce^{a(t-t_0)}} \quad (9)$$

$$a = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \ln \left[\frac{P_0(K_s - P_1)}{P_1(K_s - P_0)} \right] \quad (10)$$

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

Um modo alternativo de se aplicar o modelo logístico foi ainda apresentado por Purohit e Kandpal (2005) (apud Barros e Tiago Filho, 2012). A partir das constantes a e b , e de um ponto de saturação arbitrado, o modelo impõe e ajusta uma curva de crescimento populacional. Para aplicação deste modelo se utiliza o método dos mínimos quadrados para se ajustar valores a e b que minimizem a diferença da equação 12. Esta

minimização pode ser realizada por meio do aplicativo Solver do Software Microsoft Excel®. De posse dos valores de a e b que minimizem a diferença, a projeção é calculada para cada ano por meio da equação 13.

$$\text{Min } D^2, \quad D = \sum_{i=1}^n \left\{ \ln \left[\left(\frac{P(t)}{K_s} \right) \cdot \left(\frac{K_s - P(t)}{K_s} \right)^{-1} \right] - (a + bt) \right\} \quad (12)$$

$$P(t) = K_s \cdot \left[\frac{e^{a+bt}}{1 + e^{a+bt}} \right] \quad (13)$$

Sha’Ato et al. (2007) apresentou ainda um modelo que considera a taxa de crescimento percentual média da cidade (r) - equação 14.

$$P(t) = P_0(1 + r)^t \quad (14)$$

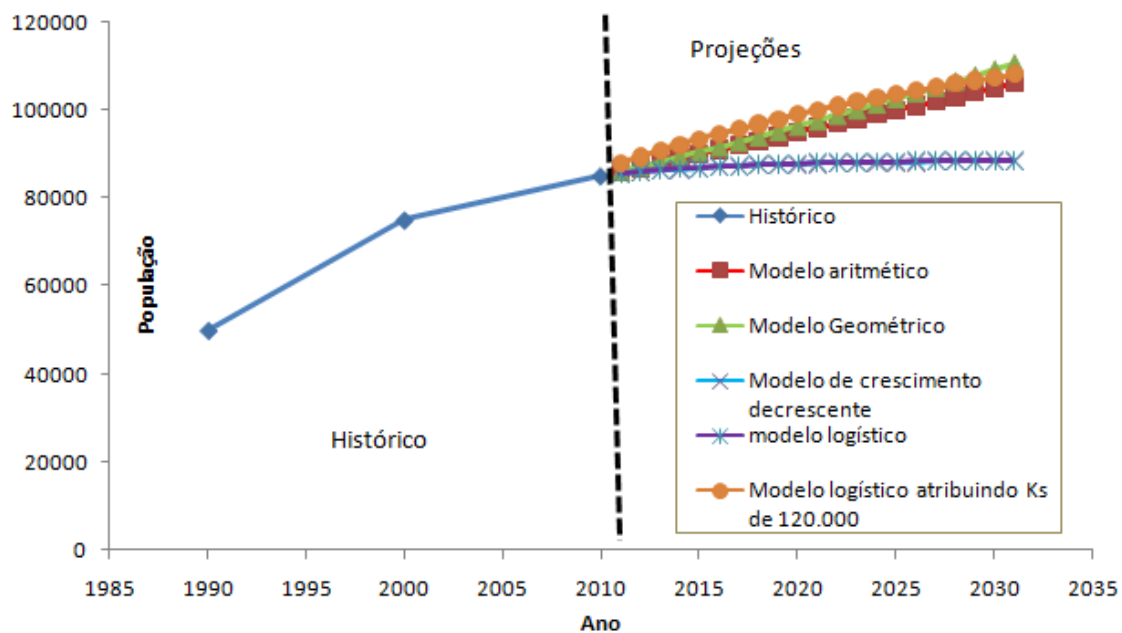


Figura 6: Exemplo de aplicação dos modelos de projeção populacional.

2.2. Os Aterros sanitários

2.2.1. Aspectos construtivos e operacionais de um aterro sanitário

Conforme já descrito anteriormente um aterro sanitário é uma forma de disposição final de RSU no solo, dentro de critérios de engenharia e normas operacionais específicas, proporcionando o confinamento seguro dos resíduos (normalmente, recobrimento com argila selecionada e compactada) evitando danos ou riscos à saúde pública e minimizando os impactos ambientais (BIDONE e POVINELLI, 1999).

De acordo com Barros (2012), a operação de um aterro sanitário envolve o atendimento a prática de compactação dos resíduos sólidos; de recobrimento diário dos resíduos com argila compactada, manutenção de acessos, manutenção das instalações e equipamentos, programa de monitoramento de águas subterrâneas, análise do resíduo e conformidade com as normas e legislação, especialmente, para não haver o risco de disposição inadequada de resíduo perigoso em aterro sanitário, ou ainda, de incompatibilidade entre resíduos aterrados, dentre outros. Monteiro et al. (2001) afirmam ainda, que um aterro sanitário deve contar necessariamente com as seguintes unidades:

- Unidades operacionais

Células de lixo domiciliar, impermeabilização de fundo (obrigatória) e superior (opcional), sistema de coleta e tratamento dos líquidos percolados (chorume), sistema de coleta e queima (ou beneficiamento) do biogás, sistema de drenagem e afastamento das águas pluviais e sistemas de monitoramento ambiental, topográfico e geotécnico e pátio de estocagem de materiais.

- Unidades de apoio

Cerca e barreira vegetal, estradas de acesso e de serviço, balança rodoviária e sistema de controle de resíduos, guarita de entrada, prédio administrativo e oficina e borracharia.

Barros (2012) revisou a legislação de normas técnicas Brasileiras e listou as restrições a serem satisfeitas para que uma área seja utilizada para se construir um aterro sanitário, dentre as quais pode-se citar: i) Local de construção com declividade entre 1 e 30%, solo de coeficiente de permeabilidade menor que 10^{-6} [cm/s], espessura da zona saturada maior que 3 [m], distância mínima de 200 [m] entre o aterro e qualquer recurso hídrico passível de ser afetado, poços de monitoramento (1 a montante e três a jusante) da qualidade da água subterrânea e distância mínima de 500 [m] de alguma residência.

A quantidade de requisitos torna difícil a obtenção de áreas para implantação de aterros sanitários.

Segundo Bidone e Povinelli (1999), os aterros podem ser classificados com relação ao método de operação mais aplicado. São estes: i) Método da trincheira, ii) Método da escavação progressiva e iii) Método da área ou aterro do tipo superficial.

O método da trincheira é aplicado para terrenos que sejam planos ou pouco inclinados, e onde o lençol freático esteja situado a uma profundidade maior em relação à superfície (MONTEIRO et al., 2001). Estes também são indicados quando a produção diária de RSU, preferencialmente, não ultrapassar 10 toneladas. Assim é um método propício para pequenas comunidades, de menores rendas, podendo, todavia, ser aplicado a grandes comunidades caso a morfologia local se adéqüe mais a tal metodologia. (BIDONE e POVINELLI, 1999).

Já o método da escavação progressiva é aplicado em áreas de encostas, normalmente aproveitando-se o material escavado do próprio local na cobertura do lixo. O aterro é executado depositando-se certo volume de lixo no solo, o qual é compactado por um trator de esteira em várias camadas, até 3 ou 4 [m] de altura. A seguir, o trator escora, na parte oposta da operação, o material para cobertura do lixo compactado, formando as células sanitárias (BIDONE e POVINELLI, 1999).

A terceira técnica, o método da área, é uma técnica adequada para zonas baixas, onde dificilmente o solo local pode ser utilizado como cobertura. Será necessário retirar o material de jazidas que, para economia de transporte, devem estar localizadas o mais próximo possível do local a ser aterrado (MONTEIRO et al., 2001). Este método consiste no descarregamento e compactação dos resíduos, formando uma elevação tronco-piramidal. Foi muito utilizado em cidades grandes devido à ausência de áreas disponíveis, o que requereu a utilização de áreas baixas tais como pântanos, alagados, etc. (BIDONE e POVINELLI, 1999), contudo, foi proibido pelas novas leis nacionais de resíduo sólidos. Quando ainda praticado, o método da área era bastante custoso, pois requeria cuidados especiais antes e durante a sua execução, como por exemplo, o rebaixamento do lençol freático e construção de diques, para evitar a contaminação das águas pelos percolados (LEITE, 1991 *apud* BRESCIANI, 2006).

2.2.2. Aterros sanitários no Brasil

Atualmente os aterros sanitários têm sido bastante criticados devido ao fato de não terem por objetivo tratamento ou reciclagem dos RSU, sendo uma forma de armazenamento/tratamento dos RSU no solo, prática que requer grandes áreas que estão se tornando cada vez mais escassas (CETESB, 2015). De acordo com Moura (2014), atualmente, a lei 12305 de 2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS/BRASIL, 2010), preconiza que haja a reciclagem e reuso de tudo que for possível dos RSU, devendo os rejeitos restantes dos RSU ser dispostos na forma ambientalmente adequada de disposição final, aterro sanitário. No entanto, dada a dificuldade da operacionalização da coleta seletiva, sobretudo no que tange à matéria orgânica, ainda é realidade a disposição de elevada porcentagem de matéria orgânica nos aterros sanitários.

Ainda de acordo com Moura (2014), mediante esta realidade, a extração e aproveitamento energético de biogás de aterro sanitário devem ser estudados. Lixões a céu aberto e aterros controlados estão fadados à extinção, segundo o preconizado pela supracitada lei, o que deve garantir um grande crescimento do número de aterros sanitários, algo que já vem sendo observado desde a década passada, como demonstra a tabela 8, que apresenta dados de número de lixões, aterros sanitários e aterros controlados no Brasil nos anos de 2000 e 2008. Nesta tabela pode se observar, que entre 2000 e 2008, o número de aterros no Brasil quase duplicou, sendo o crescimento concentrado principalmente em pequenos municípios (Nos quais se verifica a oportunidade de se aproveitar o biogás para geração descentralizada de energia). De acordo ainda com o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012b), dentro deste mesmo intervalo de tempo, o Brasil dobrou o volume de resíduos destinados a aterros sanitários, passando de 49,6 para 110 mil de toneladas diárias.

Tabela 8: Disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil entre 2000 e 2008
Fonte: Ipea (2012a).

Unidade de análise	Número de Lixões		Número de Aterros controlados		Número de Aterros sanitários	
	2000	2008	2000	2008	2000	2008
Brasil	4642	2906	1231	1310	931	1723

Tabela 8: Disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil entre 2000 e 2008
 Fonte: Ipea (2012a).

Municípios pequenos (< 100.000 Habitantes)	4507	2863	1096	1226	773	1483
Municípios médios (Entre 100.000 e 10⁶ habitantes)	133	42	130	78	125	207
Municípios Grandes (> 10⁶ habitantes)	2	1	5	6	33	33

Em dados mais recentes, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2013), demonstra que o número de aterros sanitários também cresceram entre 2012 e 2013 e que já são a forma de destinação para mais da metade dos resíduos gerados no país (Figura 7). Sendo assim, cerca de 2,2 mil municípios Brasileiros já possuem aterros sanitários (MMA, 2014b).

Apesar deste cenário do aumento do número de aterros sanitários no país (que deverá continuar devido o fim dos lixões preconizado pela lei 12305), poucos deles apresentam aproveitamento energético. Segundo o Boletim de informações gerenciais da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2014a), existem apenas 23 usinas termelétricas movidas a biogás (considerando-se todas as fontes de biogás) no país, o que totaliza uma potência instalada próxima a 81 [MW], valor bastante baixo considerando-se que a potência total instalada no país supera os 120 GW.

Segundo Trigueiro (2013), até 2013 dois aterros da cidade de São Paulo (SP) (Bandeirantes e São João) possuíam aterros para aproveitamento energético do biogás, gerando até 2% da energia elétrica consumida na cidade. Desta forma o potencial de aproveitamento energético do biogás de aterros ainda é grande e tende a crescer nos próximos anos. Barros et al. (2014) estimou que para cenários mais otimistas, este potencial pode alcançar 5 [TWh] em 2040, sendo contudo a viabilidade econômica desta forma de aproveitamento assegurada somente para cidades com população superior a 200.000 habitantes.

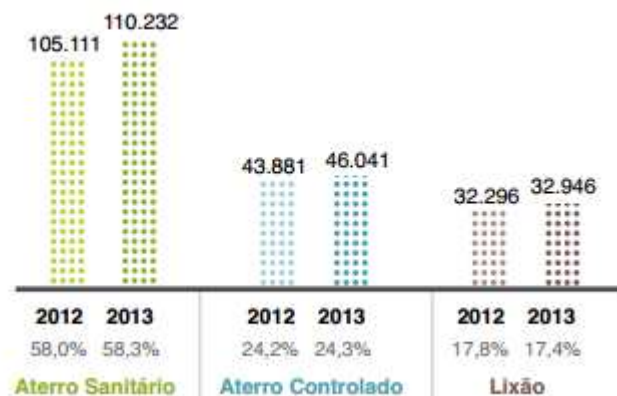


Figura 7: Crescimento dos aterros sanitários entre 2012 e 2013 no Brasil. Fonte: ABRELPE (2013).

2.2.3. Digestão anaeróbia

Chernicaró (2005) afirma que a digestão anaeróbia pode ser considerada um ecossistema no qual diversos grupos de microorganismos trabalham na conversão da matéria orgânica complexa em metano, gás carbônico, água, gás sulfídrico e amônia, além de novas células bacterianas. O processo de digestão anaeróbia envolve diferentes estágios da interação entre os substratos e as bactérias e pode ser dividido em quatro fases principais (Segundo o autor op. Cit.):

- **1 - Hidrólise**

Segundo Nuvolari (2003), as bactérias não conseguem assimilar a matéria orgânica particulada (Na maioria das vezes estas partículas são maiores que elas mesmas). Assim a primeira fase no processo de degradação anaeróbia consiste na hidrólise de substâncias particuladas complexas (polímeros) em substâncias dissolvidas mais simples (Moléculas de menor tamanho), as quais podem dessa forma atravessar a membrana celular das bactérias fermentativas.

Diversos fatores afetam a hidrólise, como a composição da massa particulada (teor de lipídios, proteínas e carboidratos) e sua relação superfície / volume fazendo com que determinado substrato tenha uma taxa de degradação maior ou menor que outro substrato. A taxa de hidrólise varia também, de acordo com o microorganismo e/ou enzima envolvida. A forma como o substrato se apresenta e todos os fatores citados

determinam as características do ecossistema em um reator anaeróbio (PESCADOR, 2001).

- **2 - Acidogênese**

Os produtos solúveis, oriundos da fase de hidrólise, são metabolizados no interior das células, por meio do metabolismo fermentativo. A maioria dos microorganismos acidogênicos fermentam açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, resultantes da hidrólise da matéria orgânica complexa, e produzem diversos compostos mais simples, a exemplo de ácidos orgânicos, alcoóis, cetonas, dióxido de carbono e hidrogênio, além de novas células bacterianas. Os microorganismos fermentativos são os primeiros a atuar na etapa sequencial de degradação do substrato, e os que mais se beneficiam energeticamente (Chernicaró, 2005).

- **3 - Acetogênese**

De acordo com Chernicaró (2005), as bactérias sintróficas acetogênicas são responsáveis pela oxidação de compostos orgânicos intermediários em substrato apropriado para os a produção de metano por parte dos microorganismos (acetato, hidrogênio e dióxido de carbono). No entanto, a formação de acetato resulta na produção de grande quantidade de H_2 , fazendo o valor do pH tender a decrescer, e dessa forma, o meio aquoso tende a se tornar mais ácido. No entanto, Nuvolari (2003) afirma que o hidrogênio formado é consumido no meio de duas maneiras: i) pelo consumo das bactérias metanogênicas, que utilizam hidrogênio e gás carbônico para produção de metano e ii) pela formação de ácidos orgânicos pela reação do hidrogênio com o gás carbônico e ácido acético.

- **4 - Metanogênese**

Segundo Nuvolari (2003) esta é a etapa final do processo de degradação anaeróbia, ou seja, onde ocorre a transformação dos produtos intermediários em gás metano e gás carbônico. Nesta fase se verifica-se uma drástica redução da DQO e um retorno do pH a condição tampão (BIDONE e POVINELLI, 1999). Esta fase é conduzida por microorganismos anaeróbios do tipo *archaeas* metanogênicas (PESCADOR, 2001). A metanogênese pode ser: Acetotrófica (Quando o CH_4 é produzido a partir do acetato) ou

hidrogenotrófica (em que o metano é produzido a partir do H_2 e CO_2), conforme demonstram as equações 15 e 16 (THEMELIS e ULLOA, 2006).



Themelis e Ulhoa (2006) apresentam ainda, a uma equação molecular simplificada para estimativa do montante máximo de gás que pode ser produzido durante a digestão anaeróbia, onde a matéria orgânica é representada pelo composto $C_6H_{10}O_4$ (ácido hexanodióico - Eq. 17). As diversas fases da digestão anaeróbia estão resumidas no fluxograma apresentado na figura 8.

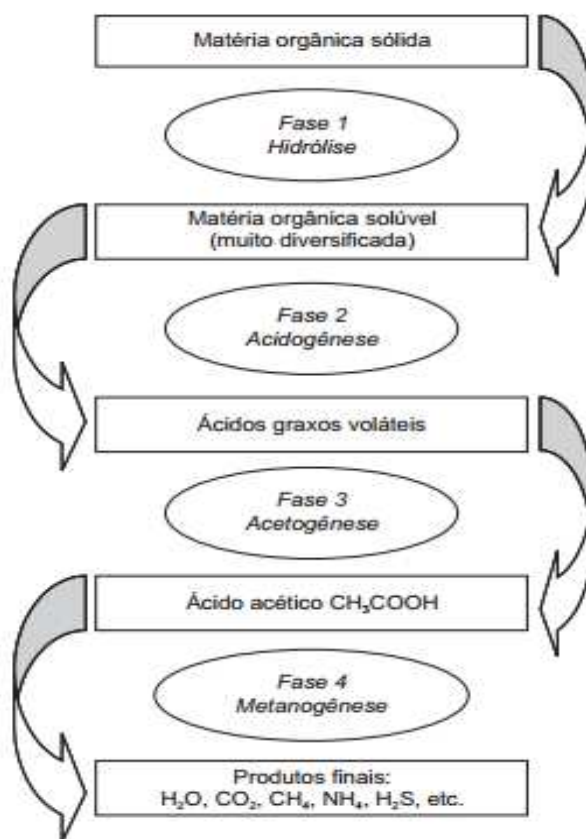
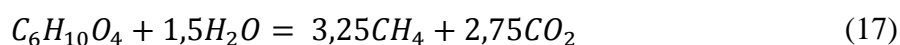


Figura 8: Fluxograma esquemático da digestão anaeróbia de RSU. Fonte: Castilhos Jr. et al. (2003).



Outra etapa ainda pode ocorrer em meio à digestão anaeróbia, a sulfetogênese. Neste processo, sulfato, sulfito e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfeto, por

meio da ação de um grupo de bactérias anaeróbias estritas, denominadas bactérias redutoras de sulfato. Esta é mais eficiente que a metanogênese na remoção da DQO da fase líquida. Todavia, a DQO removida na sulfetogênese leva a produção de gás sulfídrico que traz problemas como corrosão de componentes e maus odores, enquanto que, a produção de metano pode ser utilizada para aproveitamentos energéticos. (CHERNICARO, 2005). Assim, de acordo com Nuvolari (2003), não é desejável que ocorra a sulfetogênese e não freqüente a sua ocorrência. A sulfetogênese pode ocorrer quando os despejos que contêm compostos de enxofre encontram-se em condições favoráveis à sua produção, pela redução de sulfatos.

Embora a divisão do processo de digestão anaeróbia acima apresentada facilite bastante o entendimento dos fenômenos de estabilização biológica dos RSU e seus impactos sobre a composição dos lixiviados e das emissões gasosas, na prática, durante a vida de um aterro, essas fases não são tão bem definidas. Dado que sempre há o aterramento de resíduos novos, há também grande variabilidade na idade do material disposto, não sendo difícil, portanto encontrar as três fases ocorrendo simultaneamente em um único aterro (CASTILHOS JR. et al., 2003).

2.2.4. Fases da produção de gás no aterro sanitário

A produção de gases no aterro passa por 4 fases descritas por Farquhar e Rovers (1973, *apud* Barros, 2012) conforme descrito a seguir. Todas as fases estão representadas na figura 9.

- Fase I – Primeira fase aeróbia: Fase em que ocorre a decomposição aeróbia com consumo de oxigênio presente nos resíduos no momento da disposição. Nesta fase verifica-se a produção de CO₂. Esta fase dura geralmente de horas a 1 semana (Banco Mundial, 2004).
- Fase II – Anaeróbia não metanogênica: Fase em que atividade anaeróbia se torna predominante. Durante este período, ocorre um pico na concentração de dióxido de carbono e a produção de hidrogênio é relevante. Nesta fase, ocorre ainda a substituição de N₂, que pode, todavia, ser reproduzido em menores quantidades por intermédio da desnitrificação. Esta fase dura geralmente de 1 a seis meses (Banco Mundial, 2004).

- Fase III – Anaeróbia metanogênica instável: Ocorre aumento da concentração de CH_4 e estabilização em um valor bastante elevado. Nesta fase, as concentrações de CO_2 e N_2 são reduzidas a concentrações finais. Esta fase dura geralmente de 3 meses a três anos (Banco Mundial, 2004). É nesta fase que se torna interessante o aproveitamento energético do biogás produzido nos aterros.
- Fase IV – Anaeróbia metanogênica estável: Nesta fase, a composição dos gases e as taxas de produção atingem patamares constantes. Isso não exclui a ocorrência de variações bruscas na produção de gás em função de alterações nas condições ambientais, tampouco, variações de longo prazo ocasionadas, por exemplo, por esgotamento de nutrientes. Esta fase dura de 8 a 40 anos (Banco Mundial, 2004).

Composição do gás %

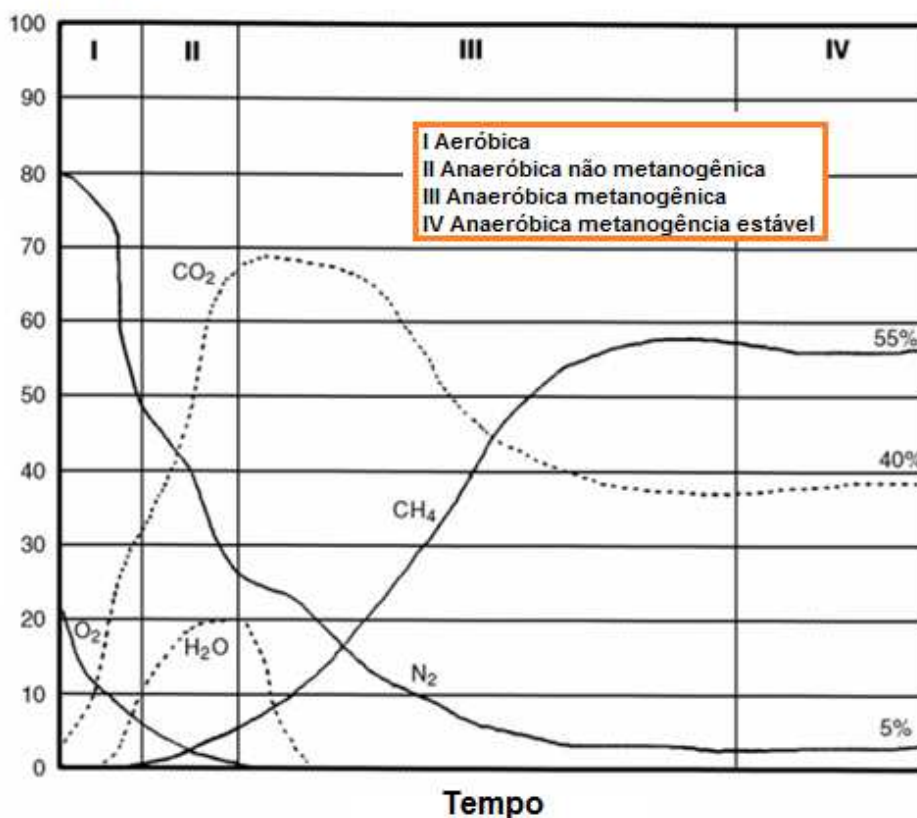


Figura 9: Variação da composição do gás produzido no aterro ao longo das diversas fases de atividade microbiana. Fonte: Tchobanoglous et al. (1993, *apud* USEPA, 2005a).

O Banco Mundial registra (utilizando resultados de diversos autores) ainda uma fase metanogênica decrescente (onde decresce o teor de metano do biogás), posterior a fase

metanogênica estável e que pode durar até 40 anos, resultando em um tempo total de geração de biogás no aterro próximo a 80 anos, valor inferior contudo aquele simulado pelo software Landgem da Agência Americana de Proteção Ambiental, que é igual a 140 anos (USEPA, 2005).

2.2.5. Sistema de coleta de gás de aterro sanitário

Uma das principais características dos aterros sanitários é a presença de sistema de coleta e drenagem de gás (CETESB, 2015). Estes minimizam os impactos ambientais dos aterros, minimizando a quantidade de emissões fugitivas de CH₄ e CO₂ emitidas pelos aterros para a atmosfera.

Os sistemas de coleta de gás de aterro sanitário podem ser classificados em dois tipos: i) Sistemas de coleta ativos: Utilizam compressores mecânicos para promover um gradiente de pressão que possibilite a extração do gás do aterro; ii) Sistemas de coleta passivos: Repousam no gradiente de pressão natural do interior do aterro (USEPA, 2005a).

De acordo com Mazo-Nix (s/d) a forma mais comum de coleta de biogás em aterros são os extratores verticais. Estes são instalados em zonas de despejo ou operação do aterro e tem sua profundidade ideal em mais de 10 metros de resíduos. A figura 10a apresenta um esquema detalhado de um poço extrator vertical. Ainda segundo Mazo-Nix (s/d), uma solução alternativa para coleta de gás são os coletores horizontais. Estes podem ser instalados em áreas rasas e superficiais e podem ser uma boa opção para aterros com altos níveis de chumbo. Os coletores horizontais podem ser instalados logo após a disposição de novas camadas de resíduos, o que permite a coleta de gás naquela camada logo após o início da geração. A figura 10b exemplifica um sistema horizontal de coleta.

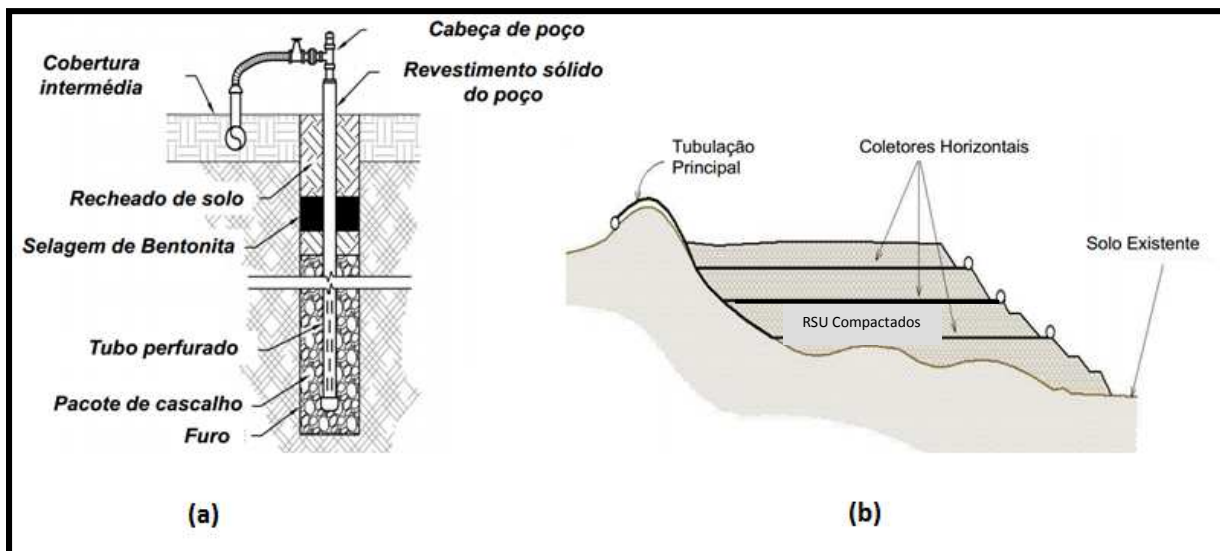


Figura 10: Sistema de coleta do biogás de aterro sanitário. (a) Sistema de extração vertical. (b) Sistema horizontal. Fonte: Mazo-Nix (s/d).

A eficiência dos sistemas de coleta de gás modifica-se de aterro para aterro, podendo até variar com o período do ano. Em estudos experimentais, Silva et al. (2013) analisou a eficiência do sistema de coleta de biogás dos aterros Bandeirantes e Caiaras, obtendo eficiências de, respectivamente, 56 e 63 % para estes aterros. Já Watermolen et al. (2012), analisou um aterro nos Estados Unidos da América obtendo valores médios de eficiência de 55 % e 48% (em datas diferentes). Um ponto interessante para pesquisa é também a avaliação da variação da qualidade do biogás entre os diversos poços de extração (Como da figura 10), o que certamente afetará a produção energética a partir da combustão de biogás.

2.3. O Biogás

2.3.1. Definição

O Biogás é uma mistura gasosa resultante da degradação anaeróbia da matéria orgânica dos resíduos sólidos depositados em aterros sanitários e dos efluentes industriais e esgotos domésticos, sendo formado principalmente por metano e dióxido de carbono, em média em partes iguais de volume. Quanto maior a formação de metano, mais energia por unidade de massa o biogás contém. Há ainda dezenas de substâncias, como o gás sulfídrico causador de mau cheiro, traços de siloxanos, que reduzem a vida útil

dos equipamentos de uso energético, e vapor d'água (GOLDEMBERG, 2006). A tabela 9 apresenta a composição média do biogás.

Tabela 9: Composição do Biogás. Fonte: European Biomass Association (AEROBIOM, 2009).

Gás	Percentual em volume (%)
Metano CH ₄	50 – 75
Dióxido de Carbono CO ₂	24 – 45
Vapor d'água H ₂ O _g	1 – 2
Monóxido de Carbono CO	0 – 0,3
Nitrogênio N ₂	1 - 5
Gás Sulfídrico H ₂ S	0,1 – 0,5
Hidrogênio H ₂	0 - 3
Oxigênio O ₂	Traço

2.3.2. Possíveis utilizações do biogás

O Biogás pode ser aproveitado em várias escalas para vários fins. Este pode ser utilizado para geração de energia térmica, elétrica, ou para co-geração. Contudo, quando submetido a processos de tratamento, pode ainda, ser utilizado como combustível em veículos ou injetado na rede de gás como substituto ao gás natural, conforme ressaltam diversos autores (p. ex: AEROBIOM, 2009; ICLEI, 2009).

Existem diferentes alternativas de purificação aplicáveis ao biogás, devendo ser definida a mais adequada para a aplicação energética que se pretende. Por exemplo, para a aplicação no ramo automotivo, é necessária uma etapa de purificação em que o biogás passa por um filtro de óxido de ferro, responsável pela retirada dos traços de enxofre. Livre do H₂S o biogás é enviado ao compressor de baixa pressão, que tem por finalidade forçar a passagem do biogás através de uma torre de absorção de CO₂. Este processo resultará na dissolução de CO₂, formando H₂CO₃, que é enviado para a caixa de eliminação, que tem por finalidade separar o gás carbônico da água, em que o CO₂ é liberado para a atmosfera. Após este processo, a água é recalçada para a torre de

absorção e o metano purificado é submetido ao processo de armazenamento (COSTA, 2006).

Chen et al. (2010) cita as aplicações do biogás de aterro já implantadas na China, as quais incluem:

- i) Geração de energia em motores de combustão interna;
- ii) Geração de energia em motores Stirling;
- iii) Produção de vapor e água aquecida em caldeiras a gás;
- iv) Produção de combustível veicular após enriquecimento do metano;
- v) Uso como combustível auxiliar em fornalhas e incineradores;
- vi) Para tratamento do lixiviado do aterro via combustão e evaporação;
- vii) Para queima de resíduos hospitalares.

O biogás também pode ser utilizado para produção de outros produtos químicos, como o Metanol e a gasolina, e até mesmo hidrogênio (YANG, et al., 2014), em resfriadores líquidos (*Chillers*) por absorção (FUNES et al., 2011) e em fogões domésticos (não necessariamente com o mesmo rendimento, conforme demonstra Grima-Olmedo et al., 2014).

O Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas CERPCH (s/d) listou ainda diversas utilizações práticas possíveis do biogás dentro da realidade do pequeno produtor rural, a saber: Uso em lampiões, aquecimento de fogões, combustível para motores de combustão interna, geladeiras, chocadeiras, secadores de grãos, etc.

2.3.2. Métodos para estimativa da produção de biogás em aterros sanitários

As equações para estimativa de produção de gás em aterros sanitário geralmente se baseiam em reações cinéticas de primeira ordem, como por exemplo, a equação 18, utilizada no software LandGEM®, desenvolvido pela agência americana de proteção ambiental (USEPA, 2005b), e a equação 19 apresentada por (IPCC, 1996) e aplicada

pela Companhia de Tecnologia Ambiental (CETESB, 2006) no software BIOGÁS: Aterros (2006).

$$Q = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^1 k \cdot L_0 \cdot \left(\frac{W(t)}{10}\right) \cdot e^{-ktij} \quad (18)$$

$$\sum Q_x = F \cdot k \cdot L_0 \sum R_x \cdot e^{-k(x-T)} \quad (19) \quad (1)$$

Onde: k = taxa de decaimento da produção de metano [1/ano], L_0 = Potencial de geração de metano [m^3/ton], M_i = massa de resíduos aportada ao aterro no ano i (USEPA, 2005) e: Q_x = Fluxo de biogás no ano x gerado pelos resíduos depositados no ano inicial t [$\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$], Q = vazão anual de biogás, R_x = fluxo de resíduos no ano x [kg], ΣQ_x = soma das estimativas da vazão de gás e x = ano atual. (CETESB, 2006 e IPCC, 1996).

O potencial de geração de metano L_0 se refere ao total de metano que poderia ser produzido por uma tonelada de resíduo. Este parâmetro é dependente quase inteiramente do tipo de resíduo presente no aterro (USEPA, 2010). A tabela 10 apresenta valores de L_0 sugeridos pelo Banco Mundial (2014), em função do tipo de resíduo.

Tabela 10: Valores sugeridos para L_0 . Fonte: Banco Mundial (2014).

Categoria do RSU	Valor mínimo para L_0 [$\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{ton}$]	Valor máximo para L_0 [$\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{ton}$]
Relativamente inerte	5	25
Moderadamente degradável	140	200
Altamente degradável	225	300

Aspectos climáticos como precipitação e temperatura estão entre os fatores que influenciam a constante de taxa de produção de metano (k) em um aterro sanitário, e tem sido estudada por diversos autores (WANGYAO et al., 2010; ISHII e FURUICHI, 2013; etc.). A constante k é maior em climas quente e úmido e menor em climas frio e seco (CETESB, 2006), e quanto maior seu valor, mais rapidamente aumenta ou decai o valor da taxa de geração de metano ao longo do tempo. Os valores de k obtidos na literatura também são muito variados, variando de 0,02 (USEPA, 2005) até 0,7 (em biorreatores molhados, conforme USEPA, 2005) e até mesmo 0,8, como obtido por Jucá

e Maciel (2011), em uma célula experimental de geração de Metano no estado de Pernambuco, Brasil.

Outra estimativa, que envolve um balanço de massa que considera o carbono orgânico degradável, também pode ser encontrada em IPCC (1996) (equação 20).

$$Q_{CH_4} \left[\frac{ton}{ano} \right] = W_{(t)} \cdot MSW_f \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot F \cdot \left(\frac{16}{12} \right) \cdot (1 - OX) \quad (20)$$

Sendo: $W_{(t)}$ = Total de resíduos gerados anualmente [ton], MSW_f = fração de resíduos sólidos enviados ao aterro, MCF = Fator de correção de metano, DOC = Fração de carbono orgânico degradável, DOC_f = Fração de DOC degradada, F = Fração de metano no biogás e OX = fração de oxidação do metano (Geralmente igual a 0) (IPCC, 1996).

O fator de correção do metano (MCF) está relacionado com o tipo de operação do aterro e pode ser obtido por meio da tabela 11. A fração de carbono orgânico degradável (DOC) baseia-se na composição do resíduo e pode ser obtido pela equação 21 (IPCC, 1996). A fração deste carbono que se converteu em biogás (DOC_f) pode ser obtida por meio da equação 22 (TASABARAN 1981, apud IPCC, 1996).

Tabela 11: Classificação do aterro e determinação do parâmetro MCF . Fonte: IPCC (1996).

Tipo do aterro sanitário	MCF [/]
Controlado	1
Não controlado – Profundo (> 5 m de resíduos)	0,8
Não controlado – Raso (< 5 m de resíduos)	0,4
Valor ‘Default’ – Aterros sem classificação	0,6

$$DOC = 0,4 \cdot A + 0,17 \cdot B + 0,15 \cdot C + 0,3 \cdot D \quad (21)$$

$$DOC_f = 0,014T + 0,28 \quad (22)$$

Onde: A = percentual de papel e material têxtil nos resíduos; B = Percentual de resíduos de poda, jardim ou outro material orgânico putrescível que não seja restos de comida; C

= Percentual de restos de comida, D = percentual de madeira ou palha e T = temperatura (°C). As variáveis A, B, C, D podem ser obtidas por meio da análise da composição gravimétrica da cidade ou região onde o aterro sanitário será implantado. Composição esta, que varia de região para região. A tabela 12 demonstra as diferenças da composição gravimétrica dos resíduos sólidos entre América do Sul, Central e do Norte. Nela, é possível observar que quando se amplia o poderio econômico da região, diminui-se o teor de orgânicos presentes nos RSU.

Tabela 12: Diferenças entre a composição gravimétrica da América do sul, Central e do Norte. Fonte: Traduzido de Hoornweg e Bhada-Tata (2012).

Região	América do Sul	América Central	América do Norte
Restos de comida [%]	44,9	43,8	33,9
Papel [%]	17,1	13,7	23,2
Lenha [%]	4,7	13,5	6,2
Têxteis [%]	2,6	2,6	3,9
Couro / Borracha [%]	0,7	1,8	1,4
Plástico [%]	10,8	6,7	8,5
Metal [%]	2,9	2,6	4,6
Vidro [%]	3,3	3,7	6,5
Outros [%]	13	12,3	9,8

Segundo Oonk et al. (1994, *apud* Amini et al., 2012) a utilização de modelos de cinética de segunda ordem ao invés da primeira ordem aumentam a complexidade do método sem resultar em aumento significativo da qualidade da estimativa. Contudo, os modelos de primeira ordem são extremamente dependentes de seus parâmetros de entrada (AMINI et al., 2012 e PENTEADO et al., 2012), e estes devem ser cuidadosamente escolhidos para a garantia da eficácia do modelo.

2.4. Produção energética a partir do biogás

2.4.1. Conversão energética do biogás de aterro sanitário

Entende-se por conversão energética, o processo que transforma, com dado rendimento, um tipo de energia em outro. No caso do biogás, a energia química contida em suas moléculas é convertida em energia térmica que pode ser convertida em energia mecânica através de um acionador primário, por um processo de combustão controlada. Essa energia mecânica ativa um gerador que a converte em energia elétrica. As potências e energias passíveis de serem geradas, a cada ano, pela conversão energética do biogás podem ser calculadas pelas equações 23 e 24, modificadas de CETESB (2006):

$$P_{dis} = Q_{gás} \cdot PCI \cdot \eta \cdot E_c \quad (23)$$

$$E = P \cdot 8400 \quad (24)$$

Onde: P_{dis} = Potência disponível anualmente, Q = Vazão anual de gás, η = rendimento da tecnologia de conversão energética, E_c = eficiência da coleta de gás no aterro (Que desconta as emissões fugitivas), PCI = poder calorífico inferior do biogás = 23 ($\text{MJ}/\text{m}^3_{\text{CH}_4}$), 8400 = número de horas adotadas de operação anual e E = energia disponível anualmente.

Apesar de existirem diversas tecnologias para conversão energética do biogás, as mais comuns são: Motores de combustão interna e turbinas a gás. (COELHO et al., 2006).

Segundo Santos (2009), os grupos de geradores de combustão interna podem funcionar por meio dos Ciclos Diesel ou Otto e geram a energia elétrica pela conexão de um gerador ao motor. De acordo com Pecora (2006) A diferença básica entre o ciclo Otto e o Diesel está na forma em que ocorre a combustão.

Ainda segundo Pecora (2006), no ciclo Diesel, a combustão ocorre pela compressão do combustível na câmara de combustão, enquanto no ciclo Otto, a combustão ocorre pela explosão do combustível através de uma faísca na câmara de combustão. O ciclo Otto consiste em expansão/resfriamento adiabático, seguido de resfriamento a volume constante, aquecimento/compressão adiabático e aquecimento a volume constante. A válvula de entrada de ar abre no tempo preciso para permitir a entrada de ar (misturado ao combustível) no cilindro. A vela dá ignição na mistura no cilindro, o que cria a

explosão. A força da explosão é transferida ao pistão. O pistão desce e sobe em um movimento periódico. A força do pistão é transferida através da manivela para o eixo de transmissão. De acordo com Suzuki et al. (2011) para que o biogás seja utilizado em sua maior potência para a geração de energia elétrica são em geral necessárias poucas alterações em motores de ciclo Otto ou ciclo diesel, atualmente existentes no mercado.

Já as turbinas a gás (Ciclo *Brayton*) funcionam sob alta pressão injetando ar comprimido em uma câmara de combustão provendo o sistema do oxigênio necessário para a queima. O gás resultante pressiona um compressor e um gerador. O processo será tão mais eficiente quanto maior for a temperatura e pressão de entrada e menor for a temperatura de exaustão (SANTOS, 2009). Ainda de acordo com Santos (2009) tem-se ainda a necessidade de um sistema de limpeza do biogás e adaptação da microturbina para queima do mesmo.

Entretanto, várias são as tecnologias de conversão energética do biogás, além das turbinas e dos motores de Ciclo Otto, em análise ou não consolidadas. Bove e Lunghi (2006) compararam em termos energético, ambiental e econômico as diversas tecnologias, tanto consolidadas quanto em análise, a saber: i) Motor de Combustão Interna (MCI); ii) Turbina a gás (Ciclo Brayton); iii) Usina termelétrica com ciclo orgânico Rankine; iv) Motor de ciclo Stirling e v) célula combustível de carbonato fundido e óxido sólido.

Segundo os autores, os motores de combustão interna são mais vantajosos economicamente, contudo, são os mais ineficientes em termos ambientais. As células combustíveis foram as mais eficientes ambientalmente. Santos et al. (2015a), analisaram também o desempenho das microturbinas a gás, e conclui que embora mais caras que outras alternativas, como por exemplo os MCI, estas possuem melhor performance ambiental, sobretudo com relação a emissão de NO_x . A tabela 13 apresenta uma comparação entre algumas das tecnologias mais comuns de conversão energética do biogás de aterro.

Tabela 13: Custo e rendimento das tecnologias de conversão energética. Fonte: Compilado pelo autor com base em: SSC (1997, *apud* Bove e Lunghi 2006), CETESB (2006), Pecora (2006), Carvalho et al. (2007), Capehart (2010) e Garcilasso e Vescovo (2012).

Tecnologia	Custo [R\$/kW]*	Rendimento (%)	Emissões NO_x	Intervalo de potência
Microturbinas a gás	2860 ¹	25	< 9 ppm	20 – 100 kW
Motores Ciclo Otto (combustão interna de ignição por centelha - MCIIC)	1700 ^{2,3}	33	250 – 3000 ppm	30 kW – 20 MW
Turbinas a gás	3900 ⁴	28	35 a 50 ppm	500 kW – 150 MW
Ciclo orgânico Rankine	3900 ⁴	18	16 [ug/kJ]	-

1 – Capehart (2010)
 2 – Valor corrigido para 2014 com base na calculadora do cidadão do banco Central do Brasil (2014).
 3 – CETESB (2006)
 4 - SSC (1997, *apud* Bove e Lunghi 2006)

* Como demonstram as referências os valores de custo apresentados foram obtidos em diferentes anos. Recomenda-se a conversão destes valores para valores monetários anuais, por meio de índices de correção de inflação, antes de se aplicar estes valores em cálculos. Foi considerado 1 US\$ = 2,6 R\$.

2.4.2. Componentes necessários para a implantação de uma usina para aproveitamento energético do biogás

A seguir são apresentados os componentes básicos para implantação de uma usina de aproveitamento energético em aterros sanitários (Adaptado de CETESB, 2006):

- Queimador: Orientado para combustão dos gases que não forem aproveitados para a geração de energia elétrica;
- Gasômetro: para armazenamento e regularização da vazão de gás. O armazenamento do gás é importante para que se possa realizar eventuais manutenções dos equipamentos de geração de energia; A regularização, permite operar a usina com uma geração energética o mais constante possível.
- Compressor: para coleta do gás (No caso de um sistema ativo de coleta) e bombeamento do gás pela tubulação de coleta;
- Tubulação: para coleta e transporte do biogás do aterro a usina;

- Drenos: para coleta do gás. São geralmente separados entre si por distâncias de 50[m]. O número de drenos pode ser calculado pela equação 25, onde A_A é a área do aterro e r = raio de abrangência do dreno, geralmente igual a 25 m.
- Unidade de tratamento: para remoção de impurezas como H_2S , H_2O , e CO_2 e ampliação do teor de metano (CH_4) do biogás, o que eleva o poder calorífico do mesmo e diminui os riscos de problemas em equipamentos da usina.
- Componente de conversão energética: Para combustão e geração de energia a partir do biogás (explicado anteriormente, vide seção 2.4.1).

$$N_D = \frac{A_A}{\pi r^2} \quad (25)$$

A figura 11 apresenta um esquema de uma usina completa de aproveitamento energético em um aterro sanitário. Observa-se que o sistema de coleta na figura 10 não possui ação de compressor (sistema passivo).

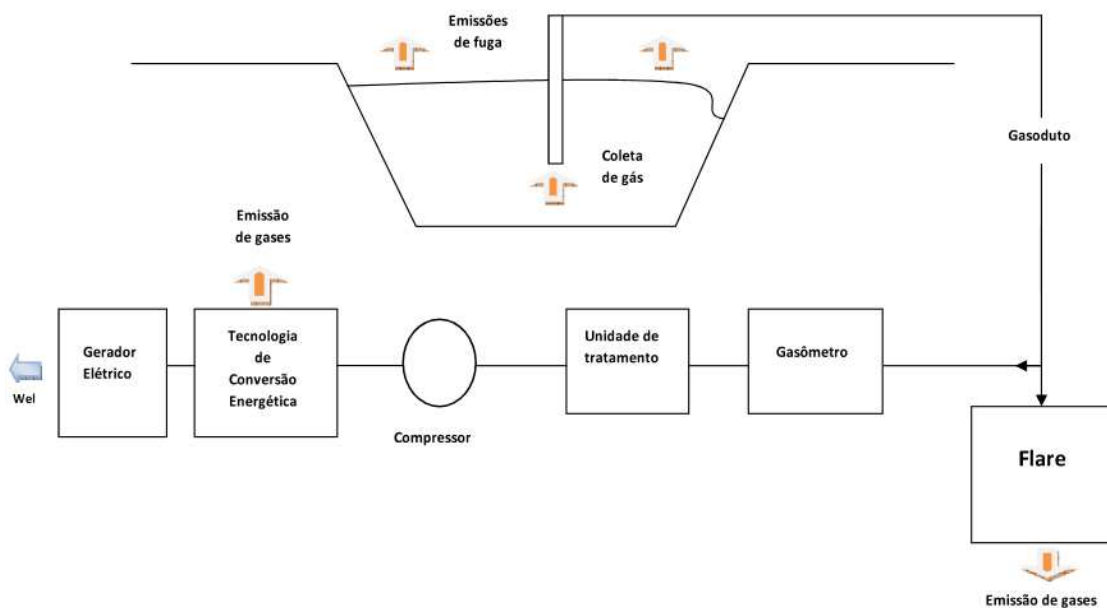


Figura 11: Esquema representativo de uma usina de aproveitamento energético em um aterro sanitário.

Como já ressaltado anteriormente, é importante ainda incrementar o modelo de usina escolhido para o presente trabalho (figura 11) com medidores da concentração de metano no biogás ao longo dos diversos pontos de extração, dado que o percentual de metano pode vir a variar espacialmente.

2.4.3. Custos de implantação de uma usina de aproveitamento energético de aterros sanitários

Os custos de cada um dos equipamentos necessários ao funcionamento de uma usina para aproveitamento energético de aterros sanitários estão apresentados na tabela 14. Os custos das diversas tecnologias de conversão energética estão listados na tabela 13.

Gomez et al. (2010) apresentaram também uma estimativa agregada para cálculo dos custos de capital (I - Equação 26) e de operação e manutenção (C_{om} - Equação 27), considerando-se uma usina operando por 8000 horas anuais com eficiência de conversão energética de 33%. Silva (2012) relacionou o custo de vários grupos geradores termelétricos com as respectivas potências e obteve a equação 28, para estimativa do custo unitário da parcela de geração da usina.

$$I [\text{€}] = 11550. (P[\text{kW}])^{0,78} \quad (26)$$

$$C_{om}[\text{€/ano}] = 115. P \quad (27)$$

$$C_{un} \left[\frac{\text{R\$}}{\text{kW}} \right] = 3588,25. P^{0,858} \quad (28)$$

Tabela 14: Custos de implantações dos componentes necessários ao aproveitamento energético de um aterro sanitário. Fonte: CETESB (2006).

Componente	Custo corrigido (2014)
Queimador	320000 [R\$/unidade]
Gasômetro	145 [R\$/m ³]
Compressor	804 [R\$/m ³ hr]
Gasoduto de Transporte / Tubulação de coleta	401,50 [R\$/m]
Drenos	1601 [R\$/unidade]
* Valores obtidos relativos à 06/2006 em CETESB (2006) e convertidos para 01/2014 por meio da Calculadora do cidadão do Banco Central do Brasil (2014).	

2.4.4. Determinação da potência teórica a ser aproveitada no aterro sanitário

Como demonstra a curva típica de produção de gás em um aterro sanitário (Figura 11), a produção de gás em um aterro atinge um pico no último ano de disposição de resíduos e depois, começa a decair, devido à produção de gás somente por meio da degradação dos resíduos que já estavam no aterro. Desta forma, a potência disponível pelo gás produzido no aterro varia ano a ano. Contudo, o investimento deve ser realizado no primeiro ano e a usina deve ser dimensionada para uma vazão constante de biogás (ou com uma faixa de variação conhecida). Desta forma, deve-se escolher uma potência para implantação da usina, sendo que cada uma terá um tempo de disponibilidade (Figura 12). O número de grupo geradores também deve ser escolhido.

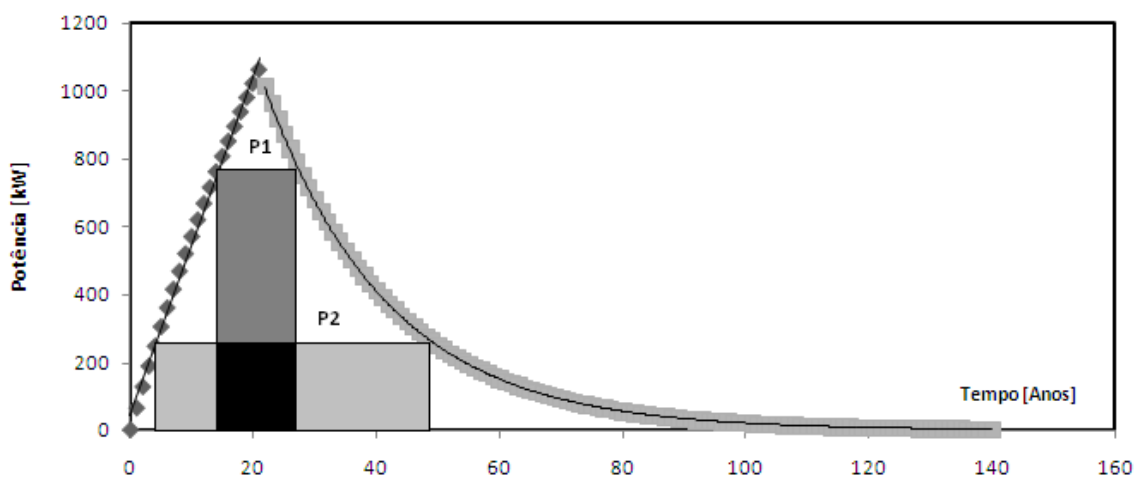


Figura 12: Exemplo da relação entre potencial aproveitado e tempo de funcionamento de uma usina de geração em aterros sanitários. Fonte: Santos et al. (2015b).

A otimização desta potência a ser instalada (A escolha da potência que gere em algum sentido, um benefício máximo) é um tema de literatura escassa quando tratamos acerca do uso do biogás de aterros sanitários e grande parte dos trabalhos na literatura determinam as potências sem uma metodologia definida, adotando potências e números de geradores cada um segundo seu critério, seja este o máximo aproveitamento de gás ou simplesmente adotando diversos cenários de potência e número de geradores e os comparando (WANICHPONGPAN, et al., 2007; BARROS, et al., 2014; LEME, et al., 2014; PAIVA, 2014).

Santos et al. (2015b) estudaram as relações entre o tempo de aproveitamento e potência implantada em uma usina termelétrica em um aterro sanitário e concluíram que uma capacidade instalada relativa a 45% da potência máxima corresponde ao ponto de máxima produção energética (Quando se considera um único grupo gerador operando a plena carga). Santos et al. (2015a) observaram que a implantação desta potência de máxima produção energética, em detrimento de uma potência de base, cujo gás de aterro poderia suprir ao longo de aproximadamente 70 anos, ampliou a Taxa Interna de Retorno do Empreendimento em mais de 600% (de 3 para 23%, o que garantiu a viabilidade econômico-financeira do mesmo). Fato que demonstra como o método de motorização e aproveitamento podem auxiliar a viabilidade econômica do mesmo.

Silva (2012) desenvolveu e aplicou, aos aterros sanitários, um método análogo ao utilizado em Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) a fim obter a potência ótima do aproveitamento. O método se baseia na determinação de uma curva de permanência (Figura 13a) que relaciona determinada potência (Vazão de biogás) com a permanência desta (ou seja, percentual do tempo em que uma vazão igual ou inferior esta estará disponível - ρ em %) nos anos seguintes ao início de operação do aterro. De posse desta curva, a energia, as receitas devido à venda de energia, os custos de implantação e também de operação e manutenção são calculados bem como o benefício econômico gerado por cada potência. A energia é calculada por meio de uma construção com a curva de permanência. Aquela potência 100% permanente permite a obtenção de uma energia de base. Qualquer outra potência superior escolhida resultará em um acréscimo de energia de base que pode ser aproximada por um trapézio. Desta forma, por meio das áreas dos trapézios, pode-se calcular a energia relativa a qualquer potência (equação 29)

$$E(n + 1) = E(n) + \Delta E = E(n) + \frac{1}{2}(\rho(n) + \rho(n + 1))(P(n + 1) - P(n)) \quad (29)$$

Onde: n = ordem da potência na curva de permanência.

A potência que rende o máximo benefício econômico líquido é então escolhida como aquela a ser implantada no aterro, como se observa na figura 13.b (Onde o parâmetro de rentabilidade econômica é representado pela taxa interna de retorno – TIR e a potência ótima é 600 kW). Pela figura 13a, pode-se perceber que a energia teórica produzida por

esta potência de 600 kW deve ser toda área delimitada entre a potência de 600 [kW], e a curva de permanência e que, na otimização de Silva (2012), os grupos geradores não operam a plena carga (dado que área que representa a energia não é retangular).

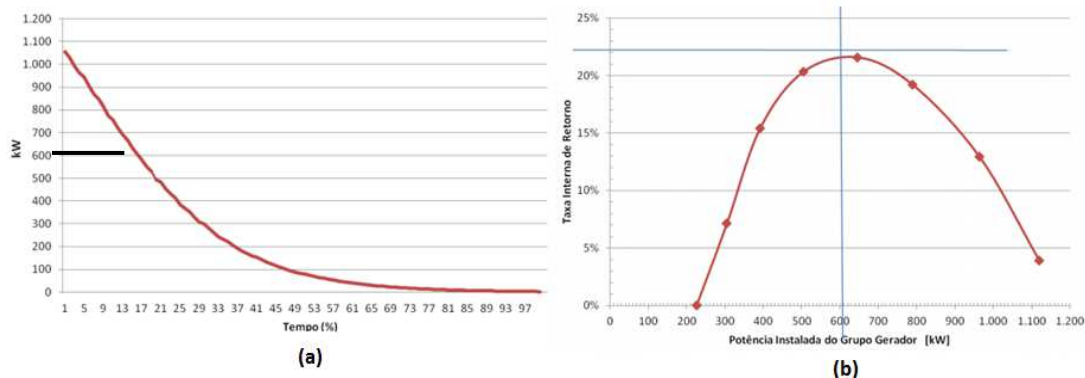


Figura 13: Curvas para otimização da potência teórica de um aterro sanitário. (a) Curva de permanência da potência de gás. (b) Curva de máxima rentabilidade econômica.

Fonte: Silva (2012).

2.4.5. Potencial Brasileiro de aproveitamento energético do biogás

Em país populoso como o Brasil, onde há grande geração de resíduos sólidos urbanos e efluentes líquidos, em desenvolvimento, onde se verifica o aumento do índice de tratamento de efluentes e resíduos, sobretudo em aterros (vide seção 3.2.2), e onde o agronegócio é preponderante e são gerados grandes volumes de resíduos vegetais e animais, o uso do biogás é uma opção extremamente interessante para produção de energia renovável. Neste âmbito, a tabela 3 apresenta o potencial Brasileiro de produção de energia por meio do biogás de diversas fontes.

Tabela 15: Potencial Energético Brasileiro de diversas fontes de biogás.

Fonte do Biogás	Potencial energético	Observações	Referência
Aterros sanitários	Potencial próximo a 4 [TWh _e] ¹	Cenários mais favoráveis para 2030	Barros et al. (2014)
Digestão anaeróbia da vinhaça	Potencial superior a 4 [TWh] devido a produção de vinhaça	Digestão da vinhaça em reatores anaeróbios e geração de energia em	Santos et al. (2011)

Tabela 15: Potencial Energético Brasileiro de diversas fontes de biogás.

	na safra da cana de 2010/2011	motores de Ciclo Otto	
Digestão anaeróbia das fezes de galinha	21,13 [MW] instalados	Geração de energia em Motores de combustão interna	Salomon e Lora (2009)
Digestão anaeróbia de resíduos de abatedouros de aves	Produção de biogás de 72,73 [10 ⁶ m ³ /ano], o que corresponde a um potencial de 0,21 [TWh _e /ano]	Geração de energia em Motores de combustão interna	Instituto Brasileiro de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012).

3. Metodologia

A metodologia proposta para este trabalho se divide em três partes: i) Definição e aplicação do método escalonado para aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário; ii) Comparação com um método de otimização presente na literatura e iii) análises de sensibilidade dos resultados.

Na primeira parte o método escalonado é proposto e definido formalmente em termos matemáticos. Posteriormente será determinado o aporte de resíduos a um aterro sanitário por meio da previsão de crescimento populacional de uma cidade e de seu índice de geração de resíduos (Seção 3.1.5). De posse da previsão da geração de resíduos, a produção de gás pode ser estimada. No presente trabalho optou-se por utilizar o software LandGem® para estimativa da produção de gás (Equação 18 – Seção 3.3.2). A potência e energia disponível a cada ano podem, por fim, ser calculada por meio das equações 23 e 24.

Neste ponto o método escalonado foi aplicado. Este se baseia na obtenção de uma potência de um grupo gerador, que quando operado a plena carga durante um período de tempo Δt , resulta na máxima produção de energia. Potências intermediárias ao pico da curva de potências e a base, que resultem no máximo incremento de produção energética são então investigadas. Todos os grupo geradores instalados operam a plena carga, sendo o número deles determinado por meio de uma comparação energética e econômica entre os cenários.

Na segunda parte, o método escalonado foi comparado com o método proposto por Silva (2012), a fim de que se obtenham as vantagens e desvantagens de cada um, definindo-se então a metodologia mais vantajosa.

Na terceira e última parte, análises de sensibilidade foram realizadas considerando-se variações nos valores de taxa, tarifa de venda de energia e valores de tonelada de crédito de carbono.

Os seguintes parâmetros econômicos foram necessários à análise de viabilidade: Valor presente líquido (VPL) e Custo nivelado da eletricidade LCOE (do inglês *Levelized Cost of Electricity* – por isto a sigla LCOE, conforme BRANKER et al., 2011), definidos nas equações 30 e 31. Quando o VPL é positivo o empreendimento é rentável e viável economicamente. Caso contrário, o empreendimento não é atrativo

economicamente. Já o custo nivelado de energia se refere à razão entre a somatória de custos transferidos ao ano inicial e a energia também descontada no tempo.

$$VPL = \sum_{t=1}^m \frac{E_n \cdot T - C_{om}}{(1+i)^n} - I \quad (30)$$

$$LCOE = \sum_{t=0}^m \frac{\left[\frac{C_n}{(1+i)^n} \right]}{\left[\frac{E_n}{(1+i)^n} \right]} \quad (31)$$

Sendo: E = energia produzida anualmente, T = tarifa de venda de energia, i = taxa de desconto, m = vida útil do empreendimento, C_{om} = custo de operação e manutenção, I = Custo de capital, C_n = Custo a cada ano e n = ano.

4. Resultados

4.1. Definição do novo método de motorização do aproveitamento energético dos aterros sanitários

O método escalonado para aproveitamento energético de biogás de aterros sanitários consiste na aplicação de grupos geradores operando a plena carga, funcionando somente no período de tempo em que estes podem ser totalmente supridos pelo biogás produzido no aterro. Segundo CEPEL (2001 *apud* Mello Jr e Fagá, 2005) o rendimento de motores a gás decai quando estes operam carga parcial (p. Ex. em um modelo de motor a gás apresentado pelos autores supracitados, o rendimento cai em 10% do total quando se trabalha com uma carga parcial de 60% ao invés de uma carga plena de 100%).

A escolha da potência do primeiro grupo gerador corresponde à potência, que quando combinada com o tempo de disponibilidade da vazão de gás para suprimento deste gerador (Δt), resulta na máxima produção energética (P_{ME} - Figura 14) (Equação 24). O tempo de disponibilidade Δt pode ser facilmente obtido pela interseção entre cada valor de potência com a curva de potência disponível do aterro (Cuja equação de melhor ajuste pode ser obtida pelo software Microsoft Excel ®). A partir do primeiro grupo gerador, geradores adicionais podem ser escolhidos como sendo aqueles que promovam um maior incremento energético ao aterro, como exemplifica a figura 15.

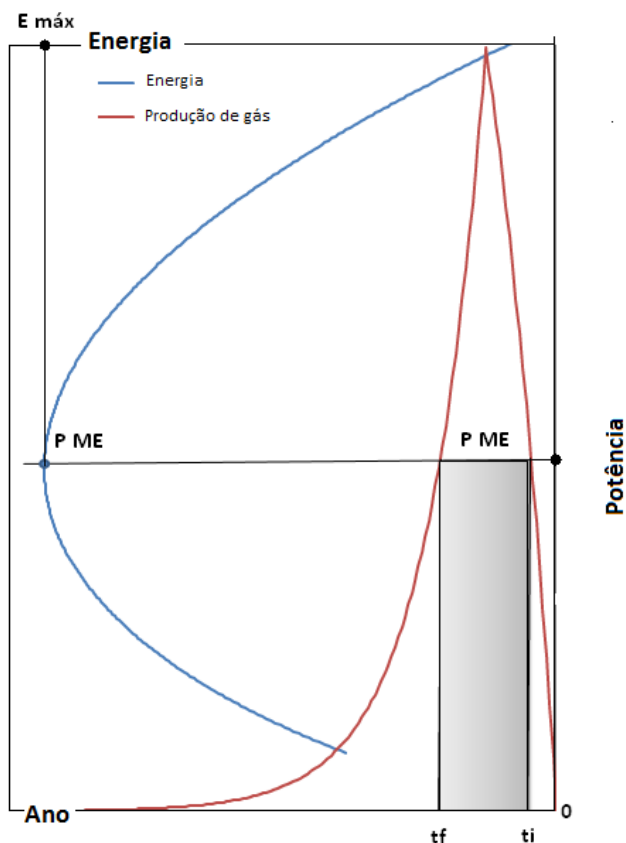


Figura 14: Potência de máxima produção energética.

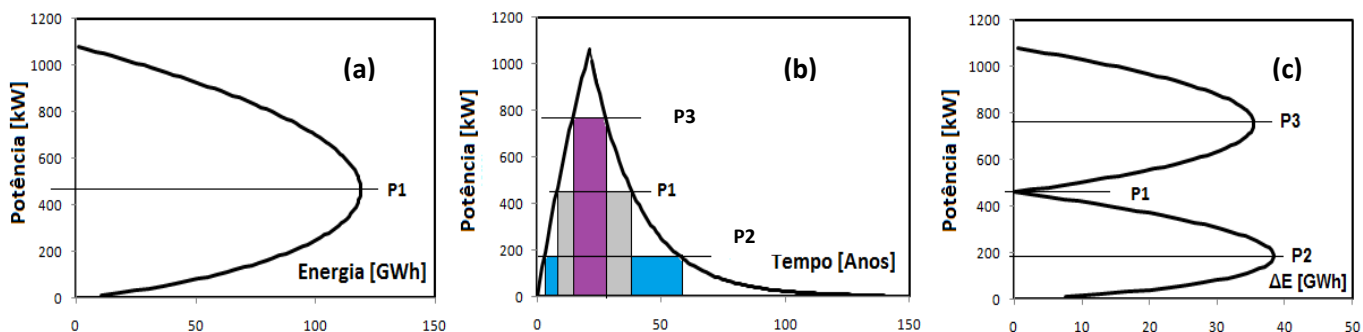


Figura 15: Escalonamento dos grupos geradores (a): Definição da potência de maior produção energética P_1 ; (c) Potências intermediárias (P_2 e P_3); e (b) Implantação destas potências na curva de produção de gás do aterro.

O cálculo do incremento energético (ΔE_1) que seria gerado pela implantação de mais um módulo gerador de potência P calculado pelas equações 32 e 33, que são deduzidas a partir da figura 14 (b). A Potência P que implicar no máximo ΔE_1 será a potência escolhida para implantação do segundo grupo gerador (P_2 - Eq. 34). A mesma lógica

pode ser aplicada na determinação da potência e acréscimo de energia devido implementação dos demais módulos de geração.

$$\text{Se } P < P_i - \Delta E = P. (t_{i_1} - t_i + t_f - t_{f_1}) = P. (\Delta t - \Delta t_1) \quad (32)$$

$$\text{Se } P > P_i - \Delta E = (P - P_i). \Delta t \quad (33)$$

$$P_2 = P \rightarrow \text{Máx } \Delta E_1 \quad (34)$$

Com o aumento do número de grupos de geradores, aumenta a produção energética, mas também o investimento em grupos geradores, assim como os custos de operação e manutenção, o que indica a existência de um ponto ótimo, onde a receita do acréscimo de energia devido novos grupos geradores passa a não superar os custos incrementais.

Obviamente, quando o presente trabalho se refere 1 gerador de uma certa potência P este não está necessariamente se referindo a um único grupo gerador, mas sim, a um sistema de geradores que representarão uma única unidade geradora, que pode ou não ser composta por um ou mais motores, que entrarão em funcionamento simultaneamente. O número de unidades geradoras no método escalonado será representado, em todos os casos como a letra N.

4.2. Aplicação do método de motorização

Para aplicação do método escalonado considerou-se o aterro hipotético na cidade de Itajubá (MG). Este aterro recebe resíduos dos seguintes municípios: Delfim Moreira, Itajubá, Piranguinho, Piranguçu, São José Alegre, Cachoeira de Minas, Brazópolis, Maria da fé, Marmelopólis, Wenceslau Braz, Santa Rita do Sapucaí (ITAJUBÁ NOTÍCIAS, 2013 e CIMASAS, 2014) e mais recentemente, Pouso Alegre.

O histórico de população destas cidades foi obtido junto ao Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2015) e está apresentado na tabela 16. O índice de geração per capita de resíduos das cidades foi calculado por meio da relação entre os resíduos gerados nestas cidades no ano de 2013 (Obtidos junto ao Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS, 2013) e a população projetada para este ano. Foi considerado um crescimento anual do índice de geração de resíduos sólidos igual 1%, conforme sugerido por Barros (2012). A figura 16 apresenta a correlação entre geração

de resíduos e a população destas cidades em 2013, enquanto que a figura 17 apresenta os índices de geração das cidades envolvidas já corrigidas para 2015. A média entre os valores de índice de geração foi adotada como o índice de geração das cidades das quais os dados de resíduos não estavam disponíveis.

Tabela 16: Histórico populacional das cidades participantes do consórcio CIMASAS e que enviam resíduos ao aterro de Itajubá (MG). Fonte: IBGE (2015)

Ano	1991	1996	2000	2007	2010
Itajubá	75014	79569	84135	86673	90658
Delfim Moreira	7860	7902	8032	7834	7971
Wenceslau Brás	2487	2357	2596	2509	2553
Piranguinho	6370	6528	7399	7849	8016
Piranguçu	4581	4757	4974	5113	5217
São José do Alegre	3320	3358	3802	3908	3996
Santa Rita do Sapucaí	26317	29064	31264	34246	37754
Cachoeira de Minas	9323	9850	10555	10820	11034
Brazópolis	13711	14383	15165	14452	14461
Maria da Fé	13629	14326	14607	14249	14216
Marmelopólis	2944	3207	3293	3100	2968
Pouso Alegre	81836	92620	106776	120467	130615
Total	247392	267921	292598	311220	329459

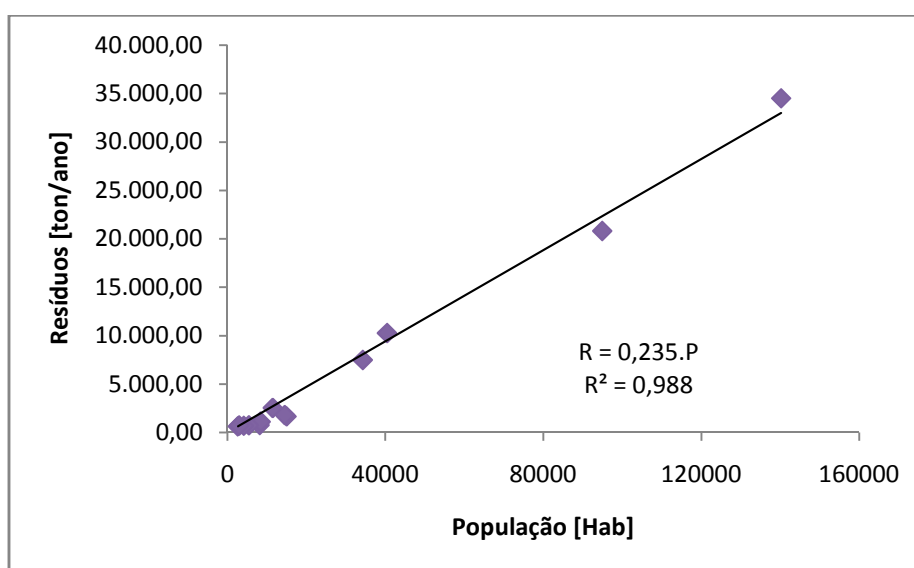


Figura 16: Correlação entre resíduos e população das cidades contribuintes ao aterro no ano de 2013.

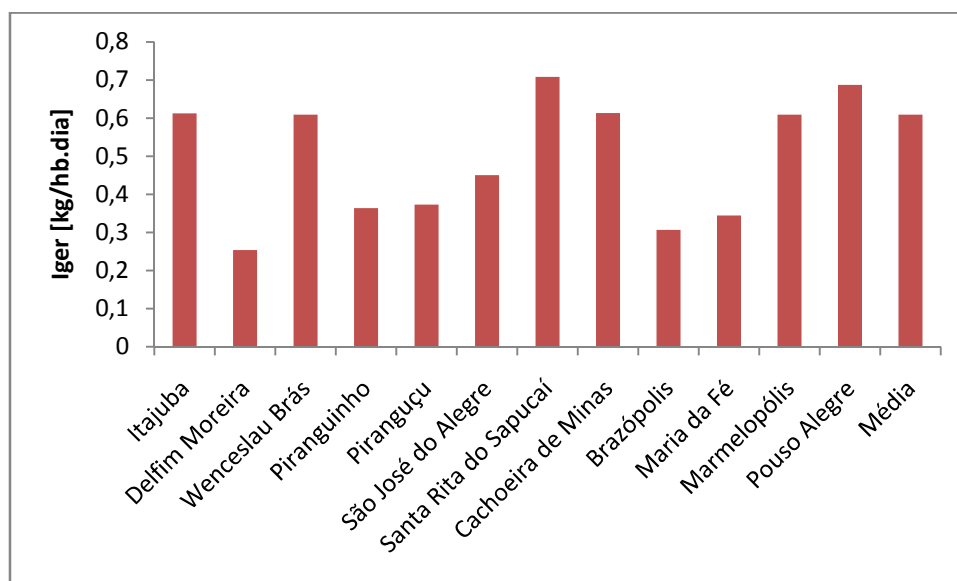


Figura 17: Índice de geração de resíduos nas cidades contribuintes ao aterro no ano de 2015.

A partir do histórico populacional e do índice de geração de resíduos, aplicou-se o modelo logístico a fim de se prever o crescimento populacional da cidade (Equação 9-11) e projetar a geração de resíduos na cidade nos próximos anos (Por meio da Equação 1, figura 18). A escolha do modelo logístico foi escolhida devido à tendência deste método em apresentar uma estabilização do crescimento da população.

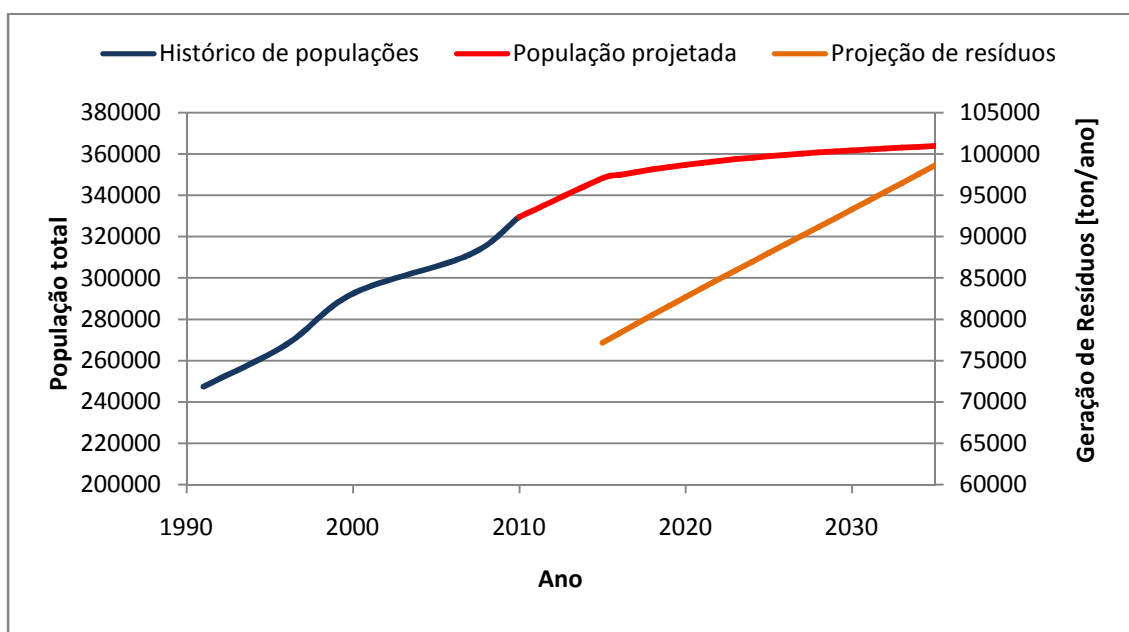


Figura 18: Projeção populacional e de geração de resíduos.

De posse da projeção de resíduos pode-se calcular a projeção de gás por meio do software LandGem® (USEPA, 2005 – Eq. 18) e a evolução temporal da potência (Eq. 23 e 24 – Figura 19). Os parâmetros k e L_0 necessário para aplicação deste método foram obtidos por meio das tabelas 17 e 18, sabendo-se que a precipitação média de Itajubá é próxima a 1557 [mm/ano] (Climate-Data.org, S/d) e que os resíduos gerados na cidade têm um teor de matéria orgânica próximo a 65% (Silva e Costa, 2003), e podem, portanto, serem classificados como resíduos moderadamente degradáveis. Os valores de k e L_0 obtidos foram respectivamente iguais a: 0,06 [ano⁻¹] e 170 [m³/ton]. Foram considerados motores de ciclo Otto como tecnologia de conversão energética. O rendimento desta tecnologia é de aproximadamente 33% (Tabela 13). Considerou-se também uma eficiência de coleta de 55,5%, valor obtido pelo cálculo da média aritmética dos estudos de Silva (2013) e Watermolen et al. (2012).

Tabela 17: Determinação dos valores de k [ano⁻¹]. Fonte: Banco Mundial (2004)

Precipitação anual [mm]	RS relativamente inerte	RS moderadamente degradável	Altamente degradável
< 250	0,01	0,02	0,03
250 - 500	0,01	0,03	0,05
500 - 1000	0,02	0,05	0,08
> 1000	0,02	0,06	0,09

Tabela 18: Determinação dos valores de L_0 [m³ CH₄/ton]. Fonte: Banco Mundial (2004).

Característica do lixo	Mínimo	Médio	Máximo
RS inerte	5	15	25
RS moderadamente degradável	140	170	200
RS altamente degradável	225	262,5	300

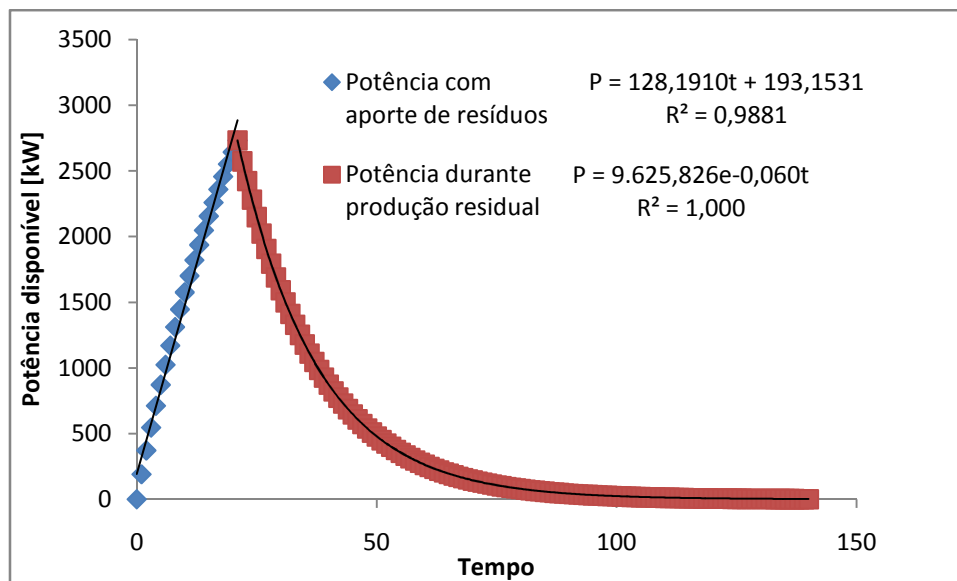


Figura 19: Evolução temporal da potência disponível devido à combustão do gás do aterro.

Como demonstra a figura 16, a produção de gás atinge um pico no último ano de aporte de resíduos, sendo seguida de uma produção residual onde os microorganismos produzirão biogás, em quantidades cada vez menores, por meio da degradação do teor orgânico dos resíduos já depositados nos anos anteriores. As equações de melhor ajuste, tanto da fase de produção de gás com aporte de resíduos quanto na fase de produção residual foram obtidas por meio do Software Microsoft Excel® e estão apresentadas na figura 19.

A partir deste ponto, a energia passível de ser produzida por cada potência (Considerando-se grupos geradores funcionando a plena carga) pode ser calculada. Conforme já discutido na descrição do método escalonado (seção 5.1), o tempo de disponibilidade de cada potência também se altera de potência para potência (Figura 17). Pela figura 20, também pode se observar que a potência cuja implantação resultaria na máxima produção energética P_{ME} está próxima a 1220 [kW], tendo um tempo disponível de 26 anos.

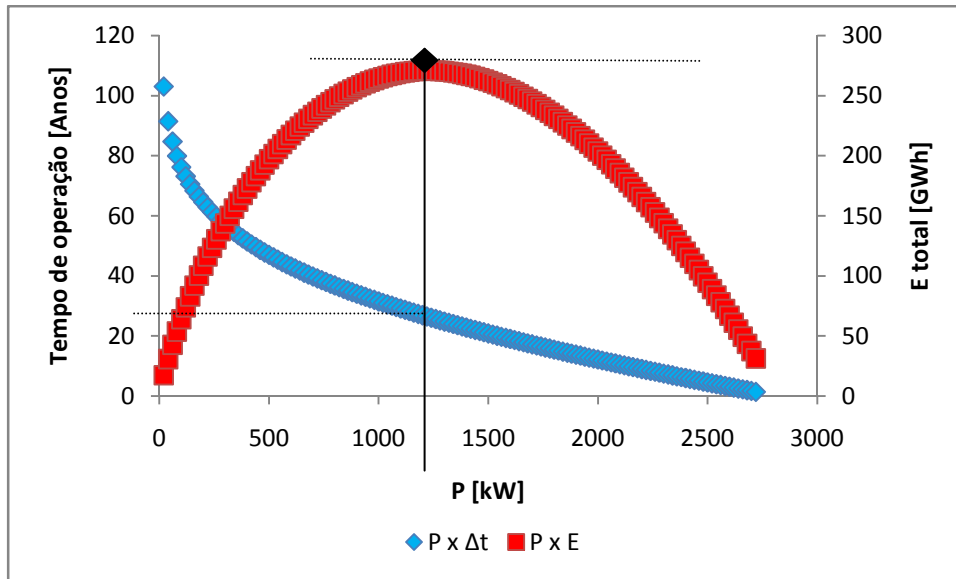


Figura 20: Relação entre tempo de disponibilidade, potência e energia produzida.

A partir da determinação da potência do primeiro grupo gerador, pode-se investigar qual seria a produção de energia incremental oriunda da implantação de demais geradores. A figura 21 apresenta o incremento energético gerado por cada potência por grupos geradores adicionais, permitindo a observação de que o uso de sete grupos geradores ($N = 7$) permite, ao longo de toda vida útil do aterro, o aproveitamento de quase 530 [GWh] (81,6 % do biogás gerado no aterro). A partir da observação dos máximos incrementos energéticos na figura 21, pode-se realizar o planejamento do aproveitamento, caso fossem utilizados os sete geradores, apresentado na figura 22. Na figura 23 pode-se observar o escalonamento das potências necessárias para aplicação do método.

Contudo, como pode-se observar pelas figuras 21 e 23, o incremento energético se torna cada vez menos expressivo conforme se aumenta o número de grupos geradores. Por exemplo, o aumento de 1 para 2 geradores implica em um incremento energético de 86 [GWh] (41,7 para 55% do potencial de toda vida útil do aterro) enquanto que um incremento de 6 para 7 geradores resulta em aproximadamente 20,8 [GWh] (79 a 82,2 % do potencial de toda vida útil do aterro). Observa-se também, pela figura 21, que a partir de três geradores os picos das curvas de energia estão cada vez mais próximos. O mesmo fato pode ser visto na figura 23, onde a partir de três grupos geradores se observa uma tendência de estabilização da energia produzida. Desta forma conclui-se

que o aproveitamento energético em aterros deve ter no máximo 3 grupos geradores pois a implantação de mais módulos resultará em um maior incremento de custo do que de energia. Desta forma nos cálculos posteriores serão escalonados até no máximo três grupos geradores (3 potências).

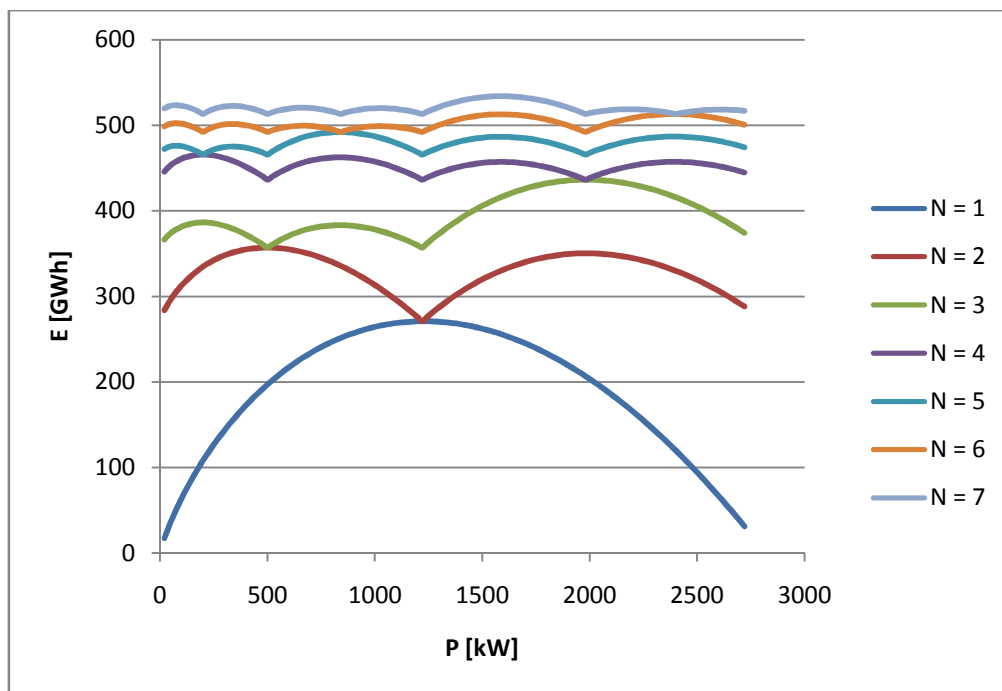


Figura 21: Incremento energético da utilização de módulos geradores adicionais nos pontos de máximo incremento energético.

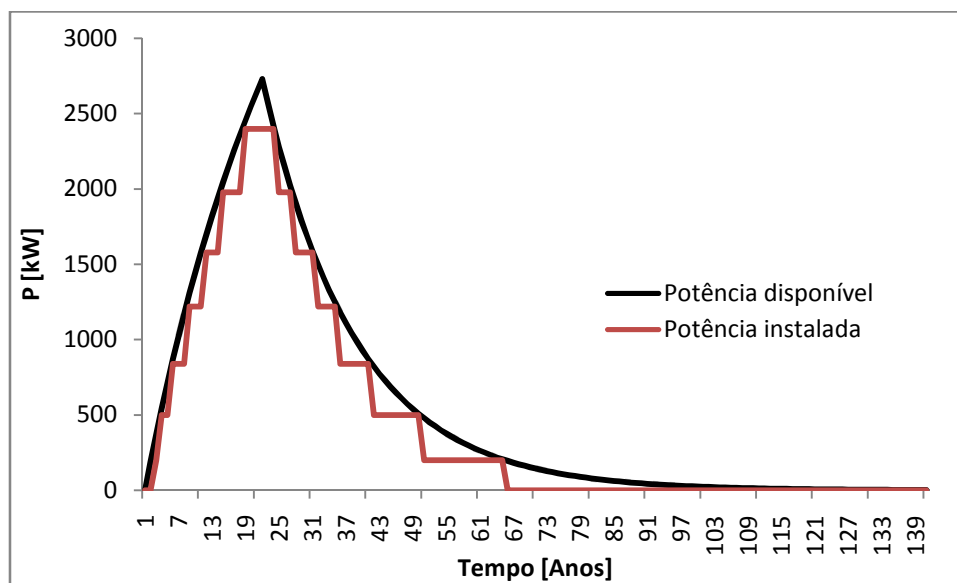


Figura 22: Potência disponível e potência implantada para N = 7.

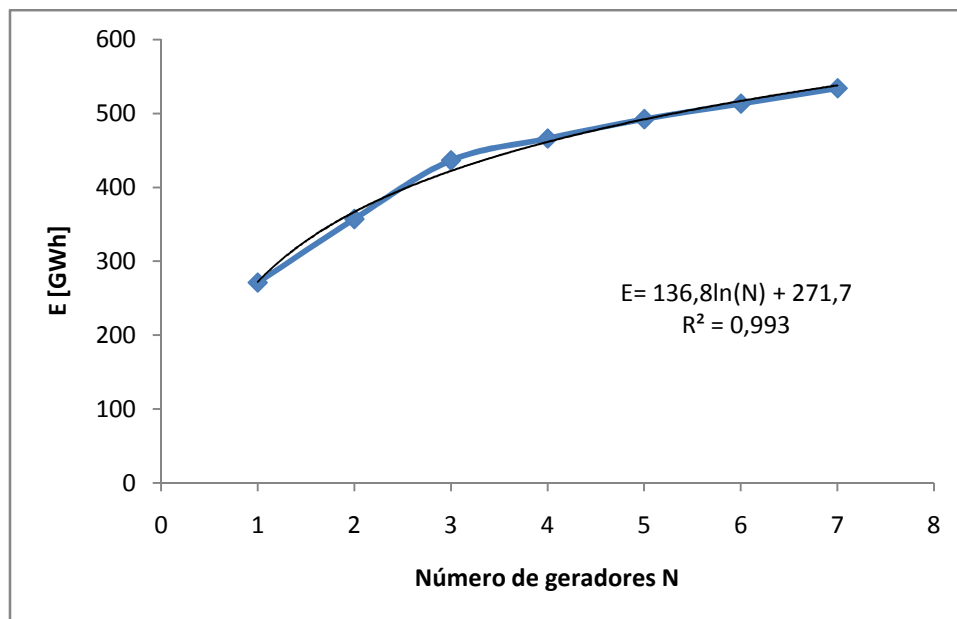


Figura 23: Aumento da produção energética com o aumento do número de grupos geradores.

4.3. Proposta de alteração no método de Silva (2012)

Conforme já discorrido na seção 3.4.4 o método de Silva (2012) se baseia na construção de uma curva de permanência de modo análogo ao realizado no estudo das vazões de PCHs. Contudo propõe-se aqui uma alteração neste método, alteração que se baseia na eliminação do uso da curva de permanência e no cálculo da energia diretamente pelo cálculo da área abaixo da curva de potência disponível no aterro, conforme exemplifica a figura 24, para um horizonte de 20 anos de produção de gás. Assim como o método original, o método de Silva modificado funciona com um escalonamento de potências em um único grupo gerador ao invés de um escalonamento de grupos geradores que trabalhem a potência fixa. Este, opera portanto, com cargas variáveis. Desta forma podemos calcular as energias geradas neste método de aproveitamento em duas fases: i)

A energia resultante da fase em que os geradores operam em carga variável: Que pode ser calculada pela área abaixo da curva de potências compreendida entre o ano 0 e o ano inicial de operação a plena carga t_i (E_1 que pode ser calculada por uma integração definida entre 0 e t_i – equação 35) e ii) A energia resultante da fase em que os geradores operam a plena carga, calculada pela área retangular características de aproveitamentos

a carga total (E_2 , equação 36). A energia total é calculada pela soma das energias E_1 e E_2 (equação 37).

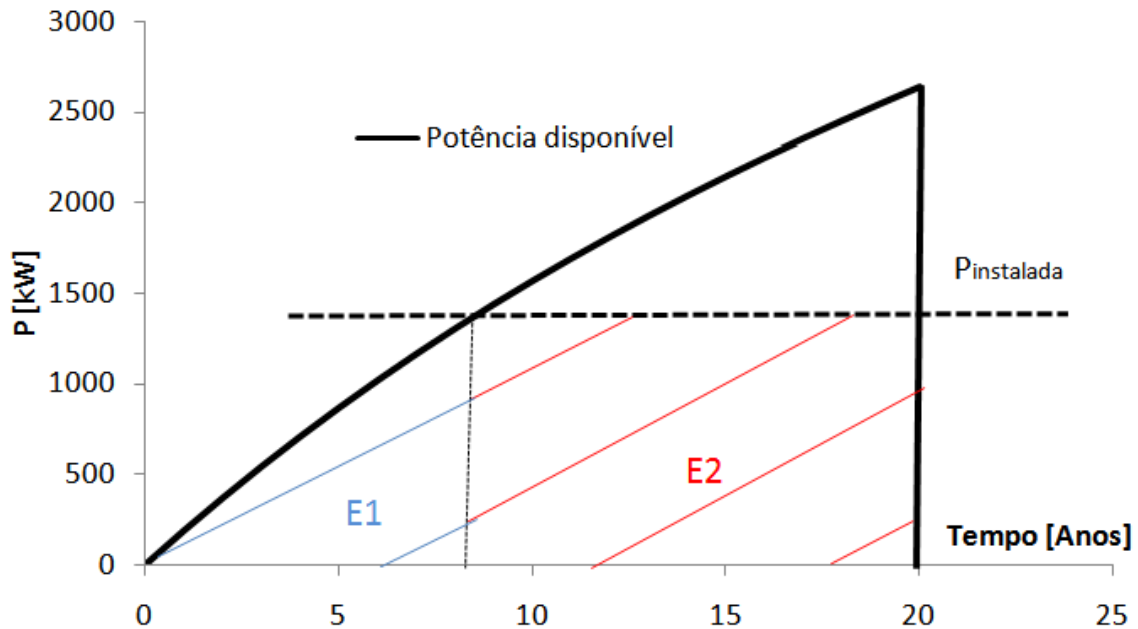


Figura 24: Exemplo do funcionamento do método de Silva modificado

$$E_1 = \int_0^{t_i} P_{dis}(t) dt \quad (35)$$

$$E_2 = P_{inst} \cdot (t_f - t_i) \quad (36)$$

$$E_{tot} = E_1 + E_2 \quad (37)$$

Já que o método de Silva modificado apresenta uma produção energética variável entre os anos, a avaliação econômica requer o cálculo de energia a cada ano durante a fase em que o aproveitamento é feito com carga variável, a fim de que sejam determinadas as receitas anuais devido à venda da energia. Estas puderam ser calculadas por meio do cálculo da área delimitada por cada potência e o ano em questão, conforme demonstra a figura 25. A energia E_1 é igual à soma destas energias individuais relativas a cada ano do aproveitamento sob carga variável.

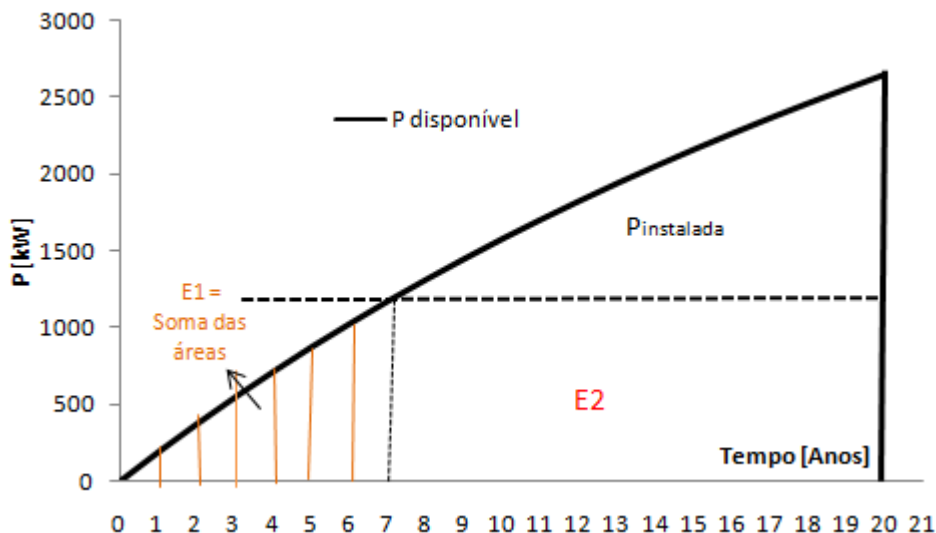


Figura 25: Cálculo da energia a cada ano pelo método de Silva modificado, durante a fase do aproveitamento a plena carga.

4.4. Avaliação econômica do método escalonado e comparação dos resultados

Para avaliação do método escalonado foram realizadas comparações econômicas e energéticas deste com o método de otimização proposto por Silva (2012) e o método de Silva (2012) modificado. Este foi aplicado em três cenários, sendo o primeiro definido pela implantação de um único grupo gerador, o segundo por dois, e o terceiro, por três módulos. Os cálculos foram conduzidos para 20 anos de aproveitamento (Primeira parte da curva de produção de biogás) a fim de que se obtivesse um horizonte fixo e realista para realização e recuperação de investimentos e comparação dos métodos.

O planejamento do aproveitamento energético do método escalonado foi feito com base na observação das potências que providenciavam maior incremento energético pela adição de um grupo gerador (Figura 21). Os três cenários são apresentados abaixo:

- 1º Cenário: $N = 3$ geradores. Entre 0 e 2 anos não há aproveitamento. Entre 3 e 7 anos há um aproveitamento utilizando-se um motor de combustão interna de 500 [kW]. Entre 8 a 13 anos há uma aquisição de um novo grupo gerador totalizando

uma potência de 1220 [kW] e a última etapa ocorre com o aproveitamento de uma potência de 1980 [kW]. Neste cenário 79,2% do gás produzido na primeira fase de produção do aterro é consumido.

- 2º Cenário: $N = 2$ grupos geradores. Entre 0 e 2 anos não há aproveitamento. Entre 3 e 7 anos o aproveitamento ocorre com uma potência inicial de 500 [kW]. Entre o 8º e o 17º do aproveitamento há uma aquisição de um novo grupo gerador de potência de 1220 [kW]. Neste cenário 49% do gás produzido na primeira fase de produção do gás do aterro é consumida.
- 3º Cenário: $N = 1$ gerador. O aproveitamento se inicia no 8º ano de produção de gás e se encerra no 17º ano com uma potência de 1220 [kW]. Neste cenário 40,9 % do gás produzido na primeira fase de produção do aterro é consumido.

Os 3 cenários explicitados acima estão apresentados na figura 26. O método de Silva (2012) foi aplicado conforme apresentado na seção 3.4.4 juntamente com o método de Silva (2012) modificado. A energia produzida nestes métodos é variável com os anos, e os geradores operarão a plena carga caso a potência disponível pelo gás produzido no aterro em determinado ano for inferior a potência instalada da usina.

A modificação proposta ao método de Silva objetiva minimizar os erros dos cálculos energéticos utilizando-se a curva de permanência, que é construída por meio de vazões anuais de gás e, portanto não pode ser utilizada com maior precisão para se prever permanência de vazões de gás dentro de um único ano. Nestes métodos os parâmetros de viabilidade econômica, o VPL e o LCOE (Equações 30 e 31) foram calculados para cada potência passível de ser implantada no aterro, sendo escolhida por fim a implantação da potência que maximizou o VPL.

Para as análises econômicas realizadas no presente trabalho, foram utilizados os dados de custo apresentados nas tabelas 13 e 14. O investimento inicial foi calculado pela soma dos custos dos componentes individuais necessários ao funcionamento da usina (Equação 38). Os custos de operação e manutenção dos equipamentos de coleta e armazenamento do gás foram adotados como sendo 5% do investimento inicial. A mesma porcentagem foi adotada para manutenção e operação dos motores de

combustão interna. Considerou-se ainda uma tarifa de venda de energia igual a 209 [R\$/MWh] (Valor praticado empreendimentos de biomassa no leilão A-5, ANEEL, 2014b) e uma taxa de desconto de 12% a.a. Adotou-se uma vida útil econômica de 10 anos para os módulos geradores. Desta forma a depreciação ocorria a uma taxa de 10% anualmente o que permitiu a consideração de um valor residual devido à venda de grupos geradores no ultimo ano do aproveitamento do método escalonado, quando o módulo em questão não chegava a ser utilizado durante dez anos.

Nesta primeira análise não foram considerados créditos de carbono, dado que o mercado de créditos está em declínio nos últimos anos. Este fato que pode ser observado pela queda do valor da tonelada de carbono entre os anos de 2012 (2,7 [£/ton] – BOVESPA, 2012) e 2013 (0,5 [US\$/ton] – ECX, 2013 *apud* LEME et al., 2014). Contudo em análise posteriores (seção 4.5 e 4.6) será avaliado o efeito dos créditos de carbono em cenários hipotéticos de cotações das toneladas de carbono. Os cálculos de crédito de carbono podem ser calculados por meio das equações 39 e 40 (Modificado de CETESB, 2006)

$$I = C_{MCI} \cdot P + C_{TUB} \cdot L + C_{QMD} + C_{CMP} \cdot Q_{hr} + C_{GSM} \cdot Q_{arm} \quad (38)$$

$$CC_{Queima\ CH_4} = Q_{CH_4} \left[\frac{10^3 m^3}{s} \right] \cdot f_1 \cdot E_{queima} \cdot Vc \quad (39)$$

$$CC_{Geração} = FE_v \cdot E \cdot Vc \quad (40)$$

Sendo: C_{MCI} = custo unitário do motor de combustão interna = 1600 [R\$/kW], (tabela 13), C_{TUB} = custo unitário da tubulação = 402 [R\$/m] (Tabela 14), L = comprimento da tubulação, adotado = 500 [m], C_{QMD} = custo da unidade queimadora = 320.000 [R\$] (Tabela 14), C_{CMP} = custo unitário do compressor [m³/hr] = 804 [R\$/m³/hr], (Tabela 14), Q_{hr} = vazão em m³/hr, C_{GSM} = Custo do gasômetro = 140 [R\$/m³], Q_{arm} = vazão de gás planejada a ser armazenada no gasômetro, igual a 10% da vazão mensal (Vazão de 3 dias), $CC_{Queima\ CH_4}$ = Crédito de carbono devido a combustão do biogás nos queimadores e nos motores [R\$], $CC_{Geração}$ = Crédito de carbono devido geração de eletricidade [R\$],

FE_v = fator de emissão evitada adotado como sendo igual a média dos fatores de emissão do sistema interligado Brasileiro em 2014 = 0,59 [tCO₂/MWh] (MCT, 2014; As emissões da combustão do biogás foram desprezadas, pois este é um gás biogênico), E_{queima} = Eficiência da queima adotada como sendo 90%, V_c = Valor dos créditos de carbono e f_1 = fator de equivalência entre uma tonelada de CO₂ e CH₄ igual a 23. Esta vazão foi escolhida devido ao fato de que 3 dias de armazenamento de gás já é o bastante para eventuais manutenções nos motores.

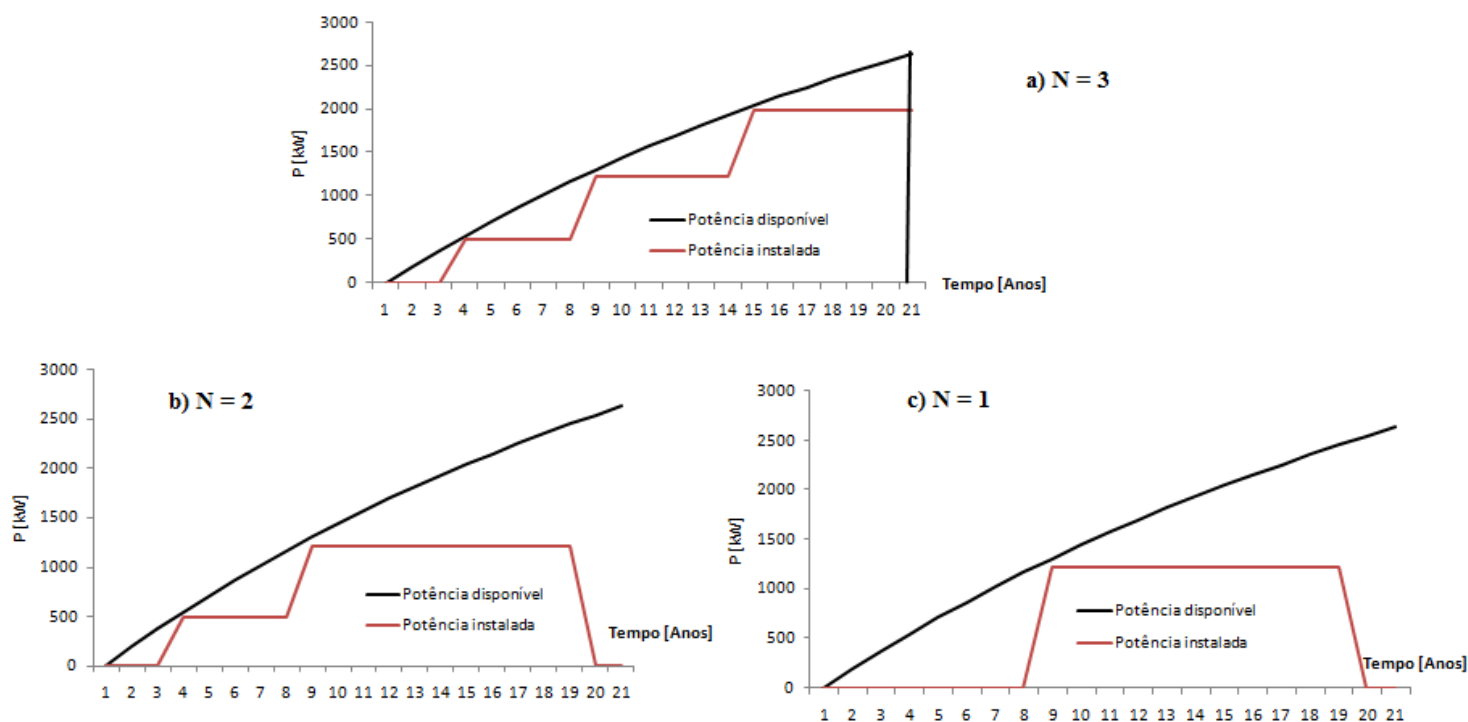


Figura 26: Planejamento energético e disposição dos geradores no método escalonado. (a) Aplicação com três módulos geradores; (b) Aplicação com dois grupos geradores e (c) Aplicação com um único grupo gerador.

Por fim pode-se calcular os parâmetros energéticos e avaliar a viabilidade econômica de cada método. A curva que relaciona o VPL com a potência, obtidas a partir da metodologia de Silva (2012) original e modificada foram obtidas e estão apresentadas na figura 27. Nesta podemos observar que o método de Silva (2012) aplicado de ambas as formas garante pequena viabilidade para o empreendimento, sendo, porém as potências ótimas do método original superiores as demais, o que o caracteriza como mais vantajoso devido à maior produção energética. A figura 28 apresenta ainda a evolução das energias E_1 e E_2 em função da potência, demonstrando que conforme se

aumenta a potência, a porção de energia produzida por meio de geradores a plena carga cresce (E_1) e diminui a porção de energia produzida pela operação em cargas parciais (E_2). A energia total é calculada pela somas de E_1 e E_2 e, portanto esta é sempre crescente.

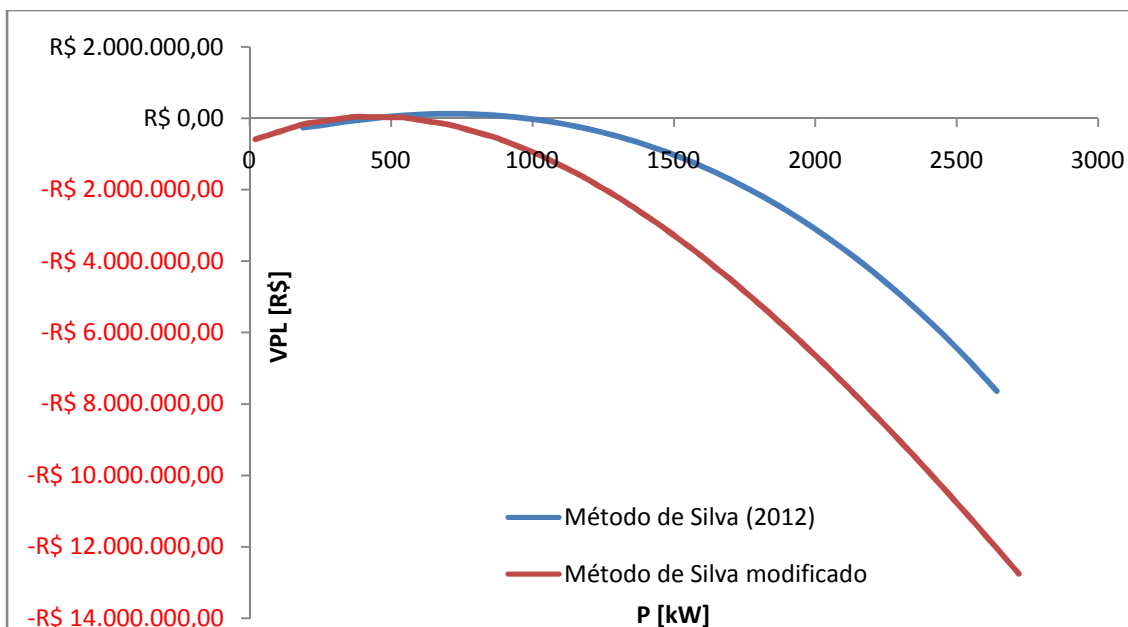


Figura 27: Resultados obtidos pela aplicação da metodologia de Silva (2012) e Silva modificado.

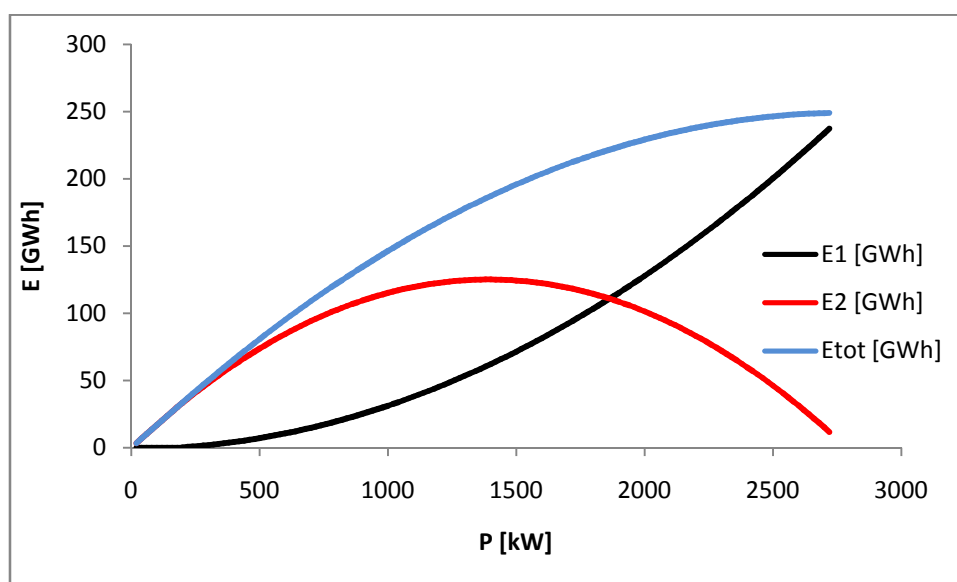


Figura 28: Evolução das energias E_1 e E_2 em função da potência no método de Silva modificado (2012).

A comparação entre os ambos os métodos é realizada de modo mais detalhado nas figuras 29, 30 e 31. Nestas, são apresentadas a comparação (energética e econômica) dos três cenários do método de motorização aqui proposto contendo escalonamento do número de geradores e a metodologia proposta por Silva (2012) original e modificada. Pela figura 29, observa-se que quanto ao quesito energético, o cenário em que o método escalonado foi aplicado utilizando-se 3 módulos geradores foi o mais vantajoso, sendo contudo, o pior no quesito econômico devido ao acréscimo de custos. O método de Silva (2012) modificado foi o pior método com relação ao aproveitamento energético. O método escalonado para $N = 1$ e o método de Silva (2012) original estiveram bem próximos enquanto que o método escalonado com $N = 2$ apresentou uma produção energética levemente superior a estes.

Já na figura 30, observa-se que os únicos casos em que a viabilidade do empreendimento não foi assegurada foram os da aplicação do método escalonado com $N = 2$ e $N = 3$ módulos geradores. Observa-se ainda pelas figuras 29 e 30 que a modificação realizada no método de Silva (2012) promoveu um declínio na eficácia deste método tanto em termos energéticos quanto econômicos.

Os resultados do custo de energia nivelada também foram calculados e estão apresentados na figura 31. Neste podemos observar uma proximidade dos LCOEs do método escalonado para $N = 1$ e de ambas as formas do método de Silva (2012), sendo, contudo o método escalonado para $N = 1$ o método capaz de permitir a exploração energética do aterro com o menor custo nas condições estudadas.

Os dois melhores métodos em termos econômicos foram o método escalonado com $N = 1$ e o método de Silva original, dado que enquanto o método escalonado foi superior ao método de Silva (2012) no quesito econômico apresentando VPL quase 50 % superior e um custo de energia 2,24 [US\$/MWh] mais barato, o método de Silva (2012) foi superior no quesito energético produzindo, no total, mais 5 [GWh] que o método escalonado (4,8% a mais de energia). Vale-se ressaltar que não foi considerada a queda de rendimento característica de motores a gás quando estes trabalham a cargas parciais (Conforme discutido na seção 4.1). Caso estes sejam analisados a produção energética do método de Silva (2012) fatalmente cairá, o que consequentemente torna os resultados

do método escalonado mais confiáveis. Devido a esta razão e a preponderância da questão econômica, recomenda-se a utilização do método escalonado para $N = 1$.

O método escalonado, desenvolvido no presente trabalho, também esteve próximo de se viabilizar quando se utilizaram $N = 2$ grupos geradores, apresentando, entretanto, significativa produção energética (A segunda maior de todos os cenários – 123,5 GWh). Com a energia produzida por um meio renovável como o biogás de aterro sanitário, diminuem-se também as emissões de gases de efeito estufa, o que implica em ganhos ambientais. Além disto, este tipo de produção facilita o planejamento energético descentralizado, dado que os aterros geralmente estes são construídos próximos a cidades (centros consumidores).

O método escalonado com $N = 3$, apesar de permitir um aproveitamento energético muito superior aos demais (Quase 200 [GWh, uma média de 10 [GWh] anuais) apresentou intensa inviabilidade econômica, fato que pode ser explicado pelo alto custo imposto pelo acréscimo de geradores e a maior capacidade necessária aos equipamentos de uso e armazenamento do gás, já que este método utiliza mais gás para combustão e geração de energia

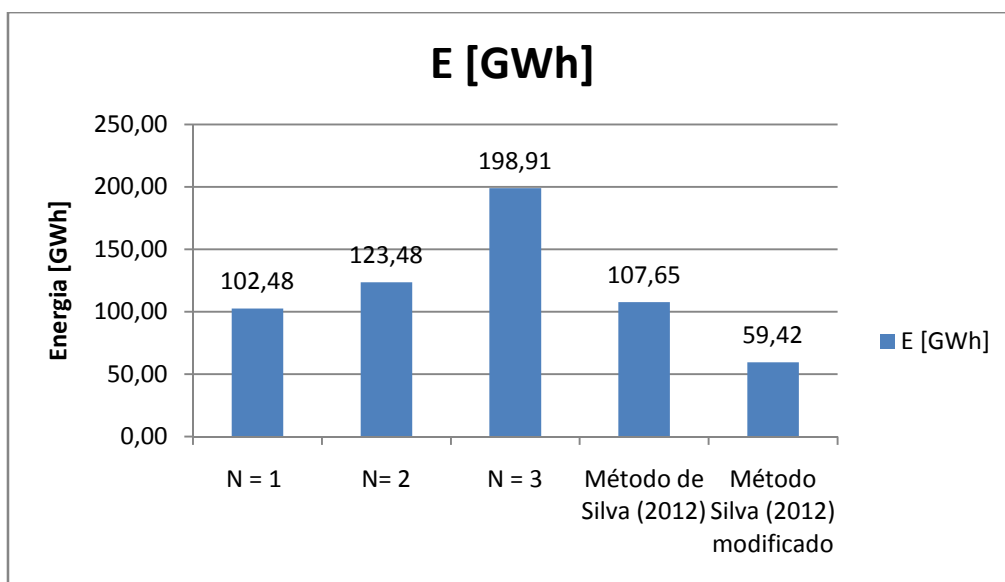


Figura 29: Produção energética ao longo de toda vida útil do aterro sanitário, pelos diversos métodos de aproveitamento utilizados.

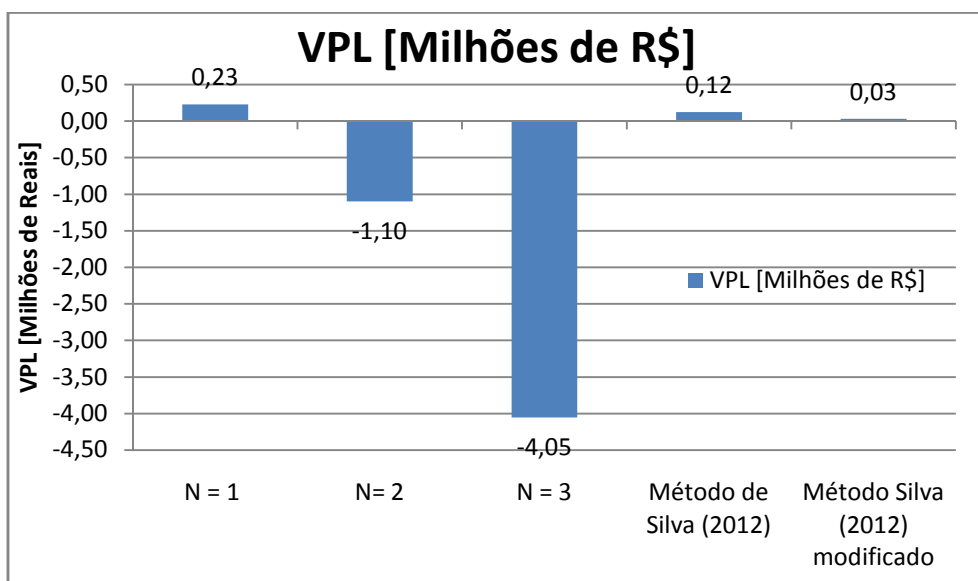


Figura 30: Avaliação econômica dos diversos métodos avaliados para aproveitamento energético do aterro sanitário

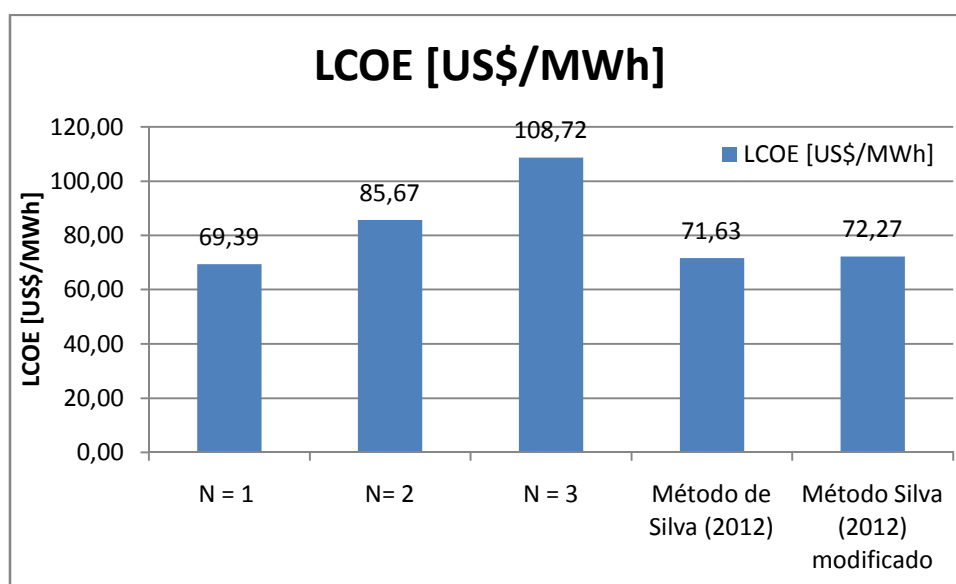


Figura 31: Custo de energia nivelada dos diversos métodos avaliados para aproveitamento energético do aterro sanitário

De acordo com a agência internacional de energia (International Energy Agency – IEA, 2010) o LCOE de projetos de biogás nos EUA, quando se considera uma taxa de desconto de 10 %, está próximo a 63,32 [US\$/MWh] (Para potências = 30 MW), valor não muito inferior ao calculados acima para o cenário Brasileiro com a taxa de juros de

12% quando se aplicou o método escalonado com $N = 1$. Já os valores típicos de LCOE de projetos de biomassa de lenha no Brasil estão próximos a 102 [US\$/MWh] ($P = 10$ MW), o que demonstra que o aproveitamento de biogás de aterros, sobretudo com um único gerador, é menos custoso que os projetos de biomassa de lenha em geral. Contudo as conclusões quanto à comparação do LCOE são difíceis de serem realizadas no presente caso, devido às diferenças de potência entre o empreendimento.

4.5. Resultados do método escalonado em cenários alternativos

Os mesmos resultados apresentados acima para o método escalonado foram recalculados em cenários alternativos. Os cenários estão definidos a seguir e os resultados destes estão apresentados na tabela 19.

Cenário 1 (C1): Cenário idêntico ao original considerando-se contudo o valor da tonelada de crédito de carbono (V_c) relativo ao ano de 2012, quando o mercado de créditos de carbono estava mais aquecido, a saber, $V_c = 2,7$ [€/tCO₂] (BOVESPA, 2012)

Cenário 2 (C2): Cenário idêntico ao original considerando-se contudo uma tarifa de energia similar ao do mercado livre energia, adotada igual a 388,48 [R\$/MWh] (TIAGO FILHO, 2015).

Cenário 3 (C3): Cenário idêntico ao original considerando-se contudo os custos do tratamento do biogás para remoção de siloxanos, umidade e gás sulfídricos. O custo de implantação da unidade de tratamento é igual a 999 [R\$/kW] e o sistema de tratamento remove umidade, siloxanos e algumas vezes o ácido sulfídrico para assegurar que o biogás possui a qualidade necessária para a operação. Os sistemas de tratamento consistem de *chillers*, separadores de umidade, vaso de remoção de siloxanos, ventiladores e conexões associadas (USEPA, 2007, *apud* ZANETTE, 2009). A implantação deste permite uma ampliação da vida útil dos motores, adotada como sendo igual a 15 anos (5 anos superior a vida útil dos motores sem o tratamento do gás). A não implantação de unidades para tratamento do biogás, sobretudo para remoção de siloxanos, pode causar severos danos aos equipamentos de conversão energética, como demonstra a figura 32.



Figura 32: Deposição de sílica nos equipamentos de conversão energética. Fonte: DESOTEC (2015).

Tabela 19: Resultados dos cenários alternativos

	Número de geradores	VPL [Milhões de R\$]	LCOE [U\$/MWh]	E [GWh]
C1	N = 1	4,3	69,4	102,5
	N = 2	3,1	85,7	123,5
	N = 3	0,17	108,9	198
C2	N = 1	4,44	69,4	102,5
	N = 2	5,05	85,7	123,5
	N = 3	3,75	108,9	198
C3	N = 1	0,145	71,39	133
	N = 2	-1,7	90,66	154
	N = 3	-5,7	120,93	198

Por meio da análise dos resultados da tabela 19, pode se observar que a inserção de créditos de carbono (C1) permite a viabilização da aplicação do método escalonado com 2 ou 3 geradores e a intensificação do VPL do método escalonado com um único grupo gerador em mais de 4 [Milhões de R\$].

Quando foi considerada a tarifa de venda de energia da tarifa elétrica do mercado livre (C2), a aplicação do método escalonado com 2 e 3 geradores resultou em uma maior atratividade econômica do que o método escalonado com um único gerador. O aumento de 1 para 2 geradores implica em um aumento da energia em 20 [GWh], enquanto que o aumento de 2 para 3 geradores implica em um crescimento ainda maior, igual a 70 [GWh]. Sendo assim o aumento da tarifa colabora com a viabilização de métodos mais eficientes de aproveitamento energético, o que implicam em um maior desenvolvimento da geração distribuída e um montante mais elevado de emissões evitadas devido a não utilização da eletricidade da rede.

Por fim no cenário C3 foram considerados os custos da unidade de tratamento do gás. Apesar de esta consideração permitir um aumento da produção energética em aproximadamente 30 [GWh] nos métodos escalonados com $N = 2$ e $N = 1$ devido ao aumento de vida útil dos geradores, este elevou também os custos nivelados da energia dos mesmos em até 12 [US\$/MWh] no caso de $N = 3$, o que resulta em uma queda da viabilidade econômica em todos os casos.

4.6. Análises de Sensibilidade

A viabilidade econômica do método escalonado foi submetido a uma análise de sensibilidade quanto à variação dos parâmetros tarifa de venda de energia (T) (Figura 33), taxa de desconto (i) (Figura 34 quanto ao VPL e 35 quanto ao LCOE) e valor da tonelada de crédito de carbono (V_c) (Figura 36). Os valores de tarifa foram variados entre 100 (Cenário pessimista) e 400 (Cenário muito otimista, com tarifa próxima aos valores do mercado livre de energia) [R\$/MWh], os de taxa entre 5% (Valor otimista típico de empreendimentos incentivados) e 15 % (Valor pessimista, com juros muito elevados) e os da tonelada de créditos de carbono entre 0 (Cenário sem créditos de carbono) e 15 [R\$/ton] (Valor otimista, tomado considerando-se a manutenção e o aquecimento do mercado de créditos de carbono). Em todos os casos o parâmetro de

viabilidade econômica escolhido para análises de sensibilidade foi o VPL. Como variações na taxa de desconto também provocavam variações no LCOE ($LCOE = f(i)$), somente neste caso, as variações de LCOE também foram analisadas.

Pela análise da figura 33 observa-se que quando aplicado com um único grupo gerador o método escalonado passa a ser atrativo economicamente ($VPL > 0$) para uma tarifa de 200 [R\$/MWh]. Para $N = 2$, a tarifa de viabilidade está próxima a 240 [R\$/MWh]. Para $N = 3$ este valor é mais elevado e próximo a 300 [R\$/MWh]. Pela inclinação das retas da figura 33, observa-se ainda que haverá uma tarifa a partir da qual a atratividade do uso de $N = 2$ módulos de geração será superior (A partir de $T = 350$ [R\$/MWh], tarifa muito alta para a realidade da geração energética utilizando RSU no Brasil no mercado regulado, sendo contudo obtida no mercado livre) a geração com um único gerador. Desta forma recomenda-se a utilização do método escalonado com um único grupo gerador para se procurar viabilizar o aproveitamento energético em aterros sanitários no Brasil. A partir de 400 [R\$/MWh] o uso de 3 geradores passa a ser mais atrativo economicamente do que o uso de apenas 1, fato que demonstra o impacto da tarifa na quantidade de energia a ser produzida no aterro, dado que o uso de 3 geradores permite a produção de em média 3,5 [GWh] a mais por ano através da combustão do biogás no aterro.

Já a análise de sensibilidade com relação à taxa de desconto i (Figuras 34 e 35), demonstrou que para taxas inferiores a 6%, o VPL obtido pelo uso de dois geradores é superior ao de um gerador. Assim sendo, observa que em cenários incentivados pelo governo, o aumento do número de geradores, e, portanto, da energia produzida no aterro e dos benefícios vindouros desta, se torna interessante economicamente.

A aplicação do método escalonado com três grupos geradores foi inviável em todos os cenários em que a taxa de desconto era superior a 6,2 [%]. Para $N = 2$, a inviabilidade começa a ser verificada a partir de $i = 9\%$. Já para $N = 1$, só será verificada a inviabilidade econômica em cenários econômicos muito pessimistas, com valores de taxa superiores a 14%. O custo de energia nivelado (LCOE) também foi crescente com o aumento da tarifa podendo chegar a valores superiores 100 [US\$/MWh] para $N = 3$. Observa-se ainda que o aumento do custo de energia se torna mais intenso conforme se aumenta a taxa de desconto, demonstrando que taxas de interesse menores implicam em

custos de energia mais próximos e maior facilidade de implantação de um maior número de geradores para aproveitamento do biogás.

Os aumentos dos valores da tonelada de carbono (Figura 36) implicaram em aumento significativo do VPL, sendo a relação entre VPL e V_c linear. O aumento das receitas devido crédito de carbono permitiram a viabilização do empreendimento com até três geradores, o que demonstra que os créditos de carbono caracterizam um mecanismo importante para cenários econômicos como o Brasileiro, pois permitem a obtenção de receitas alternativas que valorizam empreendimentos de aproveitamento energético dos resíduos sólidos mesmo em situações em que cenário econômico nacional (taxa e tarifa) não está incentivado e não é favorável.

As curvas de sensibilidade (Figura 33-36) apresentaram sempre uma distância maior entre as curvas de $N = 2$ e $N = 3$ do que entre as curvas de $N = 1$ e $N = 2$, pois o aumento do número de geradores de 2 para 3 implica em um elevado aumento de custo. A elevação do número de unidades geradores para $N > 3$ portanto não é indicada.

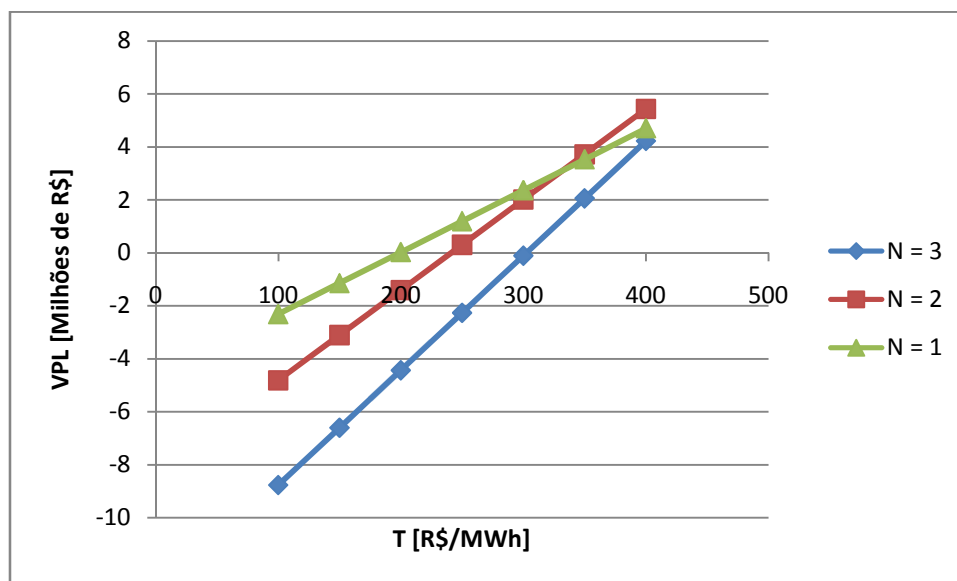


Figura 33: análise de sensibilidade do método escalonado com relação à tarifa de venda de energia.

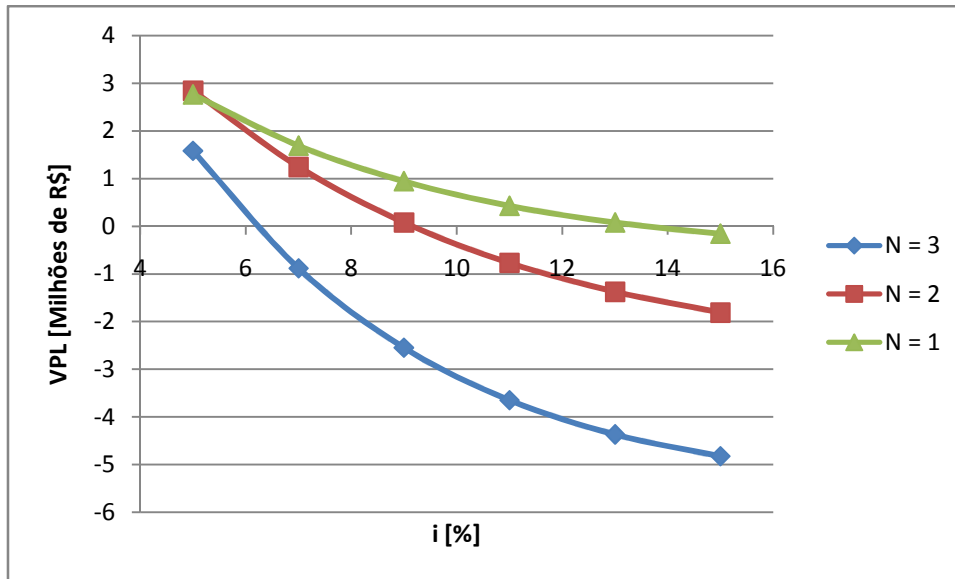


Figura 34: Análise de sensibilidade do VPL do método escalonado com relação à taxa de desconto.

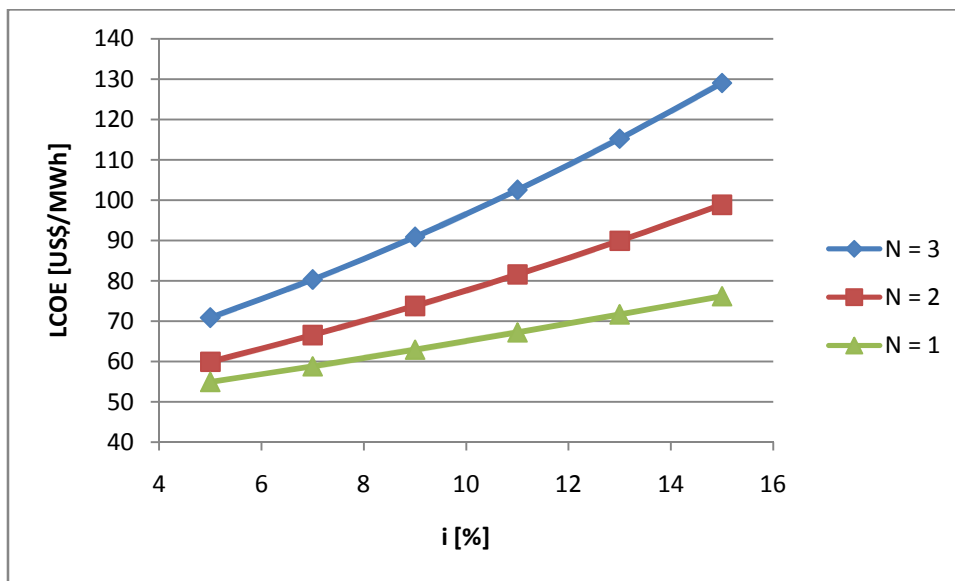


Figura 35: Análise de sensibilidade do LCOE do método escalonado com relação à taxa de desconto.

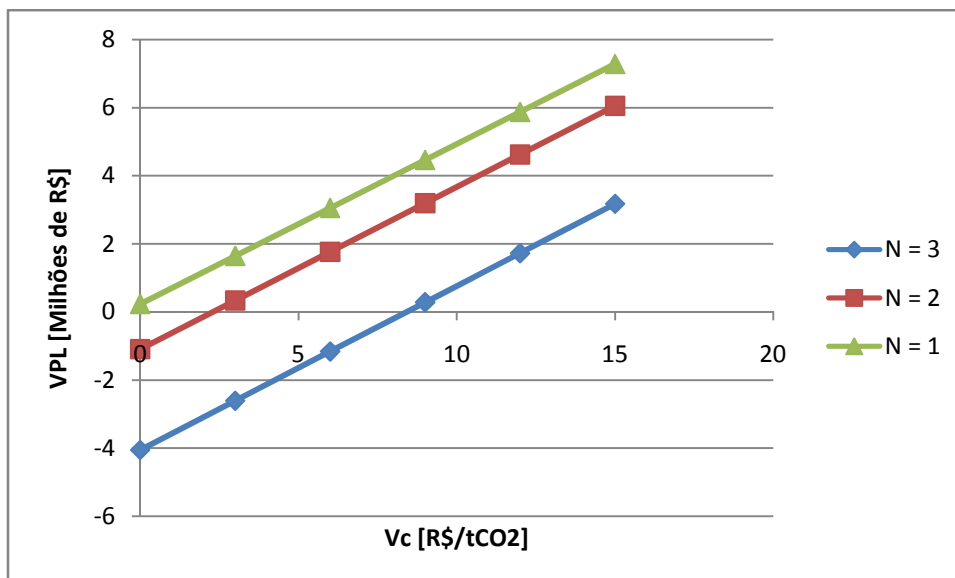


Figura 36: Análise de sensibilidade do VPL do método escalonado com relação ao valor da tonelada de carbono.

Foram realizadas ainda análises de sensibilidade do método de Silva (2012) (original e modificado) com relação à tarifa de venda de energia (Figura 37). O aumento da tarifa nestes métodos provocou elevações do VPL superiores ao do método escalonado, dado que os módulos geradores deste operam a carga variável e, com o aumento da tarifa, se torna cada vez mais interessante o aproveitamento de mais biogás mesmo que em quantidades menores a capacidade do motor. Ambos os métodos começam a se tornar viáveis para tarifas próximas a 200 [R\$/MWh], sendo o método modificado melhor economicamente para tarifas menores que esta, e o método original para tarifas maiores que esta. Conforme já discorrido anteriormente, o presente trabalho não analisou a perda de rendimento dos motores quando estes operam a plena carga e, portanto, o crescimento do VPL em função da tarifa não deverá ser tão intenso como o apresentado na figura 29.

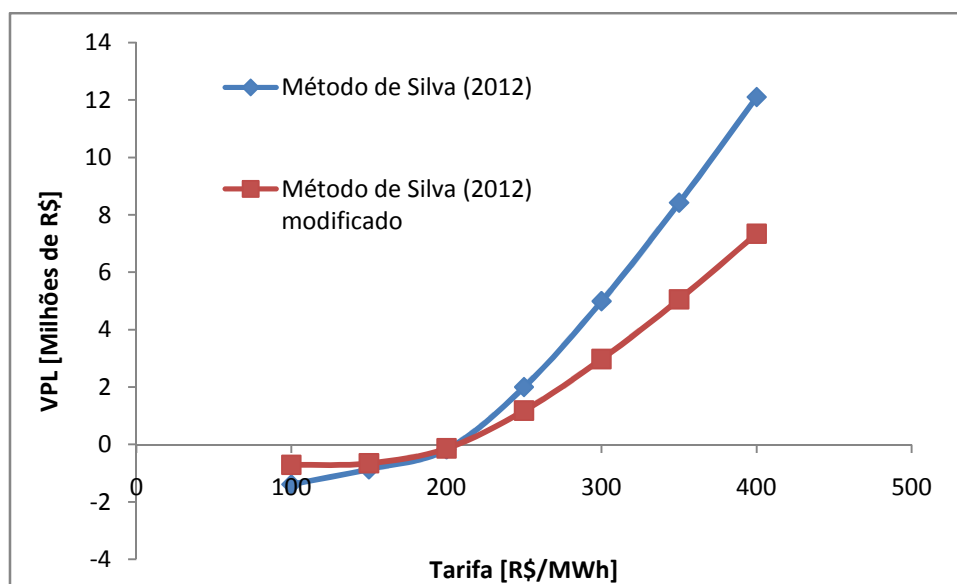


Figura 37: Análise de sensibilidade do VPL do método de Silva (2012) (Original e modificado) com relação ao valor da tarifa de venda de energia.

5. Conclusões

O número de aterros cresceu grandemente nos últimos anos, e ainda é crescente, no Brasil. Nos aterros com deposição de matéria orgânica, há a produção de biogás, gás combustível que pode ser utilizado para geração elétrica. Contudo um dos maiores entraves ao uso energético do gás de aterro é a viabilidade econômica.

Em busca da definição e caracterização detalhada de um critério para motorização do planejamento do aproveitamento energético em aterros, que permita maximizar os benefícios deste tipo de aproveitamento (Energéticos e econômicos), o presente trabalho propõe um novo método para determinação da potência teórica e número de geradores em uma usina termelétrica orientada ao aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário: o método escalonado.

Como o próprio nome sugere, o método escalonado se baseia na implantação de unidades geradoras funcionando a plena carga ao longo dos anos de produção de gás, o que implica em uma capacidade instalada variável. A potência da primeira unidade geradora é escolhida como sendo aquela que, quando combinada com o tempo em que este gerador poderá ser completamente abastecido pelo gás produzido no aterro, resultar na maior produção energética. Os demais módulos geradores também são selecionados de modo orientado a se obter o máximo incremento energético.

O método escalonado foi definido, aplicado e comparado com uma metodologia anterior apresentada por Silva (2012) e com a metodologia de Silva (2012) modificada. As principais conclusões obtidas estão listadas a seguir. Vale ressaltar que em todos os casos considerou-se que os 20 anos do aproveitamento ocorreriam durante a fase metanogênica estável, isto é, na qual o teor de metano no gás formado é constante (Vide figura 9).

- Conforme se aumentam o número de geradores no método escalonado, diminui-se o incremento energético promovido pela inclusão dos novos geradores. Com a diminuição do incremento energético, haverá um ponto em que o acréscimo de receita devido à maior energia produzida será menor que o acréscimo de custos.

- No aterro sanitário analisado no presente trabalho, a maior rentabilidade econômica foi assegurada no cenário em que se utilizou $N = 1$ gerador, no cenário original. O cenário de $N = 3$ geradores foi o melhor no quesito energético.
- As análises de sensibilidade demonstraram que aumentos na tarifa de venda de energia favorecem o aumento dos métodos em que serão produzidas mais energia. Sendo assim, o uso de dois geradores passa a se tornar mais interessante economicamente do que somente um gerador para tarifas próximas a 350 [R\$/MWh], valor extremamente alto para o mercado regulado, mas plausível para o mercado livre de energia. O mesmo ocorre com a taxa de juros, pois o uso de $N = 2$ apresenta maior viabilidade que $N = 1$ para tarifas próximas a 5,5%, característica de cenários em que há incentivos governamentais. O ganho energético no aterro pela ampliação de $N = 1$ para $N = 2$ é em média de 1 [GWh/ano] ao longo dos 20 anos em que foram consideradas as análises econômicas.
- As análises de sensibilidade demonstraram ainda que o aumento da tarifa provoca um aumento não linear do VPL nos métodos de Silva (2012) e Silva (2012) modificado. Contudo neste trabalho não considera a perda de rendimento, característica de motores a gás que operam a plena e carga, e, portanto, o crescimento do VPL deste método será menor que o previsto no presente trabalho. A inclusão da variação de rendimentos permanece como sugestão para trabalhos futuros.
- Os custos de energia nivelada LCOE de todos os casos variaram entre 50 e 130 [US\$/MWh] aumentando em função dos aumentos da taxa de desconto e do número de geradores. Pela análise da figura 31 observa-se que para uma taxa de desconto $i = 10\%$ o LCOE da aplicação de um único gerador pelo método escalonado com $N = 1$ esteve próximo a 65 [US\$/MWh], valor próximo aquele obtido nos Estados Unidos para empreendimentos de biogás com $i = 10\%$ e $P = 30$ [MW], a saber, 63 [US\$/MWh] (IEA, 2010).

- A inclusão do cenário em que foi considerado o tratamento do biogás aumentou os custos de energia LCOE em até 12 [US\$/MWh], resultando em todos os casos em uma redução da viabilidade econômica do método escalonado.
- O cenário com um grupo gerador permitiu, de modo viável, o aproveitamento de em média 54 kWh/tonelada de resíduo (Valor que pode ser utilizado como estimativa inicial para cálculos em que se deseje considerar um cenário economicamente atrativo).
- Devido ao menor custo de energia do método escalonado para $N = 1$ e a maior confiabilidade dos resultados (Dado que nos métodos que consideram cargas parciais há variações do rendimento do motor) recomenda-se a aplicação deste método no mercado de energia regulado (Para tarifas próximas a 200 [R\$/MWh], ou menores). Aumentos da tarifa certamente colaborarão com uma maior ampliação da viabilidade econômica dos outros métodos e da ampliação de mais geradores, sendo necessária a comparação entre todos eles a fim de se definir o método mais vantajoso antes do planejamento do aproveitamento.
- O método escalonado aqui definido se mostrou um método de planejamento de aproveitamento energético em aterros sanitários de aplicação acessível e de possível viabilização econômica, o que torna satisfatório os resultados obtidos no presente trabalho.

6. Sugestões para trabalhos futuros

Para trabalhos futuros permanecem as seguintes sugestões:

- 1) Avaliação dos métodos apresentados no presente trabalho em aterros de diferentes populações contribuintes de resíduos, a fim de que se verifique o impacto da quantidade de resíduos sobre a viabilidade econômica de cada método.
- 2) Realização do levantamento de custos e análises econômicas similares aos estudos realizados no presente trabalho, considerando, contudo ao invés de aterros, um sistema de digestão anaeróbia da matéria orgânica em reatores fechados.
- 3) Avaliação da possibilidade de extração do gás que fica retido nos poros do aterro, e suas relações com os modelos de estimativa de primeira ordem.
- 4) Avaliação dos efeitos da variação temporal da concentração de metano no biogás sobre o aproveitamento energético do mesmo.
- 5) Análise do método de Silva (2012) (Original e modificado) considerando-se as perdas de rendimento típicas de motores a gás que operem a plena carga, conforme preconizado por (CEPEL, 2001 *apud* Mello Jr e Fagá, 2005)

7. Referências

ABRELPE. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos No Brasil. 2013.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004:2004 Resíduos sólidos– Classificação. Rio de Janeiro, 77 p, 2004.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8849:1985. Apresentação de Projetos de Aterros Controlados de Resíduos Sólidos Urbanos, 9 p., 1985.

AEBIOM. European Biomass Association. A Biogas Road Map For Europe, 2009.

Disponível em <
http://www.aebiom.org/IMG/pdf/Brochure_BiogasRoadmap_WEB.pdf>. Acesso:
 06/02/2015.

ALMEIDA, L.M.S. et al. Unidades de Triagem e Compostagem de Resíduos Sólidos Urbanos. Apostila para a gestão municipal de resíduos sólidos urbanos. Ministério Público do estado do Paraná, 2012. Disponível em <
http://www.mpggo.mp.br/portal/arquivos/2013/06/27/15_32_13_932_apostila_rsu_mppr.pdf>. Acesso: 30/01/2015.

AMINI, H. R. et al. Determination of first-order landfill gas modeling parameters and uncertainties. Waste Management, V.32, p. 306-315, 2012.

ANDRADE, R. Mensagem pessoal recebida pelo aluno Ivan Felipe Silva dos Santos durante a arguição da defesa da dissertação. 08/06/2015, Universidade Federal de Itajubá (MG).

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Boletim de informações gerenciais, 2014a. Disponível em <
http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/IG_Mar_14.pdf>. Acesso: 04/02/2015.

ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Comunicado sobre o leilão de Energia A-5, 2014b. Disponível em <

http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8185&id_area=90>. Acesso: 04/02/2015.

ANNEPU R, K. Sustainable Solid Waste Management in India. New York: Columbia University in the city of New York, Department of Earth and Environmental Engineering; 2012.

ARENA U. AND MASTELLONE M.L. Fluidized bed gasification of RDF and PDF. AMRA Scientific Report. ISBN 978-88-89972-10-6 (in Italian, with an executive summary in English), 2009.

ARENA, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. Waste Management. V. 32, p. 625 – 639, 2012.

BARROS, R.M. Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2012. 374p.

BARROS, R.M. e TIAGO FILHO, G. L. Small hydropower and carbon credits revenue for an SHP project in national isolated and interconnected systems in Brazil. Renewable Energy, V.48, p. 27-34, 2012.

BARROS, R. M. et al. The electric energy potential of landfill biogas in Brazil. Energy Policy. V. 65, p. 150-164, 2014.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. Calculadora do Cidadão, 2013. Disponível em: <<https://www3.bcb.gov.br/CALCIDADAOPUBLICO/exibirFormCorrecaoValores.do?method=exibirFormCorrecaoValores&aba=1>>. Acesso em: 15/09/2014.

BANCO MUNDIAL. Decision maker's guide to Solid Waste Incineration, 1999. <<http://web.mit.edu/urbanupgrading/urbanenvironment/resources/references/pdfs/DecisionMakers.pdf>>. Acesso: 29/01/2015.

BANCO MUNDIAL. Handbook for the Preparation of Landfill Gas to Energy Projects in Latin America and the Caribbean. Conestoga-Rovers & Associates, 2004. Disponível em <http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2005/08/09/000160016_20050809131543/Rendered/PDF/332640handbook.pdf>. Acesso: 06/02/2015.

BIBLIOTECA VIRTUAL DO AMAZONAS. Meio Ambiente – Aterros Sanitários. Disponível em http://www.bv.am.gov.br/portal/conteudo/meio_ambiente/aterro_sanitario.php. Acesso: 29/01/2015.

BIDONE, F., R., A. E POVINELLI, J. Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos. São Carlos: EESC/USP, 1999, 120 p.

BIOGÁS ATERROS. Software Cálculo de Geração de Biogás e Opções de Uso Energético, 2006. Desenvolvido pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental de São Sauplo (CETESB, Brasil). Disponível para download gratuito em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Softwares/16-Softwares>>. Acesso em 07/02/2014.

BOVE, R. e LUNGHI, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. Energy Conversion and Management, V. 47, o. 1391-1401, 2006.

BOVESPA. Bolsa de Valores de São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.bmfbovespa.com.br/pt-br/mercados/mercado-de-carbono/leiloes-de-credito-de-carbono-login.aspx?idioma=pt-br>>. Acesso em: 09 de Setembro de 2013.

BRANKER, K. et al. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 15, p. 4470 – 4482, 2011.

BRESCIANI, E. Disposição final de resíduos urbanos: O caso do aterro sanitário do município de Chapecó, SC. Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Monografia para obtenção de título de Engenharia Civil, p. 62, 2006.

CAPEHART, L. WBDG. Whole Building Design Guide. Microturbines, 2010. U.S.A. National Institute of Building Sciences. Disponível em: <<http://www.wbdg.org/resources/microturbines.php>>. Acesso: 06/02/2014.

CARVALHO, A.M. et al. Microturbinas a Gás, Motores Stirling e Células a Combustível para Geração Distribuída. Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – Citenel, 2007. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it96.pdf>>. Acesso: 15/09/2014.

CASTILHOS JR. A. A. et al. (coordenador). Resíduos Sólidos Urbanos: Aterros Sustentáveis para municípios de Pequeno Porte. Projeto PROSAB, ABES – RJ, 2003.

CERPCH. Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas. Fontes renováveis – Biogás. Disponível em <<http://www.cerpch.unifei.edu.br/biodigestor.php>>. Acesso: 06/02/2014.

CEPEL. Estudo comparativo de microssistemas de geração baseados em combustíveis. Relatório técnico, DPP/PER- 1165/01. Rio de Janeiro, Brasil. 2001.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Biogás - Aterros, versão 1.0 / CETESB, Ministério Brasileiro de Ciência e Tecnologia – Software e Manual. São Paulo, 2006. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Softwares/16-Softwares>>. Acesso: 06/02/2014.

CETESB. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. Aterro Sanitário – Definições. Disponível em <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancasclimaticas/biogas/Aterro%20Sanit%C3%A1rio/21-Aterro%20Sanit%C3%A1rio>>. Acesso: 29/01/2015.

CHEN, Z. et al. Overviews of LFG projects in China. Waste Management, V. 30, p. 1006 – 1010, 2010.

CHERNICARO, C.A. L. Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias – Reatores Anaeróbios, Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2005.

CIMASAS. Consórcio Intermunicipal dos Municípios do Alto do Sapucaí Para Aterro Sanitário, 2014. Disponível em <<http://abes->

dn.org.br/eventos/seminario_residuos_solidos/Paineis_SNRS/Painel7/72.pdf>. Acesso: 06/05/2015.

COELHO, T., S. et al. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto. Encontro de Energia no Meio Rural - Agrener, 2006.

COSTA, D. F. Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. 2006. 194f. Dissertação (Mestrado em Energia), PIPGE/USP, São Paulo, 2006

CPHEEO. Manual on municipal solid waste. Ministry of Urban Development, Central Public Health and Environmental Engineering Organization, New Delhi; 2000.

COOPER, M. et al. Compostagem e Reaproveitamento de Resíduos Orgânicos Agroindustriais: Teórico e Prático. Série Produtor Rural, Ed. USP/ESALQ, 2010.

DE BAERE, L. e MATTHEEUWS, B. Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Europe – Status, Experience and Prospects, 2013. OWS – Organic Wastes Systems Company. Disponível em <<http://www.ows.be/wp-content/uploads/2013/02/Anaerobic-digestion-of-theorganic-fraction-of-MSW-in-Europe.pdf>>. Acesso: 22/02/2015.

DESOTEC. Activated Carbon. Remoción de siloxanos del biogás. Disponível em <<http://www.desotec.com/es/carbonology-es/aplicaciones-de-carbon-activo/remocion-de-siloxanos-del-biogas/4561/>>. Acesso: 07/05/2015.

DOMINGO, J. L. e NADAL, M. Domestic waste composting facilities: A review of human health risks. Environment International, V. 35, p. 382-389, 2009.

DONG, J. et al. Comparison of municipal solid waste treatment technologies from a life cycle perspective in China. Waste Management & Research. Vol. 32, p. 13 – 23, 2014.

EBC. EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO, 2014. Disponível em <<http://agenciabrasil.etc.com.br/geral/noticia/2014-10/aneel-faz-leilao-para-contratacao-de-energia-de-reserva>>. Acesso dia 22/01/2015.

EBC. EMPRESA BRASIL DE COMUNICAÇÃO. Disponível em <<http://memoria.ebc.com.br/agenciabrasil/noticia/2013-08-29/populacao-brasileira-crece-09-entre-2012-e-2013>>. Acesso dia 22/01/2015.

ECX (European Climate Exchange). ECX Historical Data Certified Emissions Reduction Futures Contracts ECX Historical Data; 2013.

ESPINOZA, P.T. et al. Publicação conjunta entre a Organização Pan-Americana de Saúde (OPAS), Associação Inter-Americana de Engenharia Sanitária e Ambiental (AIDIS) e Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID). Relatório da Avaliação Regional da Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos na América Latina e Caribe. 2010. Disponível em <<http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=36467035>>. Acesso dia 22/01/2015.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente (Minas Gerais). Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica. 2º Edição, Belo Horizonte, 2010. Disponível em <<http://www.feam.br/images/stories/fean/relatorio%201%20%20estado%20da%20arte%20do%20tratamento%20termico.pdf>>. Acesso: 29/01/2015.

FDR. Fundação Demócrito Rocha. Compostagem e Minhocultura, 2013. Disponível em <<http://fdr.com.br/formacao/2013/compostagem-e-minhocultura/fatores-que-influenciam-na-compostagem/>>. Acesso: 30/01/2015.

FGM. Federação Goiana de Municípios – Notícias, 2014. Disponível em <<http://fgm-go.org.br/noticias/lixoes-a-ceu-aberto-resistem-apesar-do-fim-do-prazo-para-substitui-los-por-aterros-sanitarios/>>. Acesso: 29/01/2015.

FREIRE, A.F.A. et al. Manual para implantação de compostagem e de coleta seletiva no âmbito de consórcios públicos. Ministério do Meio Ambiente (MMA). Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, Brasília (DF), 2010.

FUNES, G. A. et al. Estudo de viabilidade da utilização do biogás em resfriadores de líquido operando por absorção (parte 1). Revista Abrava, Ed. 294, 2011.

GARCILASSO, V., P. e VESCOVO, E. Geração de energia elétrica a partir de biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando microturbina a gás. Apresentação realizada no 4º Congresso de Cogeração de Energia, São Paulo (SP), 2012. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/apresentacoes/4ocongressocogeracao_workshop.pdf>. Acesso em: 15/09/2014.

GOLDEMBERG, J. Biogás: Projetos e Pesquisas no Brasil. CETESB / Secretaria do Meio Ambiente; Organização: Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer; Responsável Técnico: João Wagner Silva Alves; São Paulo, 2006, 184 p.

GÓMEZ, A. et al. Potential and cost of electricity generation from human and animal waste in Spain. Renewable Energy, V. 35, p. 498 – 505, 2010.

GRIMA-OLMEDO, C. et al. Energetic performance of landfill and digester biogas in a domestic cooker. Applied Energy, V. 134, p. 301-308, 2014.

HOORNWEG, D. e BHADA-TATA, P. What a Waste: A Global Review of Solid Waste Management. World Bank – Urban Development Series, 2012.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Infográficos. Disponível em <<http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?codmun=355030>>. Acesso: 16/02/2015.

ICLEI. Governos Locais pela Sustentabilidade. Manual para aproveitamento de biogás. Volume 1 – Aterros Sanitários. 2009. Disponível em <http://www.resol.com.br/cartilha12/manual_iclei_brazil.pdf>. Acesso: 12/06/2015.

IEA. International Energy Agency. Projected Costs of Generating Electricity, 2010. Disponível em <<http://www.worldenergyoutlook.org/media/weowebiste/energymodel/ProjectedCostsofGeneratingElectricity2010.pdf>>. Acesso: 06/05/2015.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual. Capítulo 6: Wastes, 1996. Disponível

em <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch6ref1.pdf>>. Acesso: 06/02/2015.

IPEA. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Governo Federal, Brasília, 2012a.

IPEA, INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. 2012b. Disponível em <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=13929&Itemid=75>. Acesso: 13/09/2014.

IPEA. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Diagnóstico dos Resíduos Orgânicos do Setor Agrossilvopastoril e Agroindústrias Associadas. 2012c.

ISHII, J. e FURUICHI, T. Estimation of methane emission rate changes using age-defined waste in a landfill site. *Waste Management*. V.33, p. 1861-1869, 2013.

ITAJUBÁ NOTÍCIAS, 2013. Nota “Encontro em Itajubá define ampliação de Consórcio de Resíduos que é referência no país”. Disponível em <<http://www.itajubanoticias.com.br/politica/encontro-em-itajuba-define-ampliacao-de-consorcio-de-residuos-que-e-referencia-no-pais.html>>. Acesso: 06/05/2015.

JOHARI, A. et al. Economic and environmental benefits of landfill gas from municipal solid waste in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V.16, p. 2907-2912, 2012.

MACIEL, F.M e JUCÁ, J. F. T. Evaluation of landfill gas production and emissions in a MSW large-scale Experimental Cell in Brazil. *Waste Management*. V.31, p. 966-977, 2011.

KALYANY, K.A e PANDEY, K.K. Waste to energy status in India: A short review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V. 31, p. 113-120, 2014.

LAMERS, F. et al. Alternative Waste Conversion Technologies. ISWA White Paper on Energy Recovery, 2013. Disponível em <

https://www.iswa.org/index.php?eID=tx_iswaknowledgebase_download&documentUId=3155>. Acesso: 29/01/2015.

LEITE, W. C. de A. Estudo do Comportamento da Temperatura, ph e Teor de Umidade na Decomposição de Resíduos Sólidos Urbanos em Aterros Sanitários. 1991, p. 167. Dissertação Mestrado. São Carlos, 1991.

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, 2014.

LOU, X. F. e NAIR, J. The impact of landfilling and composting on greenhouse gas emissions – A review. Bioresource Technology, V. 10, 3792-3798, 2009.

MAZO-NIX, S. Conceitos Básicos sobre Biogás de Aterro e as Tecnologias para o seu Aproveitamento Energético. Global Methane Initiative. Apresentação disponível em <http://www.abrelpe.org.br/atlas/sandra_mazo_nix.pdf>. Acesso: 05/02/2014.

MELLO JR. A. C. e FAGÁ, M. T. W. Substituição de motores elétricos por motores de combustão interna de ciclo Otto a gás natural em instalações de bombeamento de petróleo e seus derivados. 3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás, 2005.

MMA. Ministério Brasileiro do Meio Ambiente, 2014a. Disponível em:<<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/politica-nacional-de-residuos-solidos/aproveitamento-energetico-do-biogas-de-aterro-sanitario>>. Acesso: 29/01/2014.

MMA. Ministério Brasileiro do Meio Ambiente, 2014b. Disponível em <<http://www.mma.gov.br/informma/item/10272-pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADuos-s%C3%B3lidos-apresenta-resultados-em-4-anos>>. Acesso: 04/02/2015.

MONTEIRO, J. H. P. et al. Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos. Coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MOURA, J. A. et al. Avaliação da produção de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos (RSU) e lodo de esgoto em uma simulação experimental de aterro sanitário. Dissertação (Mestrado). Engenharia de Energia – Universidade Federal de Itajubá (MG), 94 p., 2014.

NISKANEN, A. et al. Enhancing Landfill Gas Recovery. *Journal of Cleaner Production*. V. 55, p. 67 – 71, 2013.

OONK, H., et al. Validation of landfill gas formation models. TNO Institute of Environmental and Energy Technology Report, Grontmij, 1994.

NUVOLARI, A. Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola. Capítulo 9. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

PAIVA, L. S. R. Análise da conversão energética do resíduo sólido urbano: Uma abordagem técnica e econômica. Texto para qualificação em Engenharia de Energia. Universidade Federal de Itajubá, 2014.

PAOLUCCI, M., et al. Pyrolysis and Gasification of Municipal and Industrial Wastes Blends. *Thermal Science*. Vol. 14, No. 3, pp. 739-746, 2010.

PECORA, V. Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto residencial da USP – Um estudo de caso. Dissertação (Mestrado). Programa de Internidades, Universidade de São Paulo (USP), 153 p., 2006.

PENTEADO, R. et al. Application of the IPCC model to a Brazilian landfill: First results. *Energy Policy*, V. 42, p. 551-556, 2012.

PESCADOR, F., S. Tratamento de Esgoto Doméstico em Reatores Sequenciais em Batelada Anaeróbios (RSBAn). Dissertação (Mestrado). Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 155 p., 2001.

PLANO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Governo Federal. Ministério do Meio Ambiente, Set 2011. Disponível em <

http://www.mma.gov.br/estruturas/253/_publicacao/253_publicacao02022012041757.pdf>. Acesso: 27/01/2015.

PNRS. POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS. Lei Nº 12305 de 2 de agosto. 2010. Disponível em < http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso: 12/06/2015.

PORTAL CLIMATE-DATA.ORG. Dados da cidade de Itajubá (MG). Disponível em <<http://pt.climate-data.org/location/24906/>>. Acesso: 16/05/2015.

PUROHIT P, e KANDPAL T.C. Renewable energy technologies for irrigation water pumping in India: projected levels of dissemination, energy delivery and investment requirements using available diffusion models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, p.592-607, V.9, 2005.

QASIN, S., R. Wastewater Treatment Plants – Planning design and operation. 2.a ed. Lancaster, Pennsylvania, USA Technomic Publishing Company, 1999, 1107 p.

SALOMON, K., R. LORA, E. E. S Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass and Bioenergy*, v. 33, p. 1101-1107, 2009.

SANTOS, N., S. Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de tratamento de esgotos de madre de Deus- Bahia. Dissertação (Mestrado) profissional em tecnologias aplicáveis a bioenergia – Faculdade de Tecnologia e Ciências – Salvador (BA), 61p, 2009b.

SANTOS, R. F. et al. Brazil's potential for generating electricity from biogas from stillage. *World Renewable Energy Congress*. Sweden, 2011.

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. Submetido a *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, Fev. 2015a.

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, 2015b.

SCS Engineers. Comparative analysis of landfill gas utilization technologies. File No. 0293066, SCS Engineers, Washington, DC, 1997.

SHA'ATO, R. et al. Survey of solid waste generation and composition in a rapidly growing urban area in Central Nigeria. Waste Management, V. 27, p. 352 – 358, 2007.

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. Dissertação (MESTRADO). Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá (MG), 164 p., 2012.

SILVA, A.T.T.S. e COSTA, H. Estudo Preliminar sobre Resíduos Sólidos na Cidade de Itajubá (MG): Caracterização física no período de inverno. 23º CBESA – Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2003.

SILVA, T. N. et al. Avaliação das emissões superficiais do gás de aterros sanitários de grande porte. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. V. 18, Nº 2, 2013.

SNIS. Sistema Nacional de informações sobre Saneamento, Diagnóstico do Manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos, 2013. Disponível em <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=106>>. Acesso: 06/05/2015.

SUZUKY, A., B., P. Uso de biogás em motores de combustão interna. Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias, Guarapuava-PR, v.4, n.1, p.221–237, 2011.

TABASARAN, O. (1981), “Gas production from landfill”. In Household Waste Management in Europe, Economics and Techniques, A.V. Bridgewater and Lidgren K. (eds.), Van Nostrand Reinhold Co., New York, USA, pp. 159-175.

TAN, S. et al. Economical and environmental impact of waste to-energy (WTE) alternatives for waste incineration, landfill and anaerobic digestion. Energy Procedia. V. 61, p. 704 – 708, 2014.

TCHOBANOGLIOUS, G. et al. Integrated solid waste management: engineering principles and management issues. Ed. McGraw- Hill, Universidade de Michigan, 1993.

THEMELIS, N. J. e ULLOA, P. A. Methane Generation in Landfills. Renewable Energy, V. 32, p. 1243 – 1257, 2007.

TIAGO FILHO, G. L. Mensagem Pessoal enviada de < gltiagofilho@gmail.com > para < ivanfelipece@hotmail.com > em 20/02/2015.

TRIGUEIRO, A. O lixo que vira energia. Blog: Mundo Sustentável – Portal de notícias G1. Disponível em < <http://g1.globo.com/platb/mundo-sustentavel/2013/03/01/o-lixo-que-vira-energia/> >. Acesso: 18/04/2015.

UNESP. Curso online de Geologia Ambiental. Formas de disposição e resíduos. 2015. Disponível em < <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/residuos/res12.html> >. Acesso: 28/01/2015.

USEPA. United States Environmental Protection Agency (Agência Americana de Proteção Ambiental). Guidance for evaluating landfill gas emission from close dor abandoned facilities, 2005a. Disponível em < <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/P1000BRN.PDF?Dockey=P1000BRN.PDF> >. Acesso: 04/02/2015.

USEPA - **United States Environmental Protection Agency**. Landfill Gas Emissions Model. (LandGEM). Version 3.02 User's Guide. USEPA, May 2005b. EPA-600/R-05/047.

USEPA, 2007. Opportunities for and Benefits of Combined Heat and Power at Wastewater Treatment Facilities. Disponível em: < www.epa.gov/CHP/markets/wastewater.html > Acesso em outubro de 2008.

USEPA. United States Environmental Protection Agency (Agência Americana de Proteção Ambiental). Background Information Document for Updating AP42 Section 2.4 for Estimating Emissions from Municipal Solid Waste Landfills, 2008. Disponível em <<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch02/draft/db02s04.pdf>>. Acesso: 05/02/2015.

USEPA. United States Environmental Protection Agency (Agência Americana de Proteção Ambiental). Landfill Project Development Handbook, 2010. Disponível em <<http://www.epa.gov/lmop/publications-tools/handbook.html>>. Acesso: 06/02/2015.

USEPA. United States Environmental Protection Agency (Agência Americana de Proteção Ambiental). Non-Hazardous Waste Management Hierarchy, 2013. Disponível em <<http://www.epa.gov/waste/nonhaz/municipal/hierarchy.htm>>. Acesso: 27/01/2015.

VERMA, S. Anaerobic Digestion of Biodegradable Organics in Municipal Solid Wastes. Dissertação (Mestrado). Universidade de Columbia (E.U.A). 56 pg., 2002. Disponível em < <http://www.seas.columbia.edu/earth/vermathesis.pdf>>. Acesso: 22/02/2015.

WANGYAO, K. et al. Methane Generation Rate Constant in Tropical Landfill. Journal of Sustainable Energy & Environment. V.1, p. 181-184, 2011.

WANICHPONGPAN, W. e GHEEWALA, S. H. Life cycle assessment as a decision support tool for landfill gas-to energy projects. Journal of Cleaner Production, V. 15, p. 1819 – 1826, 2007.

WATERMOLEN, B. T. et al. Methane Emission, Oxidation and Collection Efficiency at a Southeastern USA Landfill. Global Waste Management Symposium. Veolia Environmental Services. North America Solid Waste, 2012. Disponível em < <http://dnr.wi.gov/topic/Waste/documents/swip/20121115/MethaneEmissionsUpdate.pdf> >. Acesso: 05/02/2015.

YANG, L. et al. Progress and perspectives in converting biogas to transportation fuels. Renewable and Sustainable Energy Reviews. V. 40, p. 1133-1152, 2014.

ZANETTE, A. L. Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil. Dissertação (Mestrado). Programa de Planejamento Energético, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.