

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE MODELOS MATEMÁTICOS
PARA A ESTIMATIVA DA GERAÇÃO DE GASES EM BIOPROCESSOS DE
DECOMPOSIÇÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ATERROS SANITÁRIOS**

Marcelo Orsatti Landi

Prof. Dr. Samuel Conceição de Oliveira

Rio Claro (SP)

2013

MARCELO ORSATTI LANDI

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE MODELOS
MATEMÁTICOS PARA A ESTIMATIVA DA GERAÇÃO
DE GASES EM BIOPROCESSOS DE DECOMPOSIÇÃO
ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ATERROS
SANITÁRIOS**

*Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto
de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio
Claro (SP), da Universidade Estadual Paulista
Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de
Engenheiro Ambiental.*

Orientador: Prof. Dr. Samuel Conceição de Oliveira

Rio Claro (SP)
2013

MARCELO ORSATTI LANDI

**ANÁLISE E SIMULAÇÃO DE MODELOS
MATEMÁTICOS PARA A ESTIMATIVA DA GERAÇÃO
DE GASES EM BIOPROCESSOS DE DECOMPOSIÇÃO
ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS EM ATERROS
SANITÁRIOS**

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro (SP), da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheiro Ambiental.

Comissão Examinadora:
Prof. Dr. Samuel Conceição de Oliveira (Orientador)
Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro
Prof. Dr. Rodrigo Braga Moruzzi

Rio Claro, 06 de dezembro de 2013.

assinatura do aluno

assinatura do orientador

604.6 Landi, Marcelo Orsatti
L257a Análise e simulação de modelos matemáticos para a
estimativa da geração de gases em bioprocessos de
decomposição anaeróbica de resíduos sólidos em aterros
sanitários / Marcelo Orsatti Landi. - Rio Claro, 2013
73 f. : il., gráfs.

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado -
Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Samuel Conceição de Oliveira

1. Resíduos. 2. Biogás. 3. Geração de energia. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho as pessoas mais importantes da minha vida. Minha família, que é e sempre será o meu bem mais precioso. Dedico a Dona Deusa, minha mãe, querida e amada que sempre batalhou para que seus filhos tivessem do bom e do melhor. Dedico ao Sr. Ricieri, meu pai, que não está mais entre nós, mas sei que em todo momento nos protege e nos guarda de todo o mal. Aos meus irmãos, amigos e companheiros, Bruno e Raquel, que mesmo com todas as brigas e discussões normais de irmãos, sempre estivemos ali, um para o outro, apoiando e ajudando em todos os momentos de nossas vidas.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar agradecendo, antes de tudo, à entidade que rege tudo na nossa vida, podendo ser chamada de muitos nomes, em muitas religiões diferentes, mas que está sempre presente em todas as situações que vivenciamos.

Gostaria de agradecer...

À minha família, que esteve sempre ao meu lado em momentos de turbulência e bonança, guiando-me em momentos difíceis e compartilhando todos os momentos de alegria.

Ao meu pai (in memoriam), que mesmo tendo partido há muito tempo me deixou uma herança muito rica, toda a sua alegria e espontaneidade na maneira de encarar a vida.

À minha mãe, por sempre acreditar em mim e estar ao meu lado em todo momento, me dando carinho, amor, sendo meu alicerce durante toda minha jornada até este momento.

Ao meu irmão mais velho, Bruno, que durante toda minha vida esteve presente me ensinando muito sobre como deve ser o caráter de um homem, me orientando em todos os momentos complicados e, acima de tudo, sendo um bom amigo e companheiro sempre.

À minha irmã mais nova, Raquel, por me demonstrar que nada vale na vida se não tivermos determinação e perseverança, que devemos sempre acreditar em nossos sonhos e nunca desistir, pois é através dessa persistência que alcançamos coisas melhores em nossas vidas.

Ao meu professor e orientador, Dr. Samuel Conceição de Oliveira, que durante o tempo de faculdade e de elaboração deste trabalho se fez presente transmitindo confiança e conhecimento, fatores que foram fundamentais à minha formação.

Aos meus companheiros de faculdade e república, que por muitos anos conviveram comigo e se tornaram grandes amigos e irmãos, uma família praticamente. Muitos deles fico tempos sem ver, mas sempre estão em meu pensamento.

Aos meu amigos e companheiros de trabalho, André e Fábio Simões, que durante um ano estiveram no dia-a-dia comigo passando-me novos conhecimentos e ajudando-me a enfrentar mais uma etapa da minha vida.

A todos meus amigos, que são muitos, de forma que não há a possibilidade de citar todos, porém saberão que fazem parte desta dedicatória. Todos sempre me ajudaram e me apoiaram quando muitos não acreditavam, me alegraram quando não conseguia sorrir, me levantaram quando estava no chão, ou seja, sempre foram pessoas com quem pude contar em qualquer momento da minha vida.

"A verdadeira motivação
vem de realização, desenvolvimento pessoal,
satisfação no trabalho e reconhecimento."
Frederick Herzberg

RESUMO

O Brasil enfrenta uma problemática complexa no que diz respeito aos resíduos sólidos urbanos, tendo havido nos últimos anos um aumento da sua geração sem que o país houvesse se adequado à disposição correta dos mesmos. Em muitos estados, a porcentagem de resíduos destinada de maneira inadequada, ou seja, em lixões, aterros controlados, bota-foras, entre outros, é maior do que aquela disposta em aterros sanitários, que seria a maneira mais correta a ser feita. Pode-se afirmar que essa discrepância ocorre devido ao alto custo de implantação e operação dos aterros sanitários, além dos mesmos necessitarem de grandes áreas com características físicas que se adequem ao seu funcionamento. Quando há a disposição em aterros sanitários devidamente construídos, os resíduos sólidos urbanos aterrados geram gases com alto potencial energético, através de reações bioquímicas durante a fase anaeróbia do processo de decomposição do material orgânico armazenado. Tais gases podem ser utilizados para geração de energia dentro do próprio aterro ou para outros meios econômicos. Para estimar se a geração de gases será suficiente para tal compensação econômica, existem modelos matemáticos que fazem a estimativa da quantidade de gás produzido. Estes modelos calculam a geração e a capacidade energética, por meio de parâmetros obtidos com base nas características dos resíduos sólidos, clima da região onde estão aterrados e tempo de aterramento. Foram levantados tais modelos e estudados para que fosse possível a realização de simulações que demonstrem o comportamento da geração de biogás relacionada às condições externas do aterro que interferem nas reações biológicas do seu interior. Os resultados apresentam diferenças entre os valores obtidos, isto nos mostra que na elaboração dos modelos encontrados e utilizados nas simulações, foram atribuídas importâncias para diferentes parâmetros, que determinam esta diferença na estimativa. Portanto, para via de regra, os modelos apresentam dificuldades de entendimento, isto porque não há clareza na formulação das equações, bem como na definição das variáveis e parâmetros, carecendo de um estudo aprofundado para melhor compreender todos estes aspectos, e assim proporcionar um melhor uso de tais modelos.

Palavras-chave: Modelo matemático, resíduos sólidos urbanos, aterro sanitário, biogás, geração de energia.

ABSTRACT

Brazil faces a complex problem in respect to municipal solid waste, having been in recent years an increase of its generation without the country there be adequate for proper disposal thereof. In many states , the percentage of waste destined improperly , ie , in dumps , landfills, send- outs , among others , is greater than that disposed in landfills , which would be the most correct way to be made. It can be argued that this discrepancy is due to the high cost of implementation and operation of the landfill, and the same need large areas with physical characteristics that suit their operations . When there is a provision in properly constructed landfills , municipal solid waste grounded generate gases with high potential energy through biochemical reactions during the anaerobic decomposition of organic material stored . Such gases can be used for power generation within the landfill or other economic means . To estimate the gas generation will be sufficient for such economic compensation , there are mathematical models that make estimating the amount of gas produced . These models calculate the energy capacity and generation , using parameters obtained based on the characteristics of solid waste , climate of the region where they are grounded and grounding time . Such models have been raised and studied so that it was possible to perform simulations that demonstrate the behavior of biogas generation related to the external conditions of the landfill that interfere with biological reactions within. The results show differences between the values obtained , it shows that the preparation of the models found and used in the simulations were allocated amounts for different parameters that determine this difference in the estimate . Therefore, to rule, the models have difficulty understanding this because there is no clarity in the formulation of the equations , and the definition of variables and parameters would require a detailed study to better understand all these aspects , and thus provide a better use of such models.

Keywords: mathematical model, municipal solid waste, landfill, biogas power generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do ecossistema de um aterro sanitário.....	17
Figura 2 – Fases da geração de gás durante o bioprocessamento de degradação anaeróbia de resíduos sólidos em um aterro sanitário (Fonte: Pohland e Gould,1986).....	19
Figura 3 – Modelo triangular de produção de biogás para resíduos rapidamente biodegradáveis.....	36
Figura 4 – Modelo triangular de produção de biogás para resíduos lentamente biodegradáveis.....	37
Figura 5 – Perfis de consumo para resíduo relativamente inerte e diferentes valores de k em função da precipitação.....	47
Figura 6 – Perfis de consumo para resíduo de decomposição moderada e diferentes valores de k em função da precipitação.....	48
Figura 7 – Perfis de consumo para resíduo de decomposição alta e diferentes valores de k em função da precipitação.....	48
Figura 8 – Metano gerado para os diferentes níveis de precipitação e grau de biodegradabilidade do resíduo.....	49
Figura 9 – Metano gerado anualmente para diferentes valores do potencial de geração por massa de resíduo depositado.....	50
Figura 10 – Metano total gerado por todo resíduo disposto para diferentes valores do potencial de geração por massa de resíduo depositado.....	51
Figura 11 – Metano gerado pela quantidade de resíduo disposto em cada ano para diferentes modos de disposição final do resíduo.....	52
Figura 12 – Metano total gerado para diferentes modos de disposição final do resíduo.....	53
Figura 13 – Metano gerado no decorrer do tempo segundo o Modelo <i>Inventário USEPA</i>	54
Figura 14 – Perfis de geração de gás para resíduo relativamente inerte ($L_0=15\text{m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes condições de umidade - Método de Projeto.....	55
Figura 15 – Perfis de geração de gás para resíduo moderadamente degradável ($L_0=170\text{m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes condições de umidade - Método de Projeto.....	55
Figura 16 – Perfis de geração de gás para resíduo altamente degradável ($L_0=262,5\text{m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes condições de umidade - Método de Projeto.....	56
Figura 17 – Geração de metano para todas as faixas de degradabilidade e umidade consideradas nas simulações para todo o resíduo depositado no aterro – Método de Projeto.....	56

Figura 18 – Perfis de geração de gás para resíduo relativamente inerte ($L_0=15 \text{ m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes condições de umidade – Método de Decaimento de 1ª Ordem.....	57
Figura 19 – Perfis de geração de gás para resíduo moderadamente biodegradável ($L_0=170 \text{ m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes condições de umidade – Método de Decaimento de 1ª Ordem.....	58
Figura 20 – Perfis de geração de gás para resíduo altamente biodegradável ($L_0=262,5 \text{ m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes condições de umidade – Método de Decaimento de 1ª Ordem.....	58
Figura 21 – Geração de metano para todas as faixas de degradabilidade e umidade consideradas nas simulações para todo o resíduo depositado no aterro – Método de Decaimento de 1ª Ordem	59
Figura 22 – Perfis de geração de gás para resíduo relativamente inerte ($L_0=15 \text{ m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes valores de k.....	60
Figura 23 – Perfis de geração de gás para resíduo moderadamente degradável ($L_0=170 \text{ m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes valores de k.....	60
Figura 24 – Perfis de geração de gás para resíduo altamente degradável ($L_0=262,5 \text{ m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes valores de k.....	61
Figura 25 – Geração de metano para todas as faixas de degradabilidade e umidade consideradas nas simulações para todo o resíduo depositado no aterro – School Canion.....	61
Figura 26 – Geração de biogás segundo o modelo de Tchobanoglous <i>et al</i> (1994).....	63
Figura 27 – Gráfico dos valores das simulações comparados entre os modelos de Laquidara et. al. (1986) e “Aproximação simples” (USEPA, 1996).....	64
Figura 28 – Gráfico dos valores das simulações comparados entre os modelos “Inventário USEPA” (USEPA, 1997) e “Inventário IPCC” (IPCC, 1996.....	65
Figura 29 – Gráfico dos valores das simulações para resíduos relativamente inertes comparados entre os modelos Método de Projeto, Método de Decaimento de Primeira Ordem e School Canion.....	67
Figura 30 – Gráfico dos valores das simulações para resíduos degradabilidade alta comparados entre os modelos Método de Projeto, Método de Decaimento de Primeira Ordem e School Canion.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição percentual média do resíduo sólido domiciliar no Brasil.....	16
Tabela 2 – Constituintes típicos encontrados no biogás de resíduos sólidos urbanos.....	21
Tabela 3 – Geração de metano por quantidade de resíduo depositado.....	26
Tabela 4 – Valores de FCM recomendados pelo IPCC.....	28
Tabela 5 – Porcentagem de carbono orgânico degradável nos componentes do resíduo.....	28
Tabela 6 – Constituintes orgânicos rapidamente e lentamente biodegradáveis no resíduo.....	34
Tabela 7 – Biodegradabilidade dos constituintes orgânicos nos resíduos.....	35
Tabela 8 – Porcentagem em massa dos elementos químicos dos resíduos orgânicos decompostos	35
Tabela 9 – Relação molar dos componentes	36
Tabela 10 – Tipos de modelos e suas respectivas equações.....	38
Tabela 11 – Parâmetros estimados para os modelos de geração de biogás em aterros propostos por Oonk & Boom	39
Tabela 12 – Categoria de resíduos de acordo com o modelo ADEME.....	41
Tabela 13 – Geração média de resíduos por habitante por unidade de tempo.....	42
Tabela 14 – Cálculo do resíduo depositado no aterro em sua vida útil.....	43
Tabela 15 – Valores característicos de alguns parâmetros adotados para a realização das simulações.....	43
Tabela 16 – Valores de k em função da umidade local do aterro.....	44
Tabela 17 – Valores da constante de decaimento para diferentes valores de precipitação e graus de degradabilidade do resíduo.....	44
Tabela 18 – Valores do potencial de geração do metano com relação a sua degradabilidade.....	45
Tabela 19 – Porcentagem de cada componente no RSD.....	50
Tabela 20 – Estimativa da geração de biogás em aterros a partir da equação estequiométrica da biodegradação.....	58
Tabela 21 – Valores das simulações comparados entre os modelos de Laquidara et. al. (1986) e “Aproximação simples” (USEPA, 1996).....	63
Tabela 22 – Valores das simulações comparados entre os modelos “Inventário USEPA” (USEPA, 1997) e “Inventário IPCC” (IPCC, 1996.....	64
Tabela 23 – Valores das simulações comparados entre os modelos Método de Projeto, Método de Decaimento de Primeira Ordem e School Canion.....	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVO	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Resíduo Sólido Urbano: definição, geração, composição e disposição final	16
3.2	Geração de Biogás (<i>Landfill gas</i>).....	18
3.3	Decomposição biológica dos resíduos e fases de produção de biogás em aterros sanitários	19
3.4	Constituintes e características do biogás	21
3.5	Drenagem de biogás e percolado (chorume) da massa de resíduo	22
3.6	Potencial energético do metano presente no biogás.....	23
3.7	Importância da modelagem e modelos que estimam a produção de biogás	23
3.7.1	Modelos Simplificados	24
3.7.2	Modelos de Inventário	26
3.7.3	Modelos Cinéticos	30
3.7.4	Modelo Químico.....	33
3.7.5	Modelos desenvolvidos para regiões específicas	37
4	METODOLOGIA.....	42
4.1	Determinação das variáveis para elaboração das simulações	42
5	RESULTADOS	46
5.1	Modelos Simplificados.....	46
5.2	Modelos de Inventário	50
5.3	Modelos Cinéticos	53
5.4	Modelos Químicos.....	61
5.5	Modelos desenvolvidos para regiões específicas.....	62
5.6	Comparativo entre modelos semelhantes	63
6	CONCLUSÃO.....	67
7	BIBLIOGRAFIA	69

1 INTRODUÇÃO

De acordo com a Lei Federal nº 12.305/10 (Política Nacional de Resíduo Sólido – P.N.R.S.), os resíduos sólidos urbanos (RSU) são definidos como sendo os resíduos domiciliares oriundos de atividades domésticas em residências e os resíduos de limpeza das cidades, oriundos da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e, outros serviços.

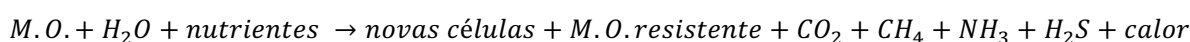
Devido à urbanização de áreas até então desabitadas e ao aumento da população, evidencia-se um crescimento no consumo de produtos, das mais variadas origens, o que acarreta uma maior geração de resíduos sólidos urbanos, sendo variável, entretanto, em cada região do país.

Com o aumento da geração de RSU nos últimos anos, a coleta dos mesmos também tem crescido, sendo que nos últimos cinco anos esse crescimento da coleta foi de 10%. A região sudeste continua respondendo por mais de 50% do total coletado e apresenta o maior percentual de cobertura dos serviços de coleta no país. (ABRELPE)

Com este aumento da geração e coleta, é necessário que haja um planejamento para destinação adequada dos mesmos, visto que 58% seguem para aterros sanitários, porém cerca de 75 mil toneladas têm destinação inadequada, sem as medidas necessárias para proteção do meio ambiente contra danos e degradações, apesar das determinações legais e dos esforços empreendidos. Tal fato ocorre em todos os estados e, segundo os dados do “Panorama dos resíduos sólidos no Brasil”, desenvolvido pela ABRELPE, mais de 60% dos municípios brasileiros dispuseram resíduos em unidades de destinação inadequada neste último ano.

Focando nos aterros sanitários, deve-se salientar que toda a fração orgânica biodegradável presente no resíduo disposto, sofre reações gerando gases. Após ser aterrado, o resíduo sólido urbano passa por um processo de lenta transformação biológica da matéria orgânica complexa presente no meio, sendo esta degradada em compostos de cadeia mais simplificada. Tal processo é iniciado por uma fase aeróbia, sucedida por uma fase anaeróbia.

Na fase anaeróbia, os produtos são gases e lixiviado, podendo os gases serem aproveitados para gerar energia útil, como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões e combustível veicular, dessa forma podendo assumir um valor comercial. A porção biodegradável da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos pode ser convertida em gases contendo em sua maior parte dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄), sendo esse processo representado pela equação:



Aterros sanitários são empreendimentos que ocupam grande área e possuem custo de implantação e de operação elevados. Segundo a Fundação Getúlio Vargas, a construção de aterros sanitários no Brasil custa cerca de R\$ 525,8 milhões para um de grande porte (2 mil toneladas/dia de lixo); R\$ 236,5 milhões para um de médio porte (800 toneladas/dia); e R\$ 52,4 milhões para um de 100 toneladas/dia.

Tendo em vista que tais fatores são limitantes para a sua implantação, pode-se levar em consideração que a geração de gases ameniza os impactos financeiros e assim viabiliza o empreendimento. Tais gases, por possuírem um potencial energético muito alto, na casa de 5 kwh/m³ (MUYLAERT, 2000), podem ser empregados em sistemas de geração de energia, os quais podem auxiliar na redução do consumo de energia elétrica comum no próprio empreendimento, ou ainda, esta energia pode ser vendida para terceiros.

O sistema de reaproveitamento de biogás por meio dos gases gerados em aterros sanitários é uma realidade e uma alternativa muito interessante do ponto de vista econômico e ambiental, sendo este reaproveitamento um dos objetivos da Política Nacional de Resíduo Sólido colocado no art 7º, “XIV - incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;”. Porém, a implantação de alternativas energéticas depende da capacidade de geração de gases nos aterros sanitários, sendo necessário fazer uma estimativa do volume gasoso produzido para averiguar a viabilidade dessa alternativa. A partir da constatação da viabilidade de se reaproveitar o biogás, este processo se torna uma ferramenta para auxiliar na manutenção do aterro, mostrando-se assim uma boa alternativa econômica.

Modelos matemáticos são ferramentas que possibilitam fazer uma estimativa da geração dos gases por meio de simulações envolvendo variáveis do sistema tais como quantidade e qualidade do resíduo, tempo de aterramento, potencial energético dos gases gerados, taxa específica de biodegradabilidade, dentre outras. Por meio dessa ferramenta é possível prever se a implantação do aterro sanitário será autoviabilizada ou não.

Por outro lado, há dificuldades no uso dos modelos matemáticos disponíveis para tais estimativas, como a falta de conhecimento do funcionamento destes modelos e o mal entendimento dos parâmetros necessários para seus cálculos. Um estudo aprofundado dessas ferramentas se faz necessário para melhor entender o seu funcionamento e melhor compreender os resultados gerados, permitindo assim análises mais seguras a partir dos dados obtidos.

2 OBJETIVO

O principal objetivo deste trabalho é realizar um estudo sobre alguns modelos matemáticos apresentados na literatura para a estimativa da produção de gás gerado no bioprocesso de decomposição anaeróbia de resíduos sólidos em aterros sanitários.

Para tanto, os seguintes objetivos específicos são propostos:

- Realizar uma análise de modelos matemáticos disponíveis na literatura para a estimativa da geração de gases em aterros sanitários. A análise compreenderá o estudo detalhado da concepção, estrutura, variáveis, parâmetros, natureza e métodos de resolução das equações constitutivas de cada modelo;
- Realizar estudos de casos a partir da simulação computacional da geração de gases sob diferentes condições de contorno dos aterros, incluindo aquelas para as quais os modelos foram concebidos e validados, e outras não investigadas inicialmente.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduo Sólido Urbano: definição, geração, composição e disposição final

Segundo a ABNT NBR 10004/2004, o resíduo sólido é definido como:

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

A geração de resíduo está diretamente ligada à população das áreas urbanas e seus costumes, sendo que com o aumento dessa população a geração também aumenta. Esta geração ocorre nos processos de utilização e transformação de matérias-primas. De acordo com a *Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE* (2011), no Brasil são gerados 63 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia, e o estudo de sua composição física mostra predominância de materiais orgânicos, sendo diferente de países desenvolvidos. Na Tabela 1 estão apresentados dados relativos à composição dos resíduos sólidos domiciliares no Brasil.

Tabela 1 – Composição percentual média do resíduo sólido domiciliar no Brasil.

Componente do resíduo sólido urbano	Porcentagem na massa total (%)
Matéria Orgânica	51,4
Plástico	13,5
Papel, papelão e TetraPak	13,1
Metais	2,9
Vidro	2,4
Outros	16,7

Fonte: Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - ABRELPE (2011)

Para toda a geração de resíduos no Brasil é necessário encontrar uma forma de disposição adequada, sendo que a única técnica para a disposição final de resíduos sólidos

urbanos (RSU) no solo que atende a esse critério é o aterro sanitário, visto que não causa danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. Tal técnica trata-se do confinamento dos resíduos sólidos à menor área possível, com a devida redução de volume através da compactação e a cobertura da massa através de solo a cada jornada de trabalho.

Segundo a CETESB, o aterramento pode ser realizado através dos seguintes métodos: (i) de trincheira ou vala; (ii) de área; (iii) de rampa. Já os métodos de deposição do resíduo podem ser: (i) de célula, (ii) de sanduiche; (iii) de descarga.

O aterramento é um sistema dinâmico no qual processos físicos, químicos e biológicos (reações metabólicas) promovem a degradação da fração orgânica com consequente geração de efluentes líquidos e gasosos, modificando a pressão no interior da massa de resíduos, que é contida por sistemas de impermeabilização de base e de cobertura. (BELLO, 2010)

Na Figura 1 está apresentado um esquema do ecossistema de um aterro sanitário e as interações entre os diversos fatores intervenientes

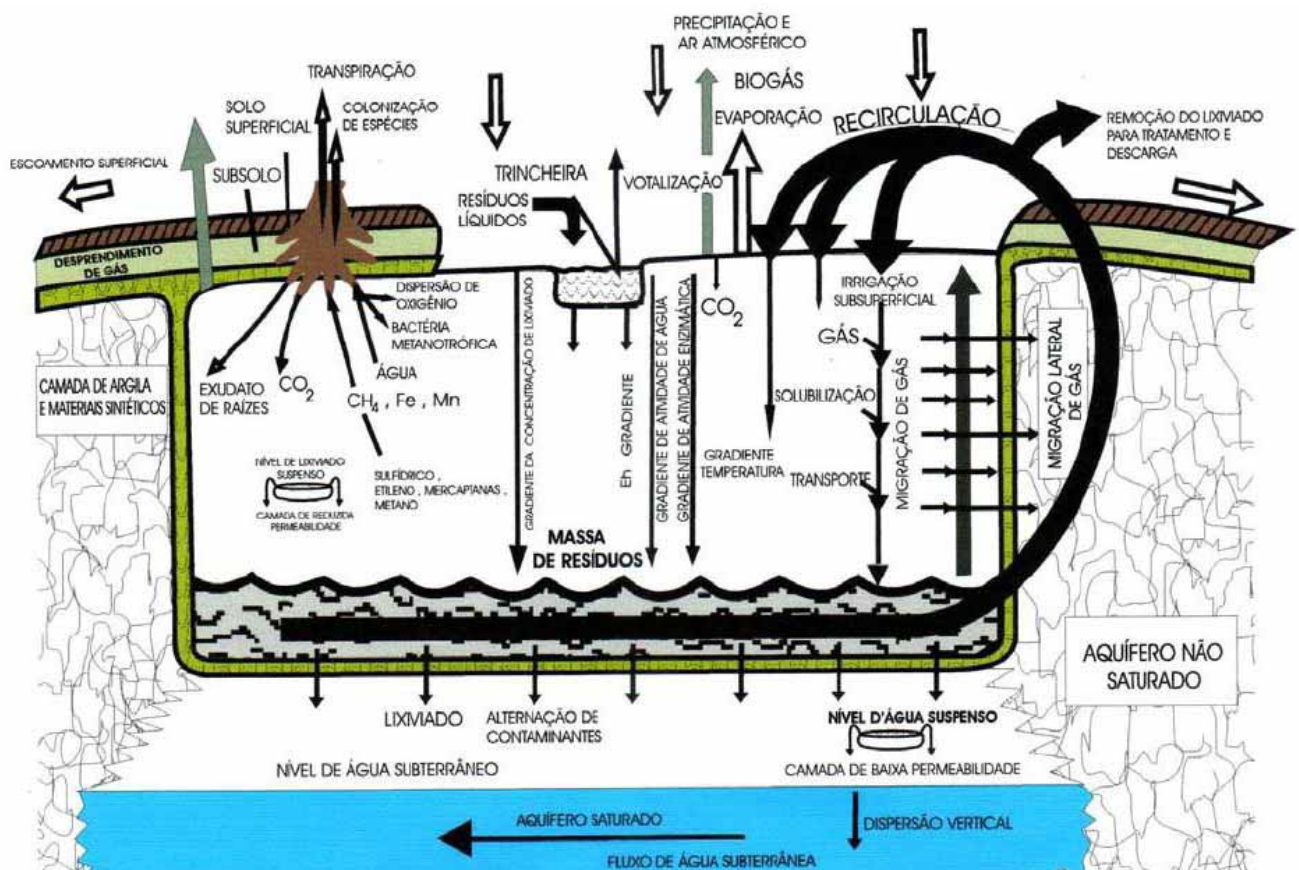


Figura 1 – Representação esquemática do ecossistema de um aterro sanitário

Fonte: Bello (2010)

Algumas medidas devem ser tomadas na construção e operação de aterros sanitários tais como a proteção das águas superficiais e subterrâneas, a disposição, o acúmulo e a compactação diária do resíduo na forma de células, a cobertura diária do resíduo, o controle e a drenagem de gases e líquidos formados dentre outros. (ENSINAS, 2003)

A concepção de aterro como local de tratamento requer a avaliação das alternativas e sistemas disponíveis, distinguindo-se quatro alternativas: digestão anaeróbia; digestão aeróbia; digestão semi-aeróbia.

Nestes empreendimentos deve-se realizar o monitoramento contínuo e permanente dos setores concluídos, com o objetivo de avaliar as obras de captação dos percolados e de drenagem das águas superficiais, bem como avaliar o sistema de queima de gases e a eficiência dos trabalhos de revegetação. (BRITO FILHO, 2005)

3.2 Geração de Biogás (*Landfill gas*)

O processo de geração de biogás depende de muitos parâmetros, como temperatura ambiente, umidade, taxa de compactação, presença de substâncias tóxicas e nutrientes que são determinantes na atividade bacteriana.

Segundo a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), diversos fatores influenciam a taxa de geração do biogás, quais sejam:

- Composição dos resíduos: quanto maior a porcentagem de matéria orgânica, maior o potencial de geração do metano;
- Ambiente anaeróbio: para que haja produção de metano, a matéria orgânica deve sofrer decomposição em ambiente anaeróbio, para tanto, pode-se cobrir os resíduos com terra, ou com o próprio resíduo, criando condições anaeróbias nas camadas inferiores do aterro;
- Umidade: requisito essencial à vida das bactérias decompositoras; umidade elevada, de 60 a 90%, pode aumentar a geração de biogás;
- Acidez e temperatura: as bactérias metanogênicas atingem maior produtividade em pH entre 6 e 8. A produção de metano é afetada pela temperatura, sendo o valor ideal desta variável para a digestão anaeróbia situado entre 29 e 38° C para as bactérias mesofílicas e entre 49 e 70° C para as bactérias termofílicas. Abaixo de 10° C há uma queda brusca na taxa de geração do gás metano. A própria decomposição fornece calor suficiente para que ocorra a metanogênese (IBAM, 2007).

A forma de construção e operação do aterro influencia a produção e a composição do biogás. Aterros com altura elevada e um sistema eficiente de impermeabilização da camada de cobertura fomentarão o predomínio da atividade anaeróbia, responsável pela formação do metano. A compactação aumenta a densidade da massa de resíduo, o que proporciona a redução da fase aeróbia (IBAM, 2007)

O Brasil possui condições favoráveis à produção de biogás em aterros sanitários, pelas condições de umidade e temperatura, e também pela predominância de matéria orgânica na composição dos resíduos sólidos domiciliares. Por outro lado, a liberação para a atmosfera dos gases de aterro sanitário pode ser prejudicial ao meio ambiente. A emissão de gases causa impactos locais, pois danifica a vegetação circundante e global, o que contribui significativamente para o efeito estufa. (BELLO, 2010)

3.3 Decomposição biológica dos resíduos e fases de produção de biogás em aterros sanitários

A produção de biogás em um aterro sanitário é dependente de vários fatores como: umidade, dimensão do aterro, tipo e concentração de matéria orgânica no resíduo, grau de compactação, pH, entre outros, sendo dividida em cinco fases, conforme esquematizado na Figura 2.

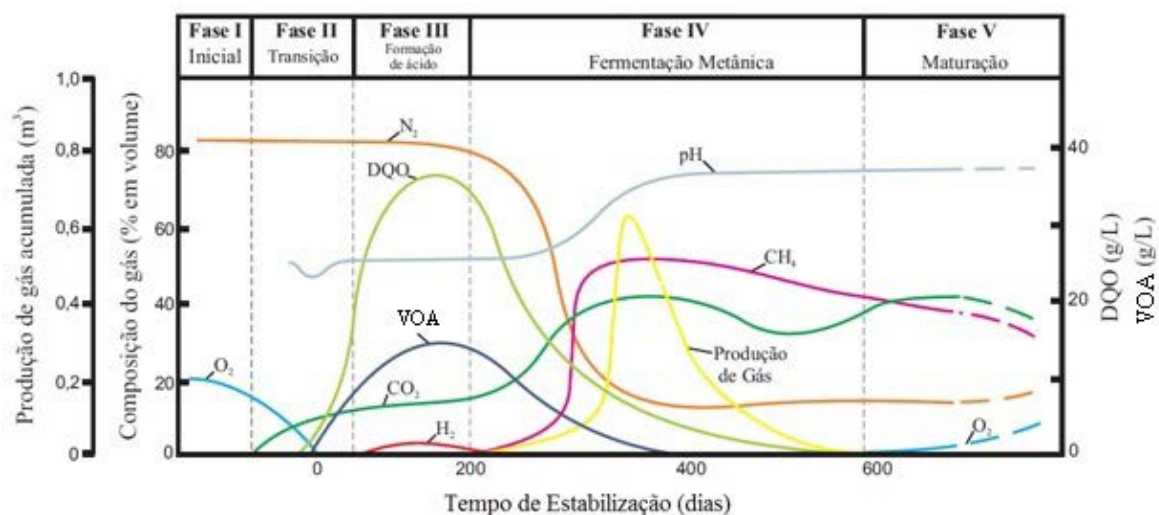


Figura 2 – Fases da geração de gás durante o bioprocessamento de degradação anaeróbia de resíduos sólidos em um aterro sanitário (Fonte: Pohland e Gould, 1986).

Fase I (fase de ajuste inicial) – o resíduo é depositado e a umidade se acumula. Com a abundância de substrato e nutrientes aproveitáveis, microrganismos aeróbios começam a degradar os resíduos, produzindo água, dióxido de carbono, ácidos orgânicos e minerais inorgânicos. A decomposição aeróbia é mantida pelo oxigênio contido na massa de resíduo. Trata-se de uma fase curta, aeróbica e pode ser associada com a fase II.

Fase II (fase de transição) – nesta fase o ambiente do aterro muda de aeróbio para anaeróbio, pelo esgotamento do oxigênio, e é estabelecida uma condição redutora. Há a troca de aceptores de elétrons do oxigênio para os nitratos e sulfatos. A redução dessas últimas moléculas sempre produzirá nitrogênio e sulfeto de hidrogênio (gás sulfídrico). O nível de dióxido de carbono começa a aumentar causando a formação de ácido carbônico e a diminuição do pH do chorume para a faixa ácida. As temperaturas do resíduo são mais quentes durante esta fase, entre 54 e 71° C.

Fase III (fase ácida) – o resíduo é degradado anaerobicamente. Nesta fase há a hidrólise de moléculas orgânicas maiores, onde estas são convertidas em moléculas menores e são produzidos hidrogênio e moléculas solúveis. As bactérias acidogênicas convertem os compostos hidrolisados em ácidos orgânicos voláteis (VOAs), os quais causam mudanças no pH, aumentando as concentrações de metais pesados no chorume. A biomassa disponível cresce associada às bactérias metanogênicas e ocorre o rápido consumo de substrato e nutrientes. O primeiro gás formado nesta fase é o dióxido de carbono.

Fase IV (fase de fermentação do metano) – os VOAs e o hidrogênio produzidos são convertidos a metano pelas bactérias metanogênicas. Ácidos são produzidos, mas predomina a formação do metano. Na medida em que os VOAs são utilizados, o pH do chorume aumenta (6,8 para 8,0) e as concentrações de metais pesados diminuem. Sulfatos e nitratos são reduzidos para sulfetos e amônia. As temperaturas dos gases caem por volta de 38 a 45°C e quando a temperatura atinge valores inferiores a 38°C, a produção de gás começa a diminuir.

Fase V (fase de maturação) – houve a maturação do aterro e o material de rápida biodegradabilidade encontra-se estabilizado (foram convertidos para metano ou dióxido de carbono). A biodegradação é limitada pela falta de substratos facilmente biodegradados e nutrientes; logo, reduz-se a atividade biológica. A taxa de produção de gás também decresce. Ambos os gases (dióxido de carbono e metano) são produzidos, mas em taxas menores que na fase IV. Na ultima parte desta fase, o aterro pode retornar à condição oxidante devido a pequenas quantidades dos gases oxigênio e nitrogênio que podem surgir.

Aterros são heterogêneos e a deposição do resíduo não acontece de maneira uniforme e ao mesmo tempo, sendo que as fases descritas ocorrem simultaneamente em diferentes áreas

e profundidades de um aterro ativo ou recentemente fechado. Após o fechamento do aterro, e devido à presença de resíduos diversos em diferentes fases de degradação, este tende a ser impulsionado para a fase IV, mantendo-se na mesma por um longo período de tempo. (BRITO FILHO, 2005)

Devido aos fatores que atuam na degradação dos resíduos do aterro e até mesmo a origem e qualidade desses resíduos, não podemos estimar, com clareza e exatidão, os produtos dessa degradação e o tempo necessário à ocorrência da mesma. São feitas estimativas, através de estudos detalhados, levando-se em conta os fatores inerentes a cada situação como: quantidade e tipos de materiais degradáveis, susceptibilidade dos materiais degradáveis (alimentos, papel, couro, madeira), temperatura, umidade, compactação do aterro, localização.

3.4 Constituintes e características do biogás

O biogás é composto de vários gases presentes em grandes quantidades (gases principais), os quais são procedentes da decomposição da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e aqueles presentes em pequenas quantidades (oligogases), podendo ser tóxicos e apresentarem riscos à saúde pública. (ENSINAS, 2003)

Os gases encontrados nos aterros e suas porcentagens estão listadas na Tabela 2, sendo o metano e o dióxido de carbono, os principais gases procedentes da decomposição anaeróbia dos componentes biodegradáveis dos resíduos orgânicos nos resíduos sólidos urbanos.

Tabela 2 – Constituintes típicos encontrados no biogás de resíduos sólidos urbanos

Componentes	Porcentagem (base volume seco)
Metano	45 - 60
Dióxido de Carbono	40 - 60
Nitrogênio	2 - 5
Oxigênio	0,1 - 1,0
Sulfetos, disulfetos, mercaptanos, etc.	0 - 1,0
Amoníaco	0,1 - 1,0
Hidrogênio	0 - 0,2
Monóxido de Carbono	0 - 0,2
Constituintes em quantidades traçadas	0,01 - 0,6
Características	Valor
Temperatura	37 - 67° C
Densidade específica	1,02 - 1,06
Contido em umidade	Saturado
Poder calorífico (kcal/m ³)	890 - 1223

Fonte: Tchobanoglous et al. (1994)

Quando o metano está presente no ar entre 5 e 15%, é explosivo, e, quando essas concentrações chegam ao nível crítico, há pouco risco de ocorrer uma explosão, visto ser limitada a quantidade de oxigênio no aterro. Todavia, podem ser formadas misturas de metano que estão dentro do limite explosivo, se o gás migrar e entrar em contato com o ar. Utiliza-se a lei de Henry para estimar o escape da concentração do gases no lixiviado, o que depende da concentração dos mesmos no momento de contato.

3.5 Drenagem de biogás e percolado (chorume) da massa de resíduo

A concepção de um sistema de drenagem para percolados depende da alternativa de tratamento adotada para o aterro, podendo estar associado ao sistema de drenagem dos gases. Os drenos usados para a coleta e transporte de líquidos percolados e/ou gases são constituídos por linhas de canaletas escavadas diretamente no solo, ou, sobre a camada de aterro impermeabilizante e preenchida com material filtrante.

O sistema de drenagem de biogás tem a função de drená-lo evitando sua migração para o subsolo e seu acúmulo em redes de esgoto, fossas, poços e sob edificações (internas e externas ao aterro sanitário).

A migração do biogás deve ser controlada pela execução de rede de drenagem, sendo que tais drenos devem atravessar todo o aterro no sentido vertical, partindo do sistema de impermeabilização da base até acima da cota de piso da camada de cobertura. (BRITO FILHO, 2005)

Os drenos verticais associam-se aos drenos horizontais e subverticais projetados para facilitar a drenagem e podem ser interligados ao sistema de drenagem de percolados. Um fator condicionante para o dimensionamento dos drenos é a vazão do gás a ser drenada. Recomenda-se que o gás emitido para a atmosfera seja queimado, podendo ser utilizado para geração de energia após avaliação do potencial de geração energética. Esta alternativa é viável visto que o biogás pode apresentar concentrações de metano da ordem de 40 a 60% (Tabela 2). A variação desses valores depende da composição dos resíduos e seu tempo de degradação.

Convém ressaltar que a coleta do chorume deve ser feita pela base do aterro e, tratado antes de ser descartado no curso de um rio ou lagoa. Os tratamentos mais convencionais são o biológico (lagoas anaeróbias, aeróbias e de estabilização), por oxidação (evaporação e queima) ou químico (adição de substâncias químicas).

3.6 Potencial energético do metano presente no biogás

A geração de energia em aterros sanitários a partir do uso de biogás acontece em varias partes do mundo (EUA, Itália, Inglaterra e outros) e é uma tendência nos países em desenvolvimento, como o Brasil.

O uso do metano, que possui poder calorífico de 5.800 kcal/m^3 (CNTP) (MUYLAERT, 2000), como combustível para a geração de energia elétrica é vantajoso porque traz valor agregado ao sistema de gestão de resíduos. A cogeração de eletricidade e energia térmica (vapor) a partir do biogás é ainda melhor, pois, isolada, varia de 20 a 50% e, com o uso da cogeração, obtém-se eficiências mais altas devido à disponibilidade do vapor resultante do processo de geração. Tal vapor pode ser utilizado localmente para aquecimento, refrigeração, ou transportado por um tubo para uma indústria ou comércio próximo proporcionando uma segundo fonte de renda ao empreendimento (DUARTE, 2006).

3.7 Importância da modelagem e modelos que estimam a produção de biogás

Modelos matemáticos são ferramentas que avaliam o potencial de geração de biogás em um aterro, sendo seus resultados utilizados para avaliar os potenciais de migração/emissões de gases, principalmente gás carbônico e metano, bem como para avaliar a viabilidade de um projeto de gestão do mesmo para reaproveitamento energético.

Existem vários modelos para estimar a produção de biogás, de diferentes complexidades, os quais podem ser usados para obter a curva de geração de gás em função do tempo. A produção de gás total e a taxa com que os gases são gerados podem variar com os diferentes modelos, mas o parâmetro de insumo mais importante para todos é a quantidade do resíduo presumido passível de decomposição. Outro fator importante é a quantidade de tempo presumida entre a colocação do resíduo e o começo da decomposição anaeróbia ou fase metanogênica dentro da massa do resíduo (BRITO FILHO, 2005).

Todos os modelos usados para estimar a quantidade de biogás produzida localmente deveriam ser submetidos a uma completa análise da sensibilidade para determinar resultados potenciais e analisar quais parâmetros têm maior influência na produção do biogás.

Pode-se observar um grau de complexidade variável dos modelos reportados na literatura, verificando-se desde modelos simplificados, que são utilizados para uma estimativa prévia da geração no momento inicial do projeto de um aterro, até os mais complexos que se

utilizam de equações de segunda ordem ou contemplam multi-fases para realizar tais estimativas, sendo por isso mais precisos.

Modelos cinéticos de primeira ordem são frequentemente usados para avaliar a produção de metano durante a vida de um aterro, os quais podem ser adaptados para aterros específicos desde que se façam os devidos ajustes dos parâmetros em função das condições no aterro. (BRITO FILHO, 2005)

Neste trabalho serão analisados e simulados alguns dos modelos matemáticos disponíveis na literatura para a estimativa da produção de biogás em aterros sanitários.

3.7.1 Modelos Simplificados

Os modelos simplificados são utilizados geralmente para uma estimativa inicial no processo de dimensionamento do aterro, isto porque eles são considerados modelos que podem apresentar resultados exacerbados da geração no momento dos cálculos, pois não levam em consideração todos os fatores que podem influenciar o processo como um todo.

MODELO 1 – *Modelo de Laquidara et al. (1986)*

Este modelo é utilizado para calcular a produção de biogás gerada por um típico resíduo sólido urbano, sendo utilizada uma taxa de geração de biogás dada em litros por grama de sólidos voláteis biodegradáveis (SVB) seco, que seria matéria orgânica presente no resíduo. (BRITO FILHO, 2005)

O modelo é dividido em duas fórmulas, a primeira determina o decréscimo da quantidade de sólidos orgânicos depositados no aterro sanitário em um determinado tempo. O modelo associa o valor inicial de sólidos orgânicos com o fator de decaimento que conta com a constante de decaimento (k), a qual é função dos índices pluviométricos da região onde está implantado o aterro, e, o tempo que se quer determinar o valor de sólidos restantes, geralmente dado em anos.

Após adotar o valor da constante de decaimento em função da precipitação anual da região, utiliza-se a fórmula abaixo para determinar o consumo dos sólidos no aterro.

$$S_t = S_0 \times e^{-kt} \quad (1)$$

onde: S_i = quantidade de sólidos orgânicos restantes em determinado período (t); S_0 = quantidade inicial de sólidos orgânicos restantes no fechamento do aterro (t); k = constante de decaimento (ano^{-1}); t = tempo (ano).

Após determinado o consumo de material depositado, utiliza-se a segunda fórmula que está apresentada a seguir (Equação 2) para estimar a quantidade de biogás gerado no empreendimento. Os parâmetros que interagem nesta fórmula são uma constante de geração de biogás por quantidade de matéria orgânica depositada e a diferença entre a quantidade inicial de resíduo e a final, ou seja, o que foi consumido.

$$G = C(\Delta S) \quad (2)$$

onde: G = metano produzido (m^3/ano); C = constante = 350 m^3 de CH_4 /quantidade de matéria orgânica decomposta (t); $\Delta S = (S_0 - S_i)$ = quantidade de matéria orgânica decomposta.

O uso da constante C admite um valor fixo para o potencial de geração de metano a partir do resíduo, o que pode ocasionar erros nas estimativas, uma vez que este parâmetro depende de vários fatores.

MODELO 2 – “Aproximação simples” (USEPA, 1996)

Neste modelo, denominado “Aproximação simples”, a produção de biogás é dada como um produto de uma constante, em que a USEPA sugere um intervalo de valores baseado nas condições climáticas e de acondicionamento do resíduo, e uma variável. A constante seria a taxa de geração de gás metano por quantidade de resíduo depositado, dado em $\text{m}^3/\text{kg resíduo.ano}$ (Tabela 3), e, a variável seria a quantidade de lixo depositado no local no tempo a ser estudado a geração.

Tabela 3 – Geração de metano por quantidade de resíduo depositado

Taxa de geração de metano por quantidade de resíduo depositado (G_r) ($\text{m}^3/\text{kg resíduo.ano}$)	
Valor máximo	1,249
Valor médio	0,624
Valor mínimo	0,312

O modelo é representado pela seguinte equação:

$$G_{CH_4} = G_r \times Q_L \quad (3)$$

onde: G_{CH_4} = geração anual de gás metano (m^3 /ano); G_r = geração de gás metano por quantidade de lixo depositado (m^3 /kg resíduo x ano); Q_L = quantidade de resíduo depositada no local (kg)

Tal modelo é considerado um dos mais simples encontrados na bibliografia, podendo ser usado somente em avaliações preliminares de projetos de aproveitamento de gás de aterros sanitários. Considerando que no aterro ocorre uma diminuição na geração de gás no decorrer do tempo, devido o consumo da matéria orgânica presente no resíduo, o modelo em questão se torna menos apropriado para uma estimativa em longo prazo, razão pela qual se aconselha que este seja utilizado somente para o primeiro ou segundo ano após o fechamento do aterro. (ENSINAS, 2003)

3.7.2 Modelos de Inventário

Os modelos de inventário consideram mais parâmetros se comparados com os simplificados, pois levam em consideração fatores como a composição do resíduo coletado e depositado no aterro que afeta o potencial de geração de metano a partir do resíduo e a fração de resíduos sólidos domésticos depositados em locais de disposição de resíduos sólidos, ainda como a classificação do local como adequado ou inadequado.

MODELO 3 – *Inventário IPCC (1996)*

O modelo desenvolvido pela IPCC calcula emissões anuais de metano em países ou regiões específicas, a partir da quantidade de resíduos gerados, classificados em resíduos perigosos, resíduos especiais e resíduos sólidos urbanos, e, a destinação final dos mesmos.

Por esse método, estima-se o percentual de carbono orgânico degradável e sua fração distinta presente na massa do lixo, determinando assim a quantidade de metano que pode ser gerada pela quantidade de resíduo depositado, conforme a seguinte equação:

$$Q_{CH_4} = \frac{PopUrb \times Taxa\ RSD \times RSD_f \times L_0}{\rho_{CH_4}} \quad (4)$$

onde: Q_{CH_4} = emissão de gás metano (m^3 de CH_4 /ano); $PopUrb$ = população urbana (n° de habitantes); $Taxa\ RSD$ = taxa de geração de resíduos sólidos domésticos por habitantes por ano (kg de RSD/ habitante x ano); RSD_f = fração de resíduos sólidos domésticos depositada em locais de disposição de resíduos sólidos (fração adimensional); L_0 = potencial de geração de metano a partir do resíduo depositado; ρ_{CH_4} = massa específica do metano (kg/m^3)=0,740 kg/m^3 (CEGAS, 2005).

O fator L_0 (potencial de geração de metano a partir do resíduo depositado) é dado pela equação:

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times (16/12) \quad (5)$$

onde: FCM = fator de correção de metano; COD = carbono orgânico degradável (t de C/t resíduo); COD_f = fração de COD dissociada; F = fração em volume de metano no biogás; $(16/12)$ = fator de conversão de carbono em metano (t de CH_4 /t de C)

Reunindo-se as Equações 4 e 5, obtém-se:

$$Q_{CH_4} = \frac{PopUrb \times Taxa\ RSD \times RSD_f \times FCM \times COD \times COD_f \times F \times (16/12)}{\rho_{CH_4}} \quad (6)$$

O fator de correção do metano (FCM), que pode ser entendido como um fator que considera as emissões fugitivas dos gases, esta relacionado com a qualidade do acondicionamento do resíduo, ou seja, conforme o resíduo é depositado em locais mais adequados, as emissões fugitivas diminuem devido a impermeabilização do solo.

Tabela 4 – Valores de FCM recomendados pelo IPCC

Classificação do Local	Local de disposição	FCM	Profundidade (p)
Adequado ^a	Aterro Sanitário	1,0	$p \geq 10$
Inadequado	Aterro Controlado	0,8	$5 \leq p \leq 10$
Inadequado	Lixão	0,4	$p < 5$
sem classificação ^b	Locais sem categoria	0,6	Não classificado

Fonte: IPCC, 1996

^a Locais adequados devem ter disposição controlada do resíduo contando com o material de cobertura, compactação mecânica e nivelamento do terreno.

^b Para locais não classificados é assumido um valor *Default* para FCM .

Com relação ao parâmetro carbono orgânico degradável (COD), este pode ser determinado usando-se a Equação 7, a qual está baseada na composição do resíduo e na porcentagem de carbono em cada componente da massa de resíduo (Tabela 5).

$$COD = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,4 \times D) + (0,3 \times E) \quad (7)$$

onde: A = fração de papel e papelão no lixo; B = fração de resíduos de parques e jardins no lixo; C = fração de restos de alimentos no lixo; D = fração de tecidos no lixo; E = fração de madeira no lixo.

A Equação (7) está baseada na composição do resíduo e na quantidade de carbono em cada componente da massa de resíduo como reportado pelo IPCC (1996). A Tabela 5 apresenta valores de COD para as diversas frações contempladas na Equação (7):

Tabela 5 – Porcentagem de carbono orgânico degradável nos componentes do resíduo

Componente	COD (% em massa)
A - Papel e papelão	40
B - Resíduos de parques e jardins	17
C - Restos de alimentos	15
D - Tecidos	40
E - Madeira ^a	30

Fonte: Brito Filho (2005)

^a excluindo fração de lignina que se decompõe muito lentamente.

No caso da matéria orgânica não estar discriminada no resíduo, e sim colocada como *outros*, englobam-se os componentes B (resíduos de parques e jardins), C (restos de alimentos) e E (resíduos de madeira e palha). Assim, a equação fica colocada dentro da faixa limite destes componentes:

$$COD = (0,4 \times A) + [(0,15 \text{ a } 0,30) \times (B + C + E)] \quad (8)$$

A fração diferenciada COD_f é a parcela de COD convertida em gás de aterro e, estimar a quantidade de carbono diferenciada, é confiar em um modelo teórico variável de acordo com a temperatura na zona anaeróbia de um aterro. (BRITO FILHO, 2005)

A fração de COD dissociada (COD_f) é estimada usando-se a equação:

$$COD_f = (0,014 \times T) + 0,28 \quad (9)$$

onde T é a temperatura na zona anaeróbia ($^{\circ}\text{C}$).

O COD_f indica a fração de carbono que é disponível à decomposição bioquímica, sendo o restante assimilado no material celular dos microrganismos durante a degradação da matéria orgânica. Assume-se que a temperatura na zona anaeróbia de um local de disposição de resíduos sólidos é de 35°C .

MODELO 4 – *Inventário USEPA (1997)*

O modelo sugerido pela USEPA (1997), “Inventário USEPA”, é considerado um modelo simples se comparado com o modelo anterior, pois não leva em consideração a forma de disposição para avaliar a produção de biogás a partir do resíduo depositado. Um dos parâmetros considerados é o volume de biogás gerado por 1 kg de resíduo depositado, que é um valor fixo já inserido na fórmula. (MENDES, 2007)

Como no Inventário IPCC, a quantidade de resíduo produzido *per capita*, é considerada para se efetuar o cálculo, assim como a porcentagem de resíduo que é coletado e disposto. A equação utilizada no modelo é dada por:

$$Q = \text{População} \times \text{TaxaRSD} \times \text{RSD}_f \times 0,45 \times F \quad (10)$$

onde: Q = metano gerado (m^3/ano); População = número de pessoas atendidas pelo aterro (habitantes); TaxaRSD = taxa de resíduo sólido produzido por habitante por ano ($\text{kg RSD/habitante.ano}$); RSD_f = taxa de resíduos coletados e dispostos no aterro (%), 0,45 = volume de biogás gerado por 1 kg de resíduo sólido (m^3 biogás/kg resíduo); F = fração de metano no biogás (%).

Todos os parâmetros deste modelo são variáveis de local para local, sendo dependente de fatores como o tamanho da cidade e o índice de coleta e disposição final dada ao resíduo.

3.7.3 Modelos Cinéticos

Os modelos cinéticos são semelhantes no que diz respeito à estrutura adotada para se efetuar os cálculos. As duas principais variáveis utilizadas aparecem nos três modelos com a mesma importância, assim o desenvolvimento da análise da estimativa também se assemelha muito entre eles. Brito Filho (2005) sugere que estes modelos são os mais aceitos para as estimativas da produção de biogás em um aterro, pois levam em conta muitos aspectos desconsiderados em outros modelos.

MODELO 5 – “*Método de Projeto*” e “*Método de Decaimento de Primeira Ordem*” (USEPA, 1997; IPCC, 1996)

As diferentes aplicações deste modelo constituem dois métodos, sendo um mais apropriado para aterros em fase de projeto, quando se utilizam parâmetros pobres relacionados ao conhecimento do fluxo anual de resíduos que será repassado, e outro, que considera o fluxo preciso de resíduos que é gerado e depositado no aterro, sendo o mesmo, mais próximo da realidade. Os modelos foram desenvolvidos pela USEPA (1997) e pelo IPCC (1996), e são conhecidos como Método de Projeto e Método de Decaimento de 1ª Ordem.

Ambos os modelos possuem dois parâmetros principais: a constante de decaimento (k) e o potencial de geração de biogás a partir do resíduo (L_0), sendo estes controlados por fatores como temperatura, pH, composição do lixo, dentre outros. A constante k está relacionada ao tempo necessário para a fração de carbono orgânico degradável decair à metade de sua massa inicial, conforme indicado na Equação (11).

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad (11)$$

$t_{1/2}$ = tempo para fração de COD decair pela metade em massa (anos)

- Método de Projeto

Este método é utilizado para estimar emissões incontroladas de vários compostos presentes no biogás, as quais são estimadas utilizando-se um modelo cinético de 1ª ordem de produção de biogás. Tal modelo assume duas formas conforme a fase de operação do aterro: fase aberta, na qual ocorre disposição de resíduo, e fase fechada, quando não mais resíduo é

disposto no aterro. A diferença entre essas etapas está no termo (e^{-kc}) que, enquanto o aterro permanece aberto (1ª etapa) é igual a 1, e, após o seu fechamento (2ª etapa) considera-se esse termo na cinética de geração de gás, conforme pode-se observar nas Equações (12) e (13) apresentadas a seguir:

- durante a vida útil (1ª etapa):

$$Q = F \times L_0 \times R \times (1 - e^{-kt}) \quad (12)$$

- após o fechamento do aterro (2ª etapa):

$$Q = F \times L_0 \times R \times (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (13)$$

onde: Q = geração de biogás no ano (m^3/ano); F = fração de metano presente no biogás; L_0 = potencial de geração de metano a partir do resíduo (m^3/t de resíduo); R = média anual de deposição do lixo durante a vida útil do aterro (t/ano); k = constante de decaimento (ano^{-1}); t = tempo desde a abertura do aterro (anos); c = tempo desde o fechamento do aterro (anos)

- Método de Decaimento de 1ª Ordem

O Método de Decaimento de 1ª Ordem é o mais completo e o que mais se aproxima da realidade, uma vez que leva em consideração a emissão de metano em longos períodos de tempo, de acordo com os fatores que influenciam a taxa de geração desse gás. Ele também considera o metano gerado em anos posteriores a partir de uma quantidade de resíduo depositado em um determinado ano x. Como a cada ano é depositado novas quantidades de resíduos, o metano gerado em um determinado ano será estimado a partir da somatória da geração proveniente do resíduo depositado no ano T com aquelas oriundas dos resíduos depositados em anos anteriores.

A equação representativa deste método é:

$$Q_{T,x} = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(T-x)} \quad (14)$$

onde: $Q_{T,x}$ = quantidade de metano gerado no ano em vigência “T” pelos resíduos “ R_x ” (m^3/ano); k = constante de decaimento (ano^{-1}); R_x = quantidade de lixo depositado no ano x (t); L_0 = potencial de geração de metano do lixo (m^3/t de lixo); T = ano em vigência; x = ano de deposição do resíduo no aterro.

Sendo a quantidade de resíduo disposta anualmente (R_x) variável e dependente de fatores como a taxa de crescimento populacional, taxa específica de RSD (resíduos sólidos degradáveis) produzido anualmente por habitante e a porcentagem de resíduos que é coletada e disposta no aterro, estima-se a emissão de biogás gerado pelo resíduo que degrada anaerobicamente.

Para se obter as vazões de metano correspondentes às quantidades de resíduo depositado ano a ano, é feita uma estimativa global da somatória de vazões ($\Sigma Q_{T,x}$), conforme equação a seguir:

$$\Sigma Q_{T,x} = k \cdot F \cdot L_0 \cdot \Sigma R_x \cdot e^{-k(x-T)} \quad (15)$$

$$Q_T = \Sigma Q_{T,x}$$

(para: x = ano inicial até T)

Onde: Q_T = quantidade total de gás metano gerado (m^3 /ano)

Essa estimativa é feita ano a ano, assim, obtendo-se a emissão de metano no aterro durante toda sua vida útil e nos anos seguintes após o seu fechamento.

MODELO 6 – “*SCHOOL CANYON*”

O modelo School Canyon, que serve de base para o Modelo de Emissões de LFG (LandGEM) da USEPA, é um modelo matemático de cinética de primeira ordem, amplamente aceito, baseado na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo, conforme indicado pela seguinte equação:

$$Q_{(CH_4)_i} = k \cdot m_i \cdot L_0 \cdot e^{-k \cdot t_i} \quad (16)$$

onde: $Q_{(CH_4)_i}$ = quantidade de metano gerado no ano i a partir da seção i do resíduo (m^3 /ano); k = constante da geração de metano (ano^{-1}); m_i = massa de resíduo despejada no ano i (t); L_0 = potencial de geração de metano (m^3 /t de lixo); t_i = anos após o fechamento.

O modelo prediz a produção de biogás durante algum tempo como uma função da taxa específica de geração de biogás (k), do potencial de geração de metano (L_0) e dos registros

históricos de despejo de resíduos, e, das projeções do resíduo futuro a ser depositado no aterro.

A taxa específica de geração de metano (k) representa a taxa de decomposição biológica de 1ª ordem com a qual metano é gerado simultaneamente depois da deposição do resíduo, sendo influenciada pelo teor de umidade, pela disponibilidade de nutrientes, pelo pH e pela temperatura. Valores típicos de k variam de 0,02 para aterros secos a 0,07 para aterros molhados.

O potencial de geração de metano (L_0) representa a produção total de metano (m^3 de metano por tonelada de resíduo). O valor de L_0 é dependente da composição do resíduo e da fração de matéria orgânica presente, sendo estimado com base no conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e em um fator de conversão estequiométrica. A maior compactação do resíduo não tem efeito direto no parâmetro L_0 , mas a compactação e a densidade do lixo tem efeito direto na massa de resíduo em um determinado volume. Portanto, influencia no potencial de geração de biogás, bem como nas características de desempenho dos sistemas que serão necessários para coletar o biogás.

Convém ressaltar que a designação pré-estabelecida para L_0 reconhece que há uma mistura de resíduos orgânicos que podem ser decompostos e de resíduos inorgânicos sendo depositados em um aterro típico. Se houver dados adequados em relação à quantidade e tipos de resíduos, pode ser possível refinar a modelagem, sendo necessário tornar a avaliação de geração de biogás global como uma soma das curvas geradas para os vários tipos de resíduos.

3.7.4 *Modelo Químico*

Este modelo baseia-se na equação química da decomposição do resíduo para chegar à massa total de metano produzido e assim vincular esse valor com sua densidade, e achar o volume total produzido de biogás a partir da material inicial.

MODELO 7 – *Modelo de Tchobanoglous, Thessen & Vigil (1994)*

O modelo desenvolvido por Tchobanoglous, Thessen & Vigil determina a geração de biogás baseado na composição do resíduo e na constituição química de cada um dos seus elementos, levando a uma classificação dos compostos em lentamente biodegradáveis (até 50 anos ou mais) e rapidamente biodegradáveis (de 3 meses a 5 anos), sendo essa biodegradabilidade interferente na geração. Na Tabela 6 estão demonstrados os constituintes

orgânicos rapidamente e lentamente biodegradáveis nos resíduos. A biodegradabilidade dos resíduos também está intimamente relacionada com a quantidade de lignina presente na sua composição. É possível então determinar a sua biodegradabilidade, conforme indicado na Tabela 7.

Tabela 6 – Constituintes orgânicos rapidamente e lentamente biodegradáveis no resíduo.

Componentes de resíduos orgânicos	Degradabilidade	
	Rápida	Lenta
Resíduos de comida	X	
Papel de Jornal	X	
Papelo de Escritório	X	
Papelão	X	
Plástico ^a		X
Têxteis		X
Borrachas		X
Couro		X
Resíduos de Jardim	X ^b	X ^c
Madeira		X
Orgânicos Variados		X

Fonte: Tchobanoglous et. al., 1994

^aOs plásticos geralmente são considerados como biodegradáveis.

^bFolhas e recortes de grama. Normalmente é de 60% dos resíduos de jardim são considerados como rapidamente biodegradáveis.

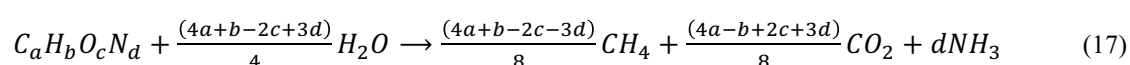
^cPorções lenhosas de resíduos de jardim.

Tabela 7 – Biodegradabilidade dos constituintes orgânicos nos resíduos

Componentes de Resíduos Orgânicos	Conteúdo de Lignina (%SV)	Fração Biodegradável (%SV)
Resíduos de Comida	0,4	0,82
Papel de Jornal	21,9	0,22
Papel de Escritório	0,4	0,82
Papelão	12,9	0,47
Resíduos de Jardim	4,1	0,72

Fonte: Tchobanoglous et. al., 1994

A conversão total dos resíduos em CH₄ e CO₂ é representada pela seguinte equação:



Os parâmetros “a”, “b”, “c” e “d” são estimados pela constituição típica (Tabela 7) e pela relação molar dos elementos químicos divididos pelo mol de nitrogênio (Tabela 8) que

configuram diversos componentes do resíduo depositado. O equacionamento deve ser feito de maneira separada, levando em consideração a velocidade de consumo dos componentes.

Tabela 8 – Porcentagem em massa dos elementos químicos dos resíduos orgânicos decompostos

Componentes	Peso Seco (kg)	Composição				
		C	H	O	N	Cinzas
Constituintes orgânicos rapidamente decompostos						
Resíduos de alimentos	2,7	1,3	0,17	1,02	0,07	0,14
Papel	32,0	13,92	1,92	14,08	0,10	1,92
Papelão	5,7	2,51	0,34	2,54	0,02	0,29
Resíduos de Jardim	4,4	2,1	0,26	1,67	0,15	0,20
Total	44,80	19,83	2,69	19,31	0,34	2,55
Constituintes orgânicos lentamente decompostos						
Texteis	1,8	0,99	0,12	0,56	0,08	0,05
Borrachas	0,5	0,39	0,05	-	0,01	0,05
Couro	0,4	0,24	0,03	0,05	0,04	0,04
Resíduos de Jardim	3,0	1,43	0,18	1,14	0,10	0,13
Madeira	1,6	0,79	0,10	0,69	-	0,02
Total	7,3	3,84	0,48	2,44	0,23	0,29

Fonte: Tchobanoglous et. al., 1994

Tabela 9 – Relação molar dos componentes

Componentes	Relação Mol (Nitrogênio = 1)	
	Rapidamente decompostos	Lentamente decompostos
Carbono	68,5	19,5
Hidrogênio	110,5	29,0
Oxigênio	50,1	9,2
Nitrogênio	1,0	1,0

Fonte: Tchobanoglous et. al., 1994

A partir do conhecimento da relação molar, utilizam-se as equações de decomposição para estimar a massa de CH_4 e CO_2 . Feito isso, e sabendo a densidade de cada gás, é possível determinar o volume de gás gerado, obtendo-se assim, as quantidades volumétricas de cada gás para as massas de resíduos rapidamente e lentamente degradáveis determinadas inicialmente.

Segundo Tchobanoglous et. al. (1994), as taxas anuais de decomposição dos materiais depositados no aterro, incluindo os rapidamente e os lentamente decompostos, se baseiam em um modelo triangular de produção de gás, em que a taxa pontual de produção é produzida em um ano para os rapidamente decompostos e em cinco anos para os lentamente decompostos,

após o início da produção. Supõe-se que a produção de gás se inicia ao final do primeiro ano da área de funcionamento do aterro. O volume total de gás produzido através dos resíduos depositados no primeiro ano é igual a área abaixo do triângulo do gráfico apresentado na Figura 3.

$$Total\ de\ gás\ produzido\ \left(\frac{kg}{m^3}\right) = \frac{1}{2} base\ (ano) \cdot altura\ \left(taxa\ pontual\ de\ produção\ de\ gás,\ \frac{kg}{m^3 \cdot ano}\right)$$

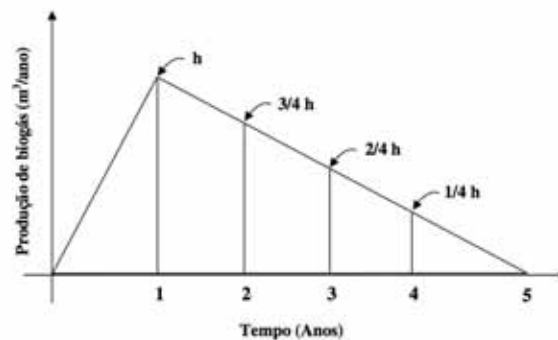


Figura 3 – Modelo triangular de produção de biogás para resíduos rapidamente biodegradáveis (Fonte: Tchobanoglous et. al., 1994)

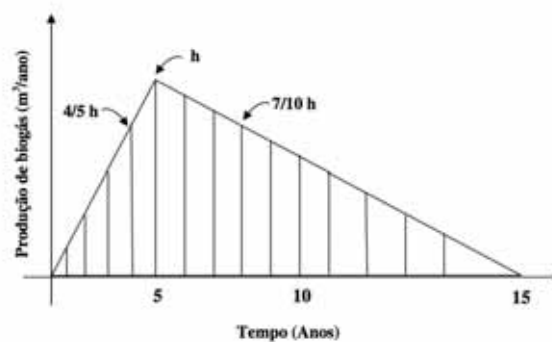


Figura 4 - Modelo triangular de produção de biogás para resíduos lentamente biodegradáveis (Fonte: Tchobanoglous et. al., 1994)

Utilizando-se um modelo triangular de produção de gás, a taxa total de produção de gás em aterro, em que se depositam resíduos por um determinado tempo “t”, é obtida graficamente, somando o que é produzido pelas porções de RSU, rapidamente e lentamente biodegradáveis, depositadas a cada ano.

3.7.5 Modelos desenvolvidos para regiões específicas

O desenvolvimento desses modelos baseia-se em padrões específicos de algumas regiões, sendo empregados somente em situações, nas quais as características climáticas e composição do resíduo se igualam.

MODELO 8 – *MODELO OONK & BOOM (1995)*

Oonk & Boom (1995) apresentam modelos de estimação da produção de biogás em diversos aterros da Alemanha a partir de estimativas dos parâmetros z , k_1 e k_2 presentes nas equações constantes na Tabela 10.

Ao estimarem tais parâmetros para os aterros da Alemanha, adotaram dados de quantidade, idade e composição do lixo disponibilizado pelos operadores dos aterros, além da produção de biogás nos projetos implantados nos locais. As eficiências de coleta dos sistemas de aproveitamento do biogás foram adotadas, baseando-se em experiências que consideram fatores como: o projeto do aterro e do sistema de drenagem, a profundidade da camada de lixo, a inclinação dos taludes e o material de cobertura.

Tabela 10 – Tipos de modelos e suas respectivas equações

Tipos de Modelos	Equações
Ordem zero	$\alpha_t = \zeta \cdot 1,87 \cdot k_0 \cdot A \quad (18)$
Primeira ordem	$\alpha_t = \zeta \cdot 1,87 \cdot C_0 \cdot A \cdot k_1 \cdot e^{-k_1 \cdot t} \quad (19)$
Multi-fase	$\alpha_t = \zeta \cdot \sum_{j=1}^3 1,87 \cdot A \cdot C_{0,i} \cdot k_{1,i} \cdot e^{-k_{1,i} \cdot t} \quad (20)$
Segunda ordem	$\alpha_t = \zeta \cdot 1,87 \cdot k_2 \cdot A \cdot \left(\frac{C_0}{k_2 \cdot C_{0(t+1)}} \right)^2 \quad (21)$

onde: α_t = produção de gás (m^3 /ano); ζ = fator de geração que indica a fração do lixo que é convertida em biogás; k_n = constantes cinéticas do modelo; A = quantidade de lixo

depositada no local (kg); C_0 = quantidade de carbono orgânico degradável no lixo (kg de C/kg de lixo); $C_{0,i}$ = quantidade de carbono nas frações de degradação rápida, moderada e lenta (kg de C/kg de lixo); t = tempo desde a deposição do lixo (anos); 1,87 = volume de biogás gerado por massa de lixo (m^3/kg).

Segundo os Oonk & Boom (1995), um aterro projetado com drenos de biogás verticais ou horizontais, possuindo espaçamento inferior a 70 metros entre eles e a camada de cobertura de solo argiloso ou manta sintética impermeável, apresenta uma eficiência de coleta de aproximadamente 55%, de acordo com as recomendações a seguir:

- Presença de camada sintética impermeável na cobertura proporciona uma eficiência de coleta de 60 a 95%, dependendo da possibilidade de migração do biogás pelo solo;
- Presença de solo argiloso na cobertura proporciona eficiência de coleta de 60 a 75%, dependendo da espessura da camada, da idade do aterro e da possibilidade de migração do biogás;
- Distância entre os drenos maiores que 100 metros reduzem de 5 a 10% a eficiência do sistema de coleta;
- Taludes com mais de 40° de inclinação reduzem de 5 a 10% a eficiência do sistema de coleta;
- Camada de lixo maior que 20 metros aumentam a eficiência de 5 a 10%;
- Espessura da camada de lixo menor que 10 metros reduzem a eficiência em 5%.

Ao aplicarem os modelos em diversos aterros na Holanda, compararam os resultados teóricos com medições de emissões de biogás na superfície dos aterros, obtendo melhores resultados com erros relativos menores que 30%. Os desvios observados nas comparações foram atribuídos às incertezas nas quantidades de lixo e nas eficiências de coleta adotadas.

Na Tabela 11 estão apresentadas as estimativas dos parâmetros das Equações 17 a 20 obtidas a partir de dados de aterros da Alemanha. Tais parâmetros são específicos para aterros alemães ou que possuam composição do resíduo e clima regional semelhante aos estudados.

Tabela 11 – Parâmetros estimados para os modelos de geração de biogás em aterros propostos por Oonk & Boom.

Tipos de Modelos	Parâmetros
Ordem zero	$\zeta k_0 = 2,4 \text{ kg/t} \cdot \text{ano}$
Primeira ordem	$\zeta = 0,58$ $k_1 = 0,094/\text{ano}$
Multi-fase	$\zeta = 0,58$ $k_{1,1} = 0,185/\text{ano}$ $k_{1,2} = 0,100/\text{ano}$ $k_{1,3} = 0,030/\text{ano}$
Segunda ordem	$\zeta = 0,58$ $k_2 = 0,0012 \text{ t/kg} \cdot \text{ano}$

Fonte: Oonk & Boom, 1995.

MODELO 9 – EPER DA FRANÇA (BUDKA, 2003)

A estimativa da emissão de metano por tal modelo é feita por duas formas distintas de cálculo conforme a situação:

Forma de Cálculo 1 – Prognóstico de emissão do metano para células de aterro conectadas ao sistema de recuperação de biogás, através do uso de dados de recuperação de biogás fornecidos pelo operador do aterro.

O cálculo é feito a partir das seguintes equações:

$$A = F \times H \times [CH_4] \quad (22)$$

onde: A = quantidade recuperada de LFG (m³/ano); F = taxa de extração de LFG (m³/h); H= horas de operação anual do compressor (h); [CH₄] = concentração de metano no LFG (%).

Levando-se em conta a pressão e a temperatura ambiente no momento da amostragem de qualidade do gás, a quantidade recuperada de biogás (A) é corrigida para m³/ano (CNTP). A eficiência da recuperação do biogás é determinada pela área superficial das células conectadas ao sistema e o tipo de cobertura presente sobre aquela célula.

O modelo pode calcular a produção de metano na zona em operação que não tem camada de cobertura, por exemplo, e, sendo conectada a um sistema de recuperação de biogás irá apresentar uma eficiência de coleta de 35%. O restante do biogás (65%) será eventualmente emitido para atmosfera. A produção de metano para células conectadas ao sistema de recuperação de biogás pode ser estimada pela seguinte equação:

$$P = \frac{A}{\eta} \quad (23)$$

onde: P = produção de metano (m³/ano); η = eficiência de recuperação (%)

Forma de Cálculo 2 – Prognóstico de emissões de metano das células não conectadas ao sistema de recuperação de biogás por um modelo convencional multi-fase (ADEME versão 15/12/2002). O cálculo pode ser realizado usando-se a seguinte equação:

$$FE_{CH_4} = \sum_x FE_0 \times \left(\sum_{1,2,3} A_i \times p_i \times e^{-k_i t} \right) \quad (24)$$

onde: FE_{CH_4} = produção anual de metano (m³/ano) (CNTP); FE_0 = potencial de geração de LFG (m³ de CH₄/t de resíduos); p_i – fração de resíduos com taxa específica de degradação k_i (kg/kg de resíduo); k_i – taxa específica de degradação da fração i (ano⁻¹); t = idade do resíduo (ano); A_i = fator de normalização.

O modelo descreve três categorias de resíduo, mostradas na Tabela 12 sendo que cada uma delas tem uma formação específica de biogás com capacidade por tonelada de resíduo.

Tabela 12 – Categoria de resíduos de acordo com o modelo ADEME

Categoria I	Categoria II	Categoria III
Resíduo sólido municipal	Resíduo Industrial	Inertes
Lamas	Resíduo Comercial	Resíduos não degradáveis
Resíduos de jardim	Resíduo biológico pré-tratado	

Fonte: Joeri J. e Heijo S. (2001)

O modelo EPER assume um potencial de oxidação da camada de cobertura de 10%, sendo o total de emissão de metano calculado pela equação a seguir:

$$Emiss\tilde{a}o\ CH_4 = [P \times (1 - \eta) \times 0,9] + (FE_{CH_4} \times 0,9) \quad (25)$$

MODELO 10 – EPER DA ALEMANHA (WIELENGA, 2003)

O modelo EPER da Alemanha é classificado como modelo de ordem zero, representado por:

$$Me = M \times BDC \times BDC_f \times F \times D \times C \quad (26)$$

Onde: Me = quantidade de emissão difusa de metano (Mg/ano); M = quantidade anual de resíduo depositado (Mg); BDC = relação de carbono biodegradável convertido em biogás (Mg de C/Mg de resíduo); BDC_f = relação de carbono biodegradável convertido em biogás (%); F = fator de cálculo de conversão de carbono em CH₄; D = eficiência de coleta (ativo com perda de biogás – 0,4; não recuperado – 0,9; biogás ativo, recuperado e coberto – 0,1); C = [CH₄] (%).

4 METODOLOGIA

4.1 Determinação das variáveis para elaboração das simulações

Para realizar a análise dos modelos e suas simulações, adotou-se uma metodologia de criação de um cenário hipotético de uma cidade que seria atendida por um aterro, para a qual a estimativa da geração do biogás é feita por diferentes modelos matemáticos. A partir da criação desse cenário, é possível conhecer a quantidade de resíduo anual que o aterro irá receber, pois a população será pré-estabelecida. Adotando-se a geração de resíduos per capita determinada pela CETESB (Tabela 13), pode-se chegar à quantidade de resíduo depositado.

Construindo-se o cenário hipotético, adota-se uma cidade de médio (IBGE) porte com uma população inicial de 150.000 habitantes, tendo um crescimento populacional estimado em 1,5% ao ano. Portanto, a partir dos dados constantes da Tabela 13, adotou-se nas simulações o valor de 0,5 kg por habitante por dia para a taxa de geração de resíduos.

Tabela 13 – Geração média de resíduos por habitante por unidade de tempo

População por município	Taxa de geração de resíduos	
	(kg/habitante.dia)	(ton/habitante.ano)
até 100.000 habitantes	0,4	0,146
de 100.001 até 500.000 habitantes	0,5	0,183
de 500.001 até 1.000.000 habitantes	0,6	0,219
acima de 1.000.000 habitantes	0,7	0,256

Fonte: CETESB, 1992

Outro parâmetro importante estabelecido foi a vida útil do aterro, que, neste caso, foi de 20 anos. Os cálculos de geração de biogás foram feitos também por mais 20 anos após o fechamento do aterro. Na Tabela 14 estão listadas a quantidade de resíduo depositado anualmente no aterro durante sua vida útil, bem como a taxa média anual de deposição em função da estimativa do tamanho populacional e da taxa de geração de resíduos.

Considerando que os gases majoritariamente presentes na composição do biogás são o metano e o gás carbônico, a contribuição dos demais foram desprezadas durante os cálculos. Este é um dado importante para a estimativa da produção de biogás no aterro, pois é necessário ter o conhecimento do valor produzido de metano, sendo este gás o de maior interesse. Portanto, para a elaboração das simulações, o valor adotado para a composição do

biogás foi de 60% de metano e 40% de gás carbônico, sendo esta configuração a máxima produção de metano possível, determinada na Tabela 2.

Tabela 14 – Cálculo do resíduo depositado no aterro em sua vida útil

Ano	Habitantes	Quantidade de Resíduo (ton)	Ano	Habitantes	Quantidade de Resíduo (ton)
1	150000	27300	11	174081	31683
2	152250	27710	12	176692	32158
3	154534	28125	13	179343	32640
4	156852	28547	14	182033	33130
5	159205	28975	15	184763	33627
6	161593	29410	16	187535	34131
7	164016	29851	17	190348	34643
8	166477	30299	18	193203	35163
9	168974	30753	19	196101	35690
10	171508	31215	20	199043	36226

Valor total de resíduos depositados:	Média de resíduos depositados por ano:
631.276 toneladas	31.564 toneladas

Na Tabela 15 são apresentados os dados hipotéticos adotados para elaboração das simulações.

Tabela 15 – Valores característicos de alguns parâmetros adotados para a realização das simulações

Ano de abertura do aterro	1
Ano de fechamento do aterro	20 anos
Tempo que o aterro continua gerando biogás após seu fechamento	20 anos
População atendida pelo aterro na sua abertura	150.000 hab
Taxa de crescimento populacional	1,5 % ao ano
Taxa de geração de resíduo diária por habitante	0,5 kg hab/dia
Fração de Metano no Biogás (F)	0,60
Densidade do resíduo sólido urbano com boa compactação	0,70 ton/m ³

Os dados na Tabela 15 forneceram alguns dos parâmetros que foram utilizados nas equações que estimam a geração de biogás. Entretanto, todos os modelos apresentam parâmetros que, em sua maioria, estão vinculadas a outros aspectos que não constam na Tabela 15 tais como o clima da região onde o aterro está localizado, a composição geral do resíduo e a quantidade de matéria orgânica presente no mesmo, que está diretamente ligada ao grau de degradação do resíduo depositado.

Os dois principais parâmetros alterados por essas condições são a constante cinética de decaimento (k) e o potencial de geração de biogás a partir do resíduo (L_0), porém, as variações das mesmas são tabeladas de acordo com as condições. A constante de decaimento está vinculada, principalmente, ao teor de umidade da região, sendo então, o clima, um fator influente no seu valor. Outros fatores que podem interferir nos valores de k são o pH e a disponibilidade de nutrientes no substrato.

Os valores da constante de decaimento são elevadas em condições de clima mais úmido, havendo uma variação entre $0,003 \text{ ano}^{-1}$ a $0,4 \text{ ano}^{-1}$, conforme os dados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores de k em função da umidade local do aterro

Variável	Variação	Valores sugeridos		
		Úmido	Umidade média	Seco
$k \text{ (ano}^{-1}\text{)}$	0,003 - 0,4	0,10 - 0,35	0,05 - 0,15	0,02 - 0,10

Fonte: USEPA (1996)

Levando-se em consideração níveis de precipitação pré-estabelecidos, e vinculando-os ao grau de degradabilidade do resíduo depositado, o Banco Mundial (2003), estabeleceu valores mais específicos para a constante, como apresentado na Tabela 17.

Tabela 17 – Valores da constante de decaimento para diferentes valores de precipitação e graus de degradabilidade do resíduo

Precipitação anual (mm)	Valores de $k \text{ (ano}^{-1}\text{)}$		
	Degradabilidade do Resíduo		
	Inerte	Moderada	Alta
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
>250mm a <500mm	0,01	0,03	0,05
>500mm a <1000mm	0,02	0,05	0,08
> 1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: Banco Mundial (2003)

O potencial de geração de biogás (L_0) está associado com a composição química do resíduo a ser degradado no aterro. Quanto maior for o teor de matéria orgânica presente na massa total de resíduo, maior será o valor do parâmetro L_0 . As faixas de valores do potencial de geração são determinadas, portanto, pela degradabilidade do resíduo que está diretamente relacionada com a quantidade de carbono na massa total.

O valor de L_0 está compreendido entre 5 m³/tonelada de RSU e 300 m³/tonelada de RSU, conforme o grau de degradabilidade do resíduo como apresentado na Tabela 18.

Tabela 18 – Valores do potencial de geração do metano com relação a sua degradabilidade

Categoria do Resíduo	Valor mínimo para L_0 (m³/t)	Valor máximo para L_0 (m³/t)
Resíduo Relativamente Inerte	5	25
Resíduo Moderadamente Degradável	140	200
Resíduo Altamente Degradável	225	300

Fonte: USEPA (1996)

Em alguns modelos o potencial de geração de biogás não foi adotado usando-se os dados da Tabela 18, pois possuem maneiras próprias de se chegar ao valor de L_0 sempre levando em consideração a composição do resíduo e sua constituição química. Nestes casos a forma de se chegar ao L_0 é apresentada na ocasião em que a simulação é realizada.

5 RESULTADOS

A partir dos dados apresentados anteriormente, foram feitas as simulações da geração de biogás no aterro para diferentes cenários. Os valores adotados para os parâmetros são as médias daqueles sugeridos nas Tabelas 16 e 18 para a constante de decaimento e o potencial de geração de biogás para os modelos nos quais esses parâmetros aparecem. Os demais valores estão citados nas Tabelas 15 e 17, para os casos em que eles são necessários.

5.1 Modelos Simplificados

Modelo de Laquidara et al. (1986)

Foram simulados os perfis de consumo do resíduo no aterro em 40 anos para diferentes valores de precipitação na região (diferentes valores da constante de decaimento) e diferentes níveis de degradabilidade do resíduo. Nas Figuras 3 a 5 estão apresentados estes perfis para diferentes casos.

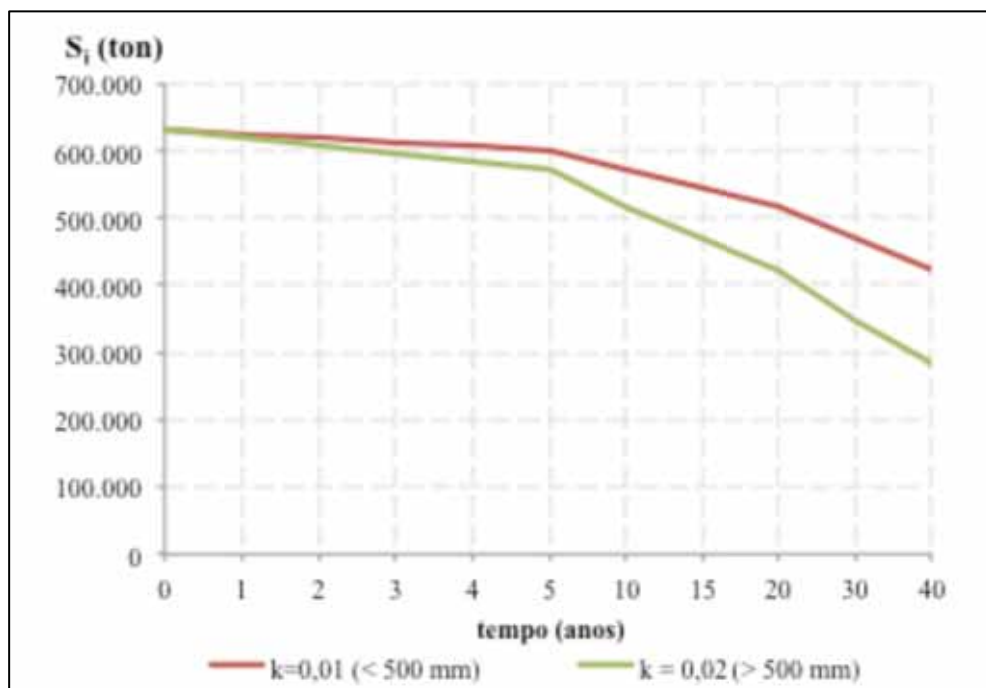


Figura 5 – Perfis de consumo para resíduo relativamente inerte e diferentes valores de k em função da precipitação

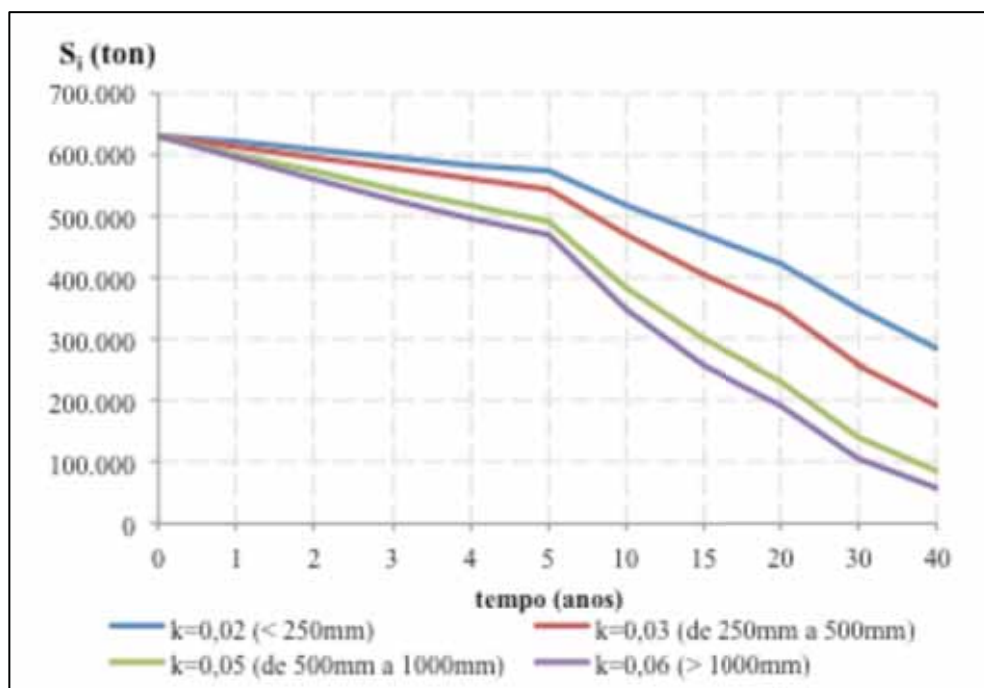


Figura 6 – Perfis de consumo para resíduo de decomposição moderada e diferentes valores de k em função da precipitação

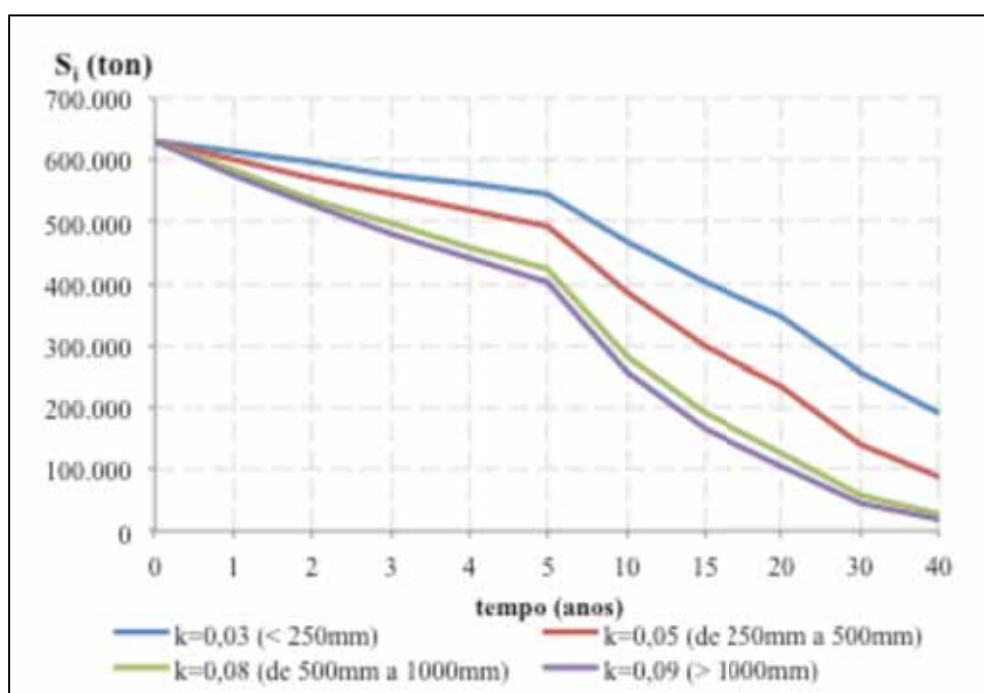


Figura 7 – Perfis de consumo para resíduo de decomposição alta e diferentes valores de k em função da precipitação

Atingidos os valores finais da quantidade remanescente de resíduo no aterro, foram calculados os valores finais de volume de metano produzido, levando-se em consideração os

diferentes graus de biodegradabilidade do resíduo e os diferentes níveis de precipitação (Figura 8).

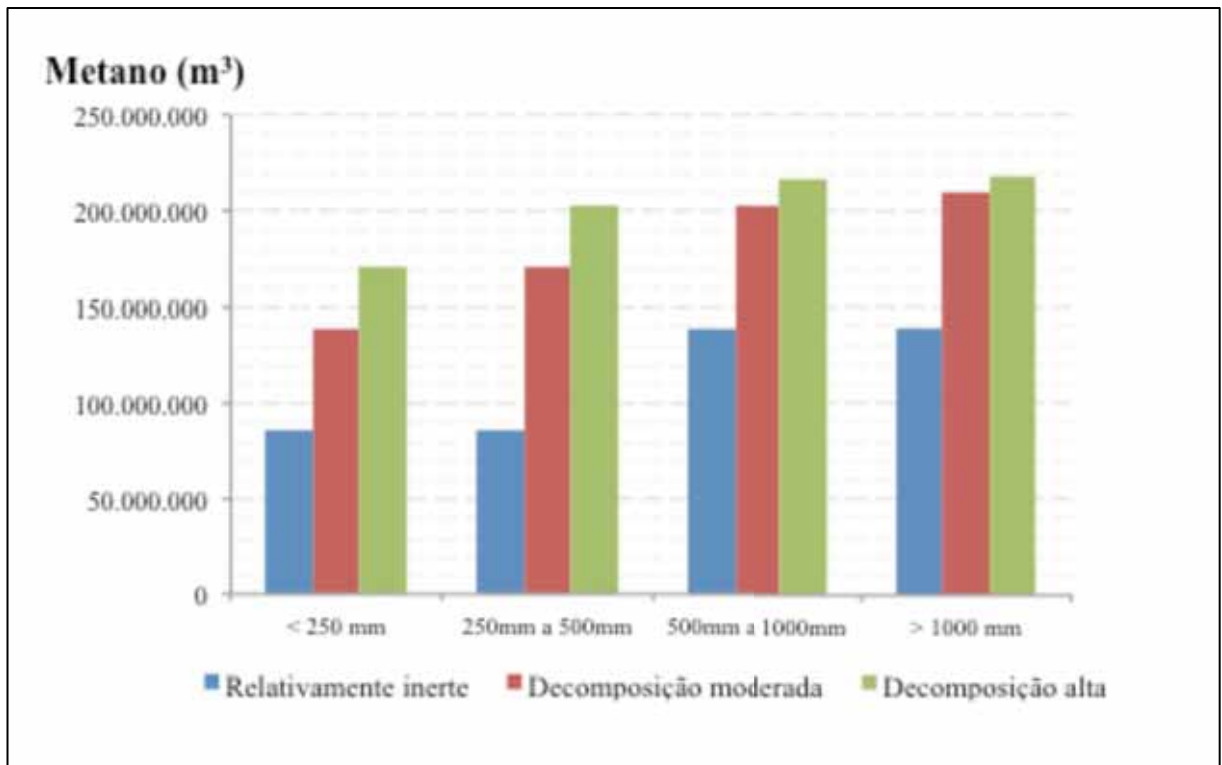


Figura 8 – Metano gerado para os diferentes níveis de precipitação e grau de biodegradabilidade do resíduo

Conforme se observa na Figura 8, a produção de metano aumenta de acordo com a elevação da precipitação na região onde o aterro se encontra, bem como o grau de degradabilidade do resíduo depositado.

Nota-se que há valores finais que se igualam em faixas de precipitação diferentes, isto ocorre porque o grau de degradabilidade do resíduo também influencia na produção final. Quando o aterro se encontra em uma região em que a umidade é maior, se o resíduo possuir como característica uma degradabilidade baixa, este produzirá biogás no mesmo fator que um resíduo de degradabilidade alta em um aterro que se encontra em uma região mais seca, sendo um exemplo as faixas de produção de biogás através dos resíduos de degradabilidade moderada com precipitação entre 250 mm e 500 mm e os resíduos de degradabilidade alta com precipitação inferiores a 250 mm.

“Aproximação simples” (US EPA, 1996)

Para efetuar a estimativa de biogás gerado no aterro usando-se esse modelo é necessário conhecer apenas dois parâmetros, sendo um deles a quantidade de lixo depositado anualmente. O outro é a taxa de geração de metano por quilograma de resíduo depositado, que se encontra pré-estabelecido, conforme dados apresentados na Tabela 3. Foram efetuadas simulações para os três diferentes valores do potencial de geração de metano a partir do resíduo, obtendo-se os perfis de volume total a cada ano de biogás por resíduo depositado apresentados na Figura 9. Verifica-se que, no decorrer do tempo, o volume produzido de biogás aumenta, mediante o aumento da geração de resíduo e assim também aumenta-se o volume depositado no aterro.

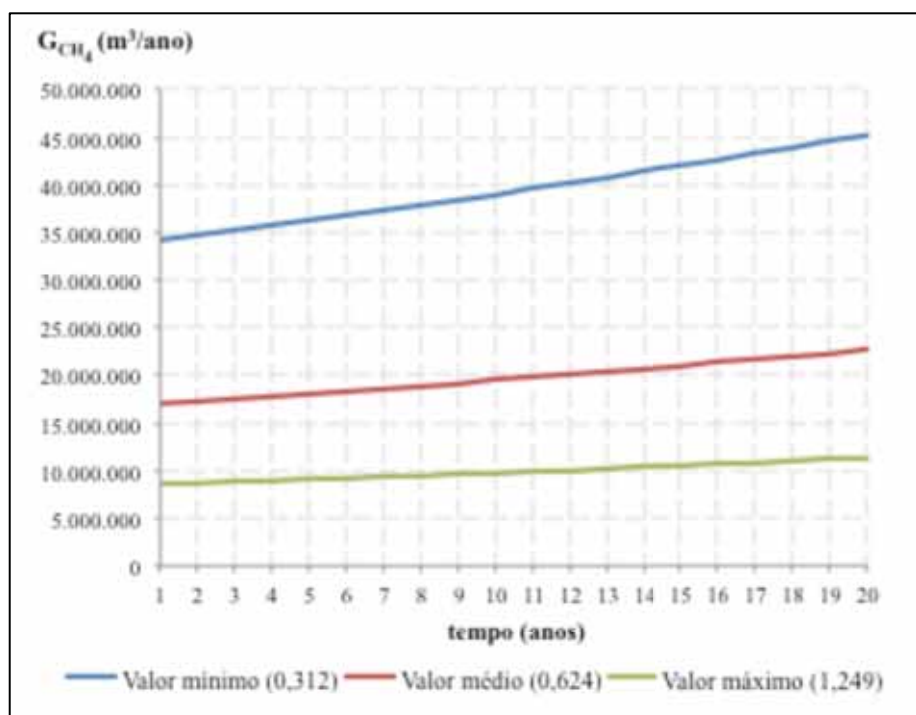


Figura 9 – Metano gerado anualmente para diferentes valores do potencial de geração por massa de resíduo depositado

O gráfico demonstrado na Figura 10 caracteriza a produção total do resíduo disposto no aterro, ou seja, demonstra a produção de metano através de todo o resíduo disposto no período de 20 anos que é o tempo de vida útil do aterro. Como demonstrado a produção total de biogás é intimamente relacionada com a taxa de geração de metano por massa de resíduo depositado, que é influenciada pelas condições de contorno do aterro onde é efetuado a disposição.

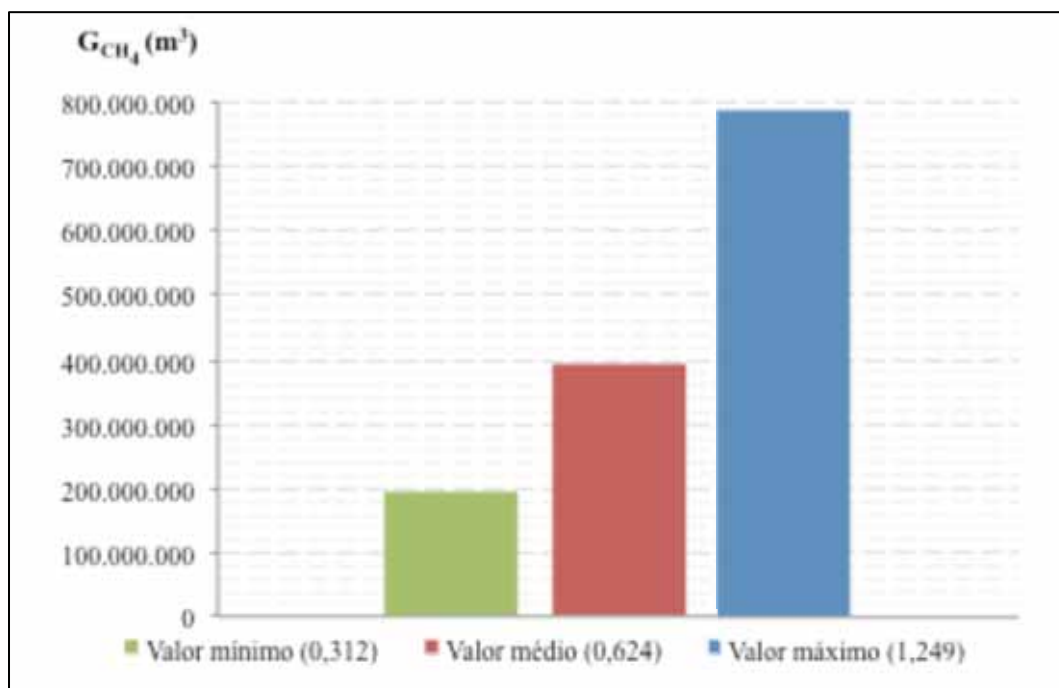


Figura 10 – Metano total gerado por todo resíduo disposto para diferentes valores do potencial de geração por massa de resíduo depositado

5.2 Modelos de Inventário

“Inventário IPCC” (IPCC, 1996)

Este modelo relaciona vários fatores na estimativa da geração de biogás, como a composição do resíduo, a quantidade anual de resíduo gerado e depositado, a forma de disposição final, entre outros. Cada um desses fatores contribui para aumentar ou diminuir a geração de biogás, dependendo do nível de interferência no processo de degradação.

Para iniciar a estimativa é necessário determinar alguns parâmetros específicos desse modelo. A fração de resíduos sólidos domésticos depositada em locais de disposição adequada será estabelecida a partir do documento *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (2011)*, sendo este valor igual 58,1 % e correspondente ao percentual de todo o resíduo coletado no estado de São Paulo disposto em locais adequados.

Um segundo parâmetro a ser definido é a quantidade de carbono orgânico degradável na massa total de resíduo (COD), que está relacionada à sua composição, ou seja, com a divisão da quantidade de cada componente do resíduo. Esta composição está também determinada no documento *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil* e apresentada na Tabela

19. O COD é um parâmetro utilizado na determinação do potencial de geração de biogás a partir do resíduo.

Tabela 19 – Porcentagem de cada componente no RSD

Resíduos de parques e jardins, Restos de Alimentos e Madeira	51,4
Outros	35,5
Papel e papelão	13,1

Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (2011)

Determinados todos os parâmetros do modelo, é possível realizar a estimativa da geração de biogás pela simulação do modelo. No caso, tal estimativa está vinculada a três tipos diferentes de disposição final do resíduo, podendo-se assim comparar a eficiência de degradação de acordo com o local escolhido para disposição do resíduo. As estimativas foram realizadas considerando-se o tempo de vida útil de um aterro sanitário constante na Tabela 15, obtendo-se os perfis apresentados na Figura 11.

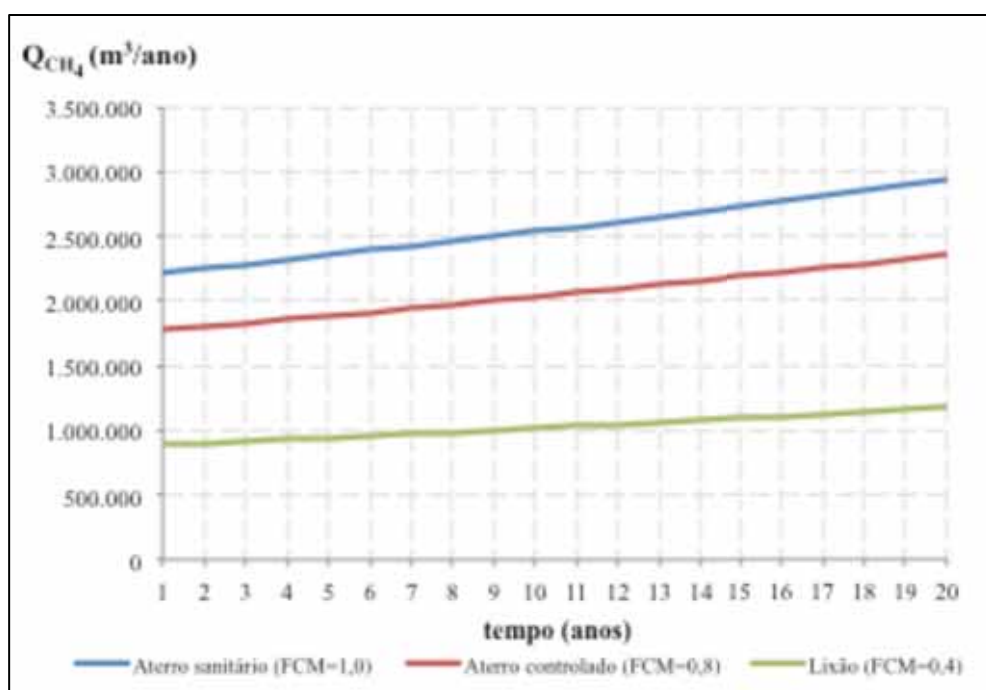


Figura 11 – Metano gerado pela quantidade de resíduo disposto em cada ano para diferentes modos de disposição final do resíduo

A Figura 12 demonstra o total de biogás gerado por todo resíduo depositado durante 20 anos em cada modo de disposição final.

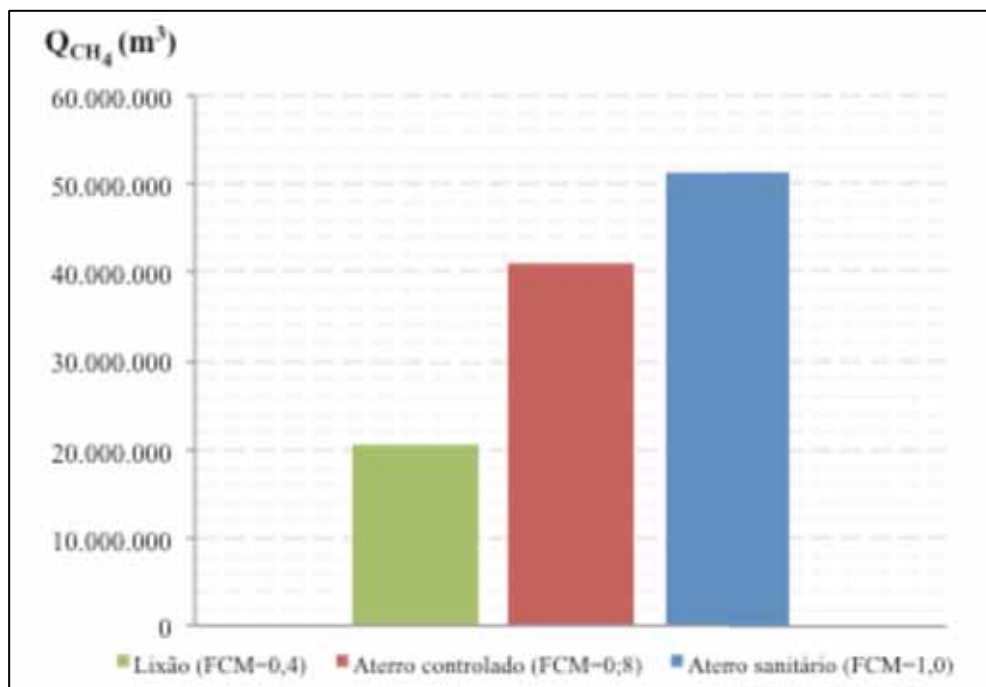


Figura 12 – Metano total gerado para diferentes modos de disposição final do resíduo

A partir da Figura 12, observa-se que a diferença de geração de biogás num aterro sanitário e num lixão é mais do que o dobro. Esta diferença entre geração que se evidencia através da forma que é disposto o resíduo, pode ser caracterizada como uma perda de eficiência na capacidade de manter o biogás confinado, emissão fugitiva, isto porque a única técnica de disposição que se utiliza de impermeabilização da área aterrada é o aterro sanitário.

“Inventário USEPA” (USEPA, 1997)

Caso se fizesse uma comparação entre o modelo anterior e este atual, poderia se chegar a conclusão que o presente modelo é muito pobre em disponibilizar informações confiáveis a respeito da geração de biogás no aterro pois não considera variação nenhuma com relação à constituição e ao local de disposição do resíduo, sendo considerado todo depositado em aterro sanitário. Apenas estabelece a relação entre a quantidade de resíduo depositado no aterro anualmente e o volume de biogás gerado por kg de resíduo sólido.

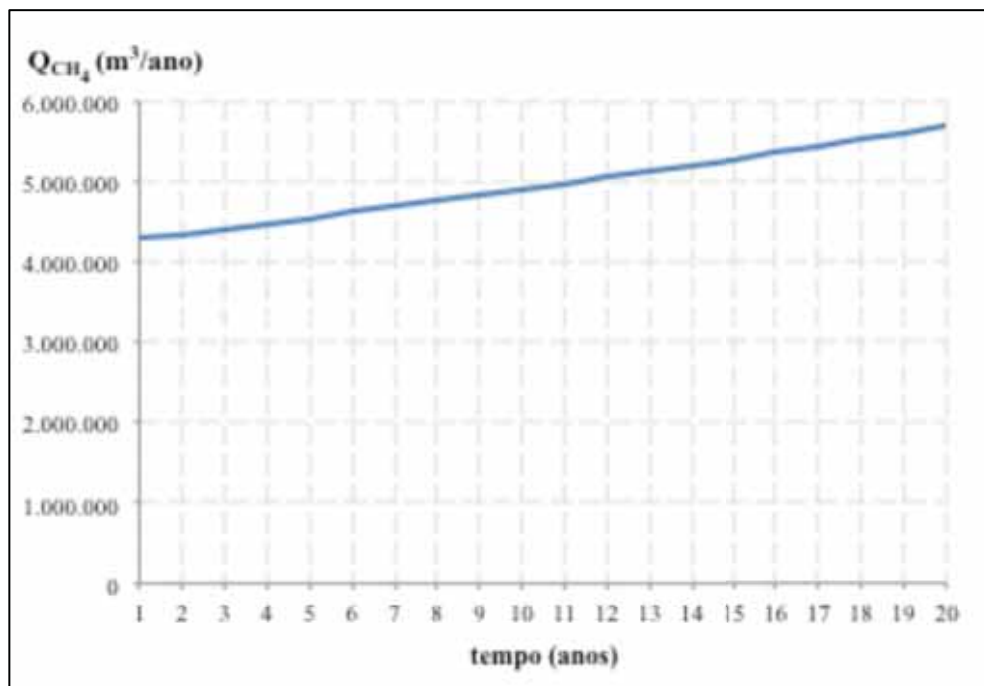


Figura 13 – Metano gerado no decorrer do tempo segundo o Modelo *Inventário USEPA*

A partir da simulação deste modelo chegamos a um valor de geração total de biogás de aproximadamente $100 \times 10^6 \text{ m}^3$ por todo resíduo depositado no aterro sanitário.

5.3 Modelos Cinéticos

“Método de Projeto” e “Método de Decaimento de Primeira Ordem” (USEPA, 1997; IPCC, 1996)

Em todas as estimativas foram levadas em consideração três níveis de umidade (úmido, umidade média e seco) para analisar o comportamento da geração de biogás nessas condições. Também foram analisados três graus de degradabilidade do resíduo: resíduo relativamente inerte, moderadamente e altamente degradável.

- Método de projeto

O método de projeto é dividido em duas etapas, antes e após o fechamento do aterro, o qual possui uma vida útil de 20 anos, ou seja, receberá resíduo por este período e após será fechado. Analisando-se os gráficos de geração de biogás apresentados nas Figuras 14 a 16, fica nítida a mudança de comportamento do modelo quanto à fase aberta e fechada do aterro.

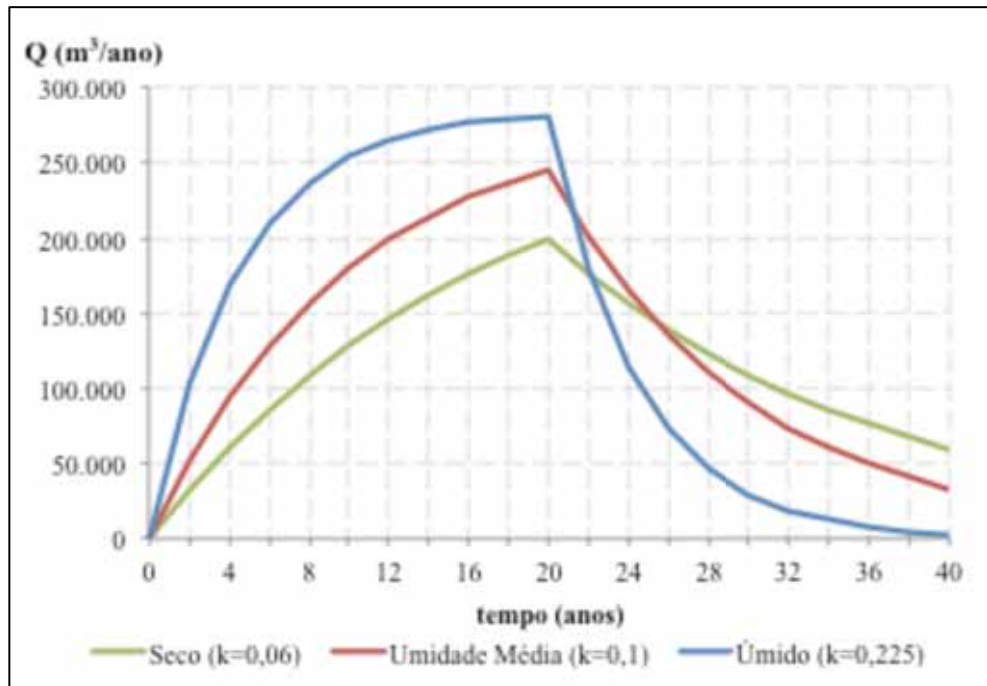


Figura 14 – Perfis de geração de gás para resíduo relativamente inerte ($L_0=15 \text{ m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes condições de umidade - Método de Projeto

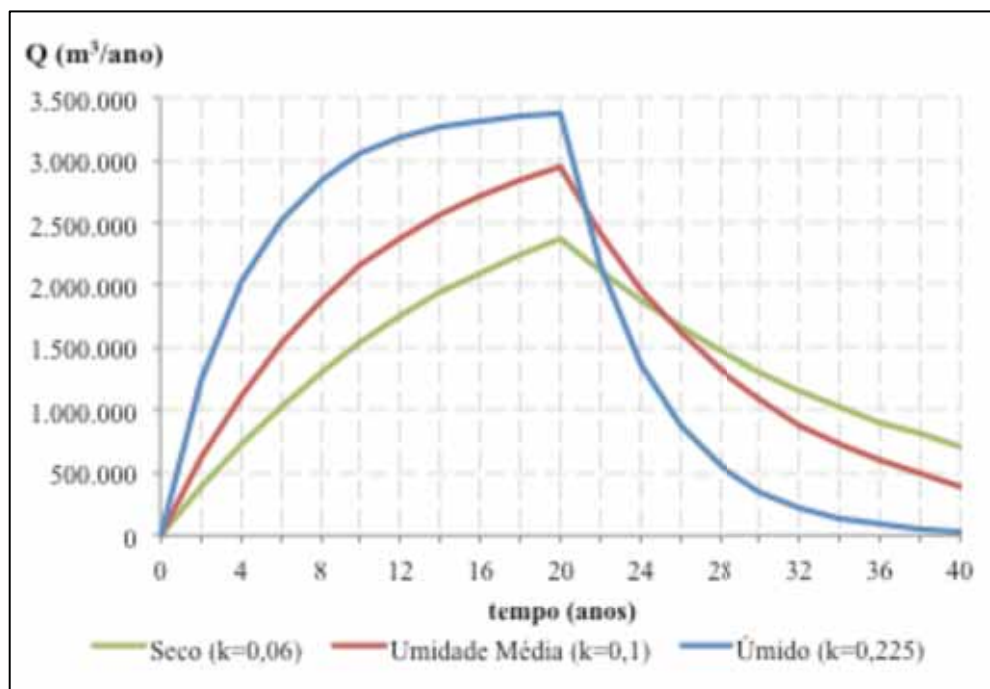


Figura 15 – Perfis de geração de gás para resíduo moderadamente degradável ($L_0=170 \text{ m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes condições de umidade - Método de Projeto

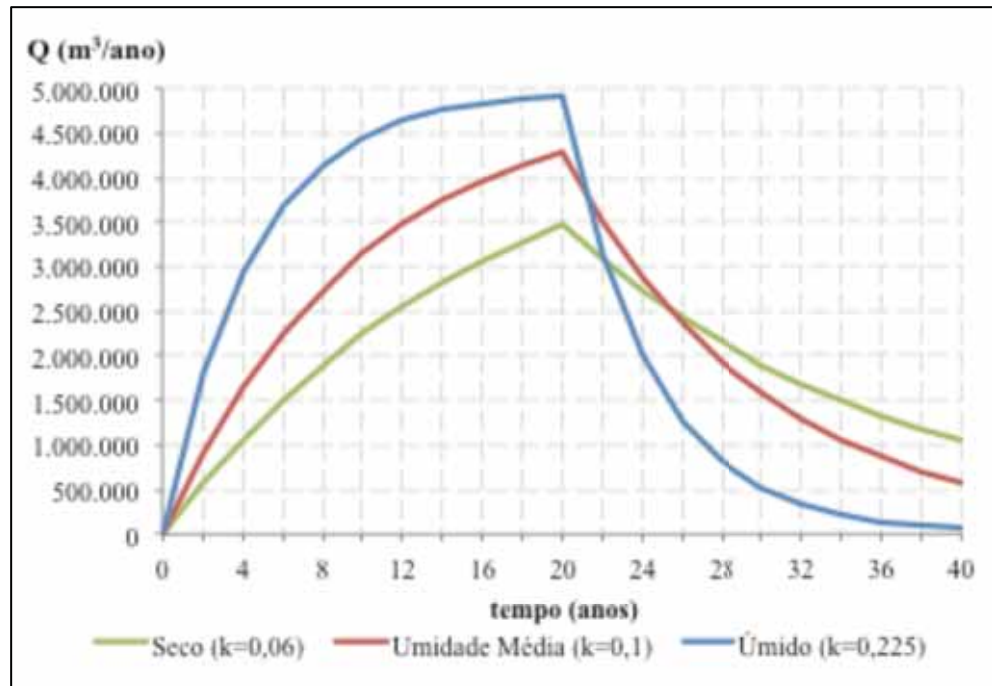


Figura 16 – Perfis de geração de gás para resíduo altamente degradável ($L_0=262,5$ m³/tonelada RSD) e diferentes condições de umidade - Método de Projeto

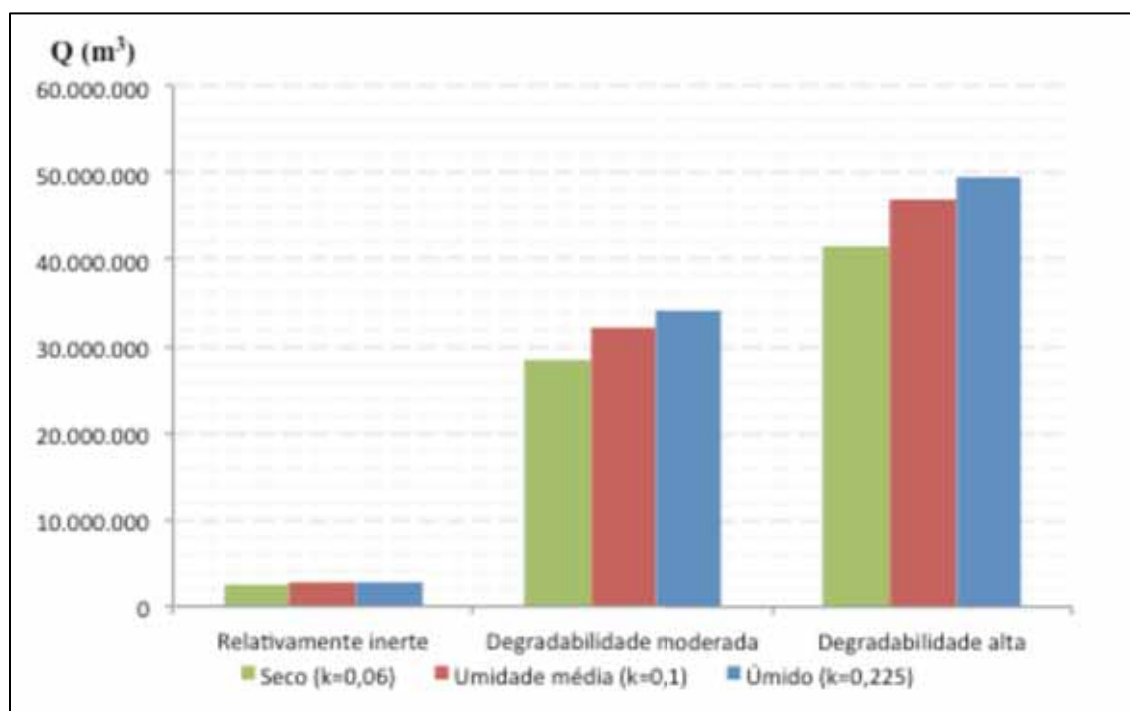


Figura 17 – Geração de metano para todas as faixas de degradabilidade e umidade consideradas nas simulações para todo o resíduo depositado no aterro – Método de Projeto

Analisando-se os perfis gerados nos diferentes cenários, constata-se que em clima mais úmido a tendência da produção de biogás é se estabilizar antes do seu fechamento. Após

o fechamento do aterro é possível notar um declínio exponencial abrupto da geração de biogás nestas condições de umidade, e após um tempo buscando a estabilização da geração, o que caracteriza a etapa de maturação do aterro.

- Método de Decaimento de Primeira Ordem

Os valores de k e L_0 são os mesmos adotados no método anterior, porém nesta simulação se considera a geração de biogás a partir do resíduo depositado no ano x durante os anos posteriores, ou seja, como a cada ano se deposita nova quantidade de resíduo no aterro, a geração total será o gás gerado pelo resíduo antigo somado ao gás oriundo da degradação do resíduo mais recente, fazendo com que esse modelo se aproxime mais da realidade por considerar a deposição contínua de resíduo no aterro.

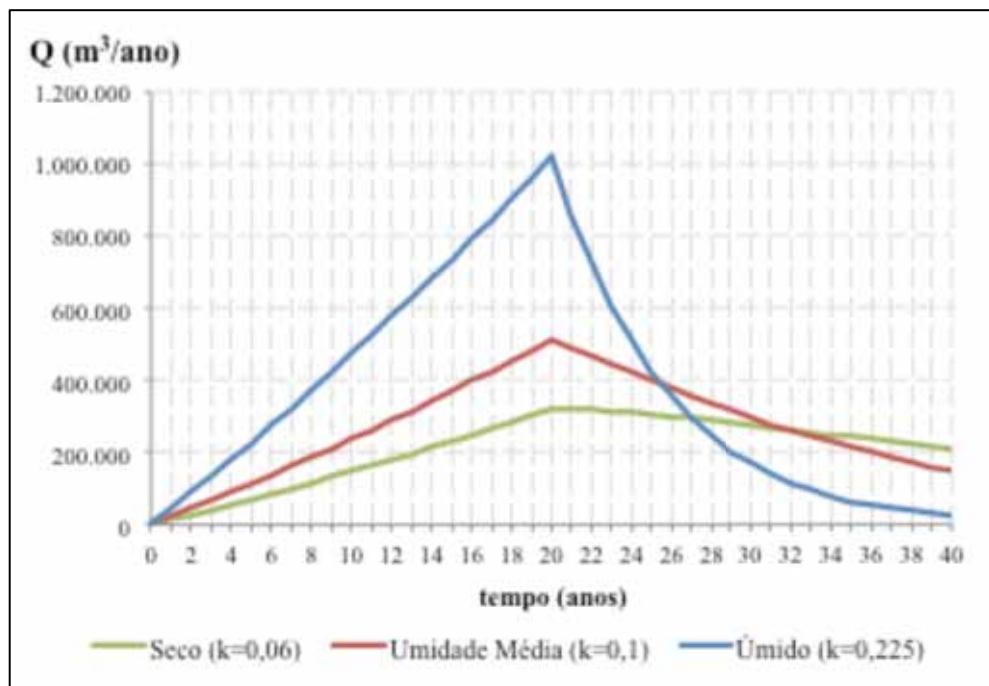


Figura 18 – Perfis de geração de gás para resíduo relativamente inerte ($L_0=15 \text{ m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes condições de umidade – Método de Decaimento de 1ª Ordem

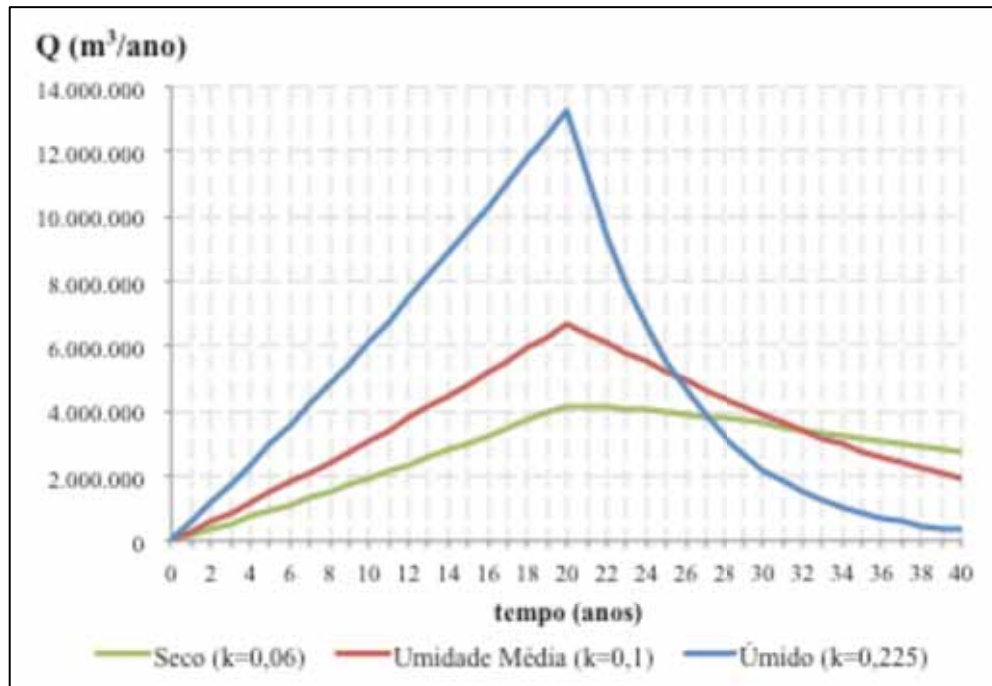


Figura 19 – Perfis de geração de gás para resíduo moderadamente biodegradável ($L_0=170$ $\text{m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes condições de umidade – Método de Decaimento de 1ª Ordem

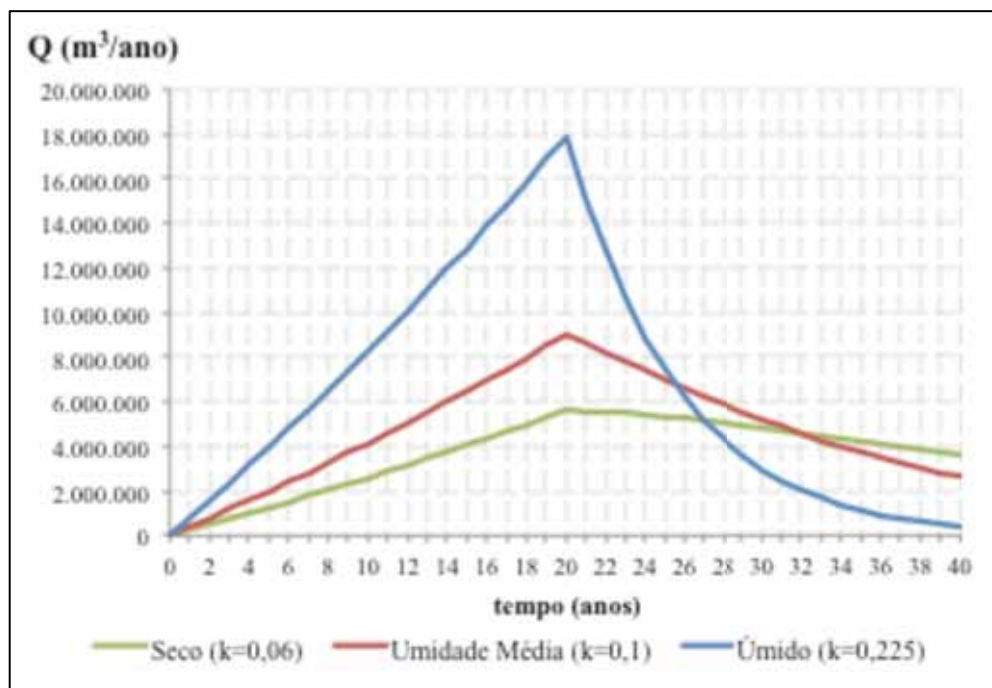


Figura 20 – Perfis de geração de gás para resíduo altamente biodegradável ($L_0=262,5$ $\text{m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes condições de umidade – Método de Decaimento de 1ª Ordem

A partir dos gráficos das simulações é possível analisar que este modelo também evidencia em um determinado momento que o aterro se encaminha para uma estabilização mediante o esgotamento da matéria orgânica presente no resíduo.

A Figura 21 demonstra o total de biogás gerado por todo resíduo depositado no aterro em sua vida útil, e a partir dela podemos novamente perceber que a umidade é um fator preponderante para os processo de produção de gás em um aterro. De um modo geral, constata-se que a umidade aumenta significativamente a produção de biogás no aterro.

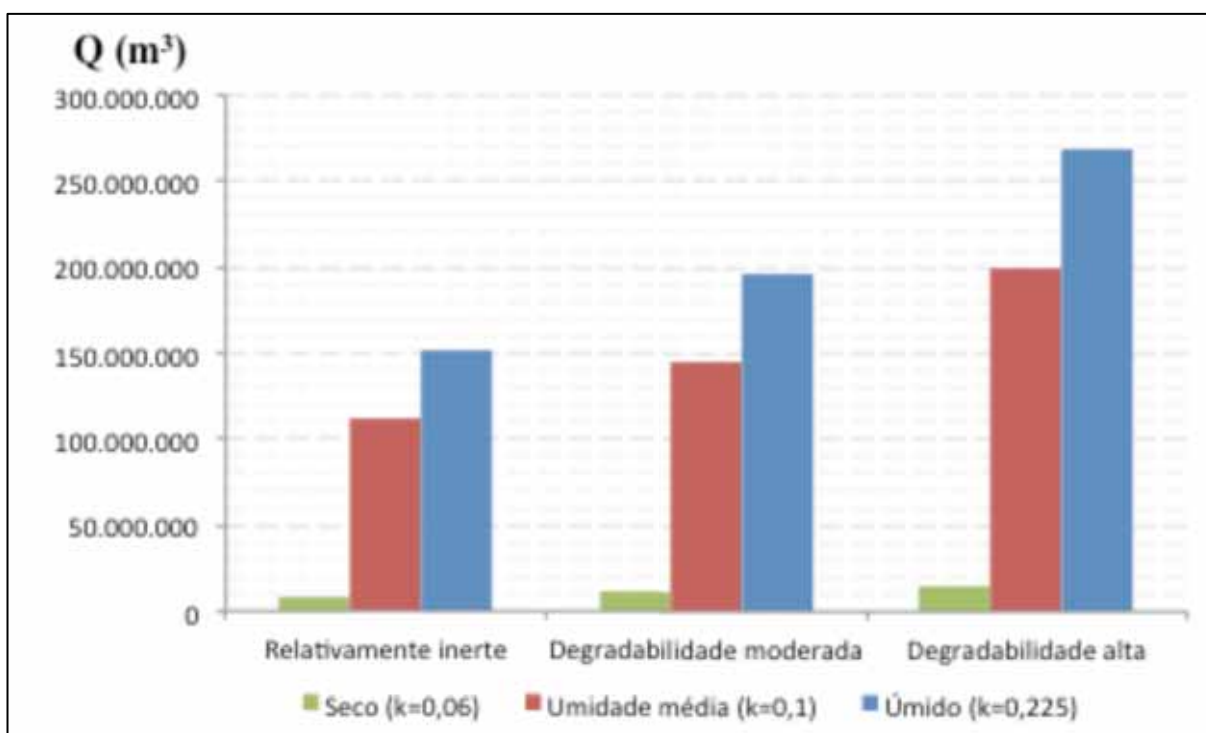


Figura 21 – Geração de metano para todas as faixas de degradabilidade e umidade consideradas nas simulações para todo o resíduo depositado no aterro – Método de Decaimento de 1ª Ordem

“School Canion”

Os perfis de geração obtidos com este modelo são similares aos obtidos com o modelo anterior. Conforme já discutido anteriormente, estes modelos cinéticos possuem semelhanças em suas estruturas, sendo próximos os dados fornecidos por um e outro modelo. A única diferença que é possível se notar entre esse modelo e o anterior é o pico de geração, sendo o do modelo “School Canion” maior, ou seja, ele simula uma maior produção de biogás no aterro sanitário.

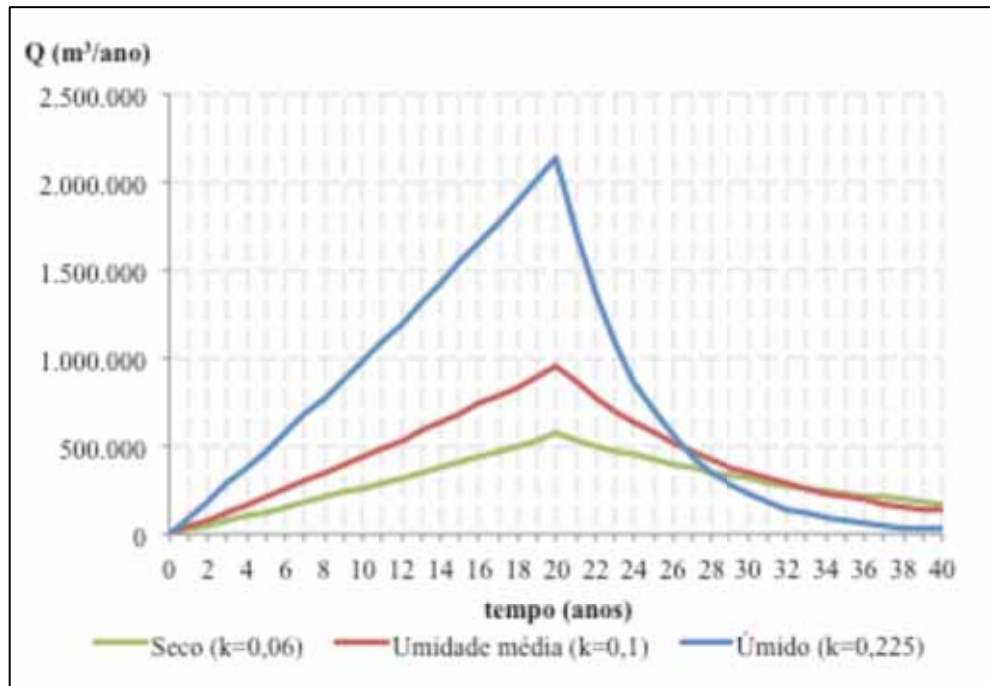


Figura 22 – Perfis de geração de gás para resíduo relativamente inerte ($L_0=15 \text{ m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes valores de k

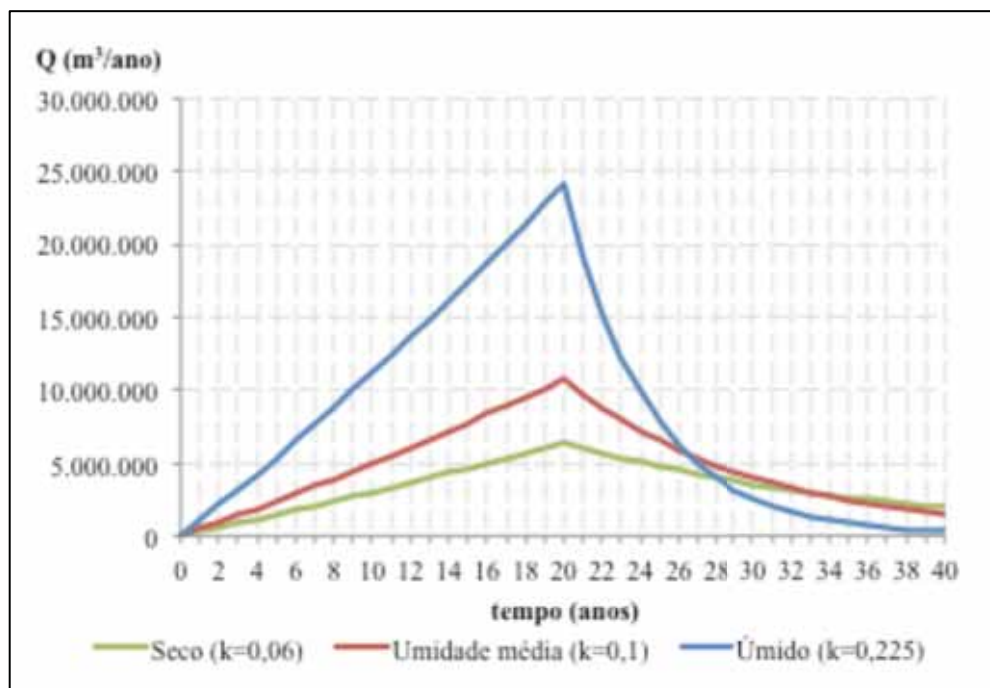


Figura 23 – Perfis de geração de gás para resíduo moderadamente degradável ($L_0=170 \text{ m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes valores de k

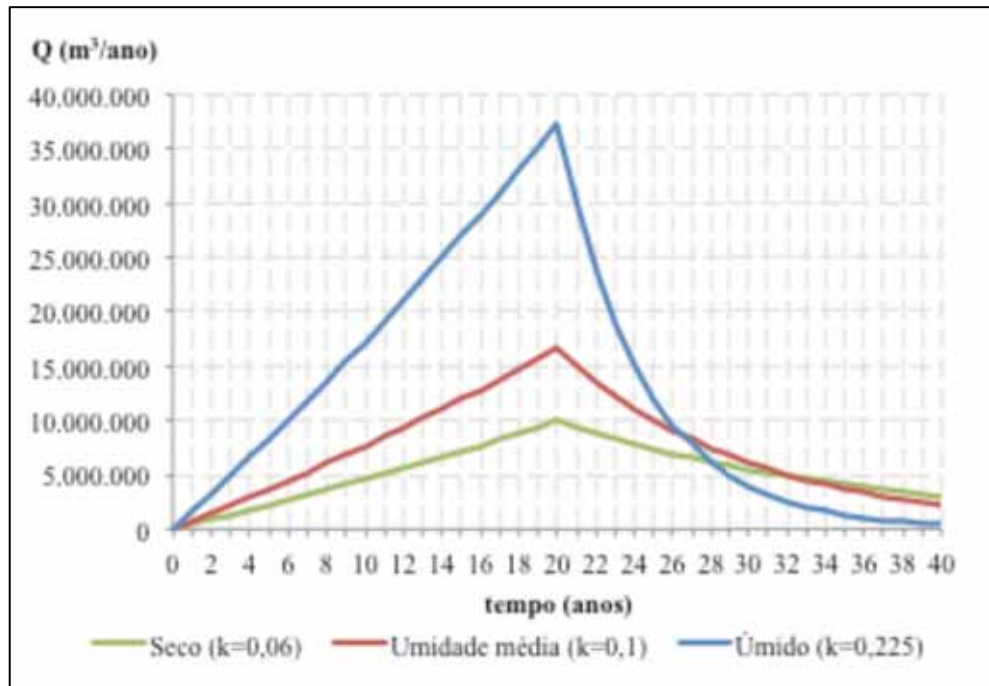


Figura 24 – Perfis de geração de gás para resíduo altamente degradável ($L_0=262,5$ $\text{m}^3/\text{tonelada RSD}$) e diferentes valores de k

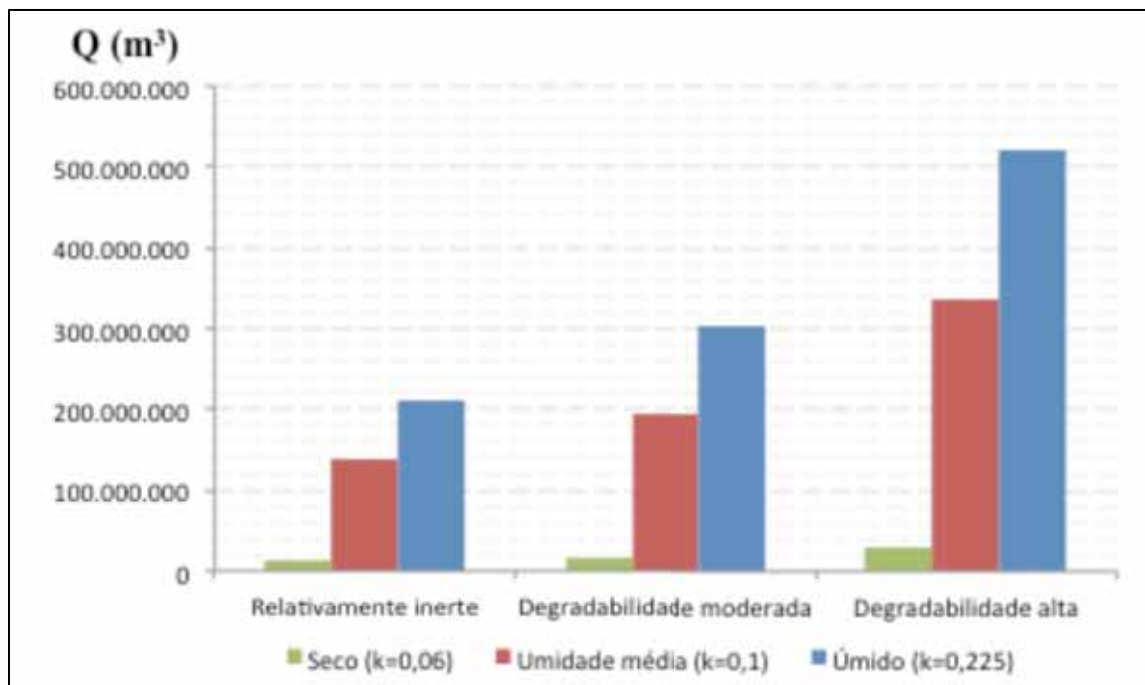


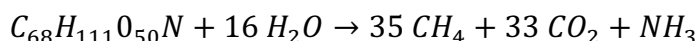
Figura 25 – Geração de metano para todas as faixas de degradabilidade e umidade consideradas nas simulações para todo o resíduo depositado no aterro – School Canion

5.4 Modelos Químicos

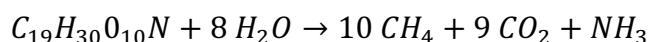
Modelo de Tchobanoglous et al. (1994)

O modelo de Tchobanoglous *et al.* (1994) é baseado na equação química de degradação do resíduo aterrado, levando em consideração a sua decomposição total. Utilizando os dados do peso total de massa seca dos resíduos rapidamente e lentamente degradável da Tabela 8, é possível chegar a uma composição base das moléculas de cada um desses resíduos. Após determinar a composição base dos constituintes, utiliza-se a Equação (17) para se obter as equações químicas gerais de degradação do resíduo, e por meio das relações estequiométricas estimar o volume de gás gerado na decomposição:

Resíduo Rapidamente Degradável:



Resíduo Lentamente Degradável:



Fazendo os cálculos estequiométricos e assumindo que a densidade do metano seja de 0,66 kg/m³, determinam-se os valores apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Estimativa da geração de biogás em aterros a partir da equação estequiométrica da biodegradação

Tipo de Resíduo	Total de biogás gerado no aterro
Rapidamente Degradável	185,0 x10 ⁶ m ³ de CH ₄
Lentamente Degradável	141,7x10 ⁶ m ³ de CH ₄

O total de gás gerado, somando as parcelas provenientes dos resíduos lentamente e rapidamente biodegradável seria aproximadamente de 327 x 10⁶ m³ de CH₄.

Os perfis simulados a partir do modelo triangular mostram a ocorrência de geração de metano no decorrer de todo o tempo em que o aterro é preenchido com resíduo. Para atender

ao modelo, que impõe que a geração de biogás se inicia após um ano de aterramento, foram calculados os valores pontuais de geração e elaborado o gráfico apresentado na Figura 21.

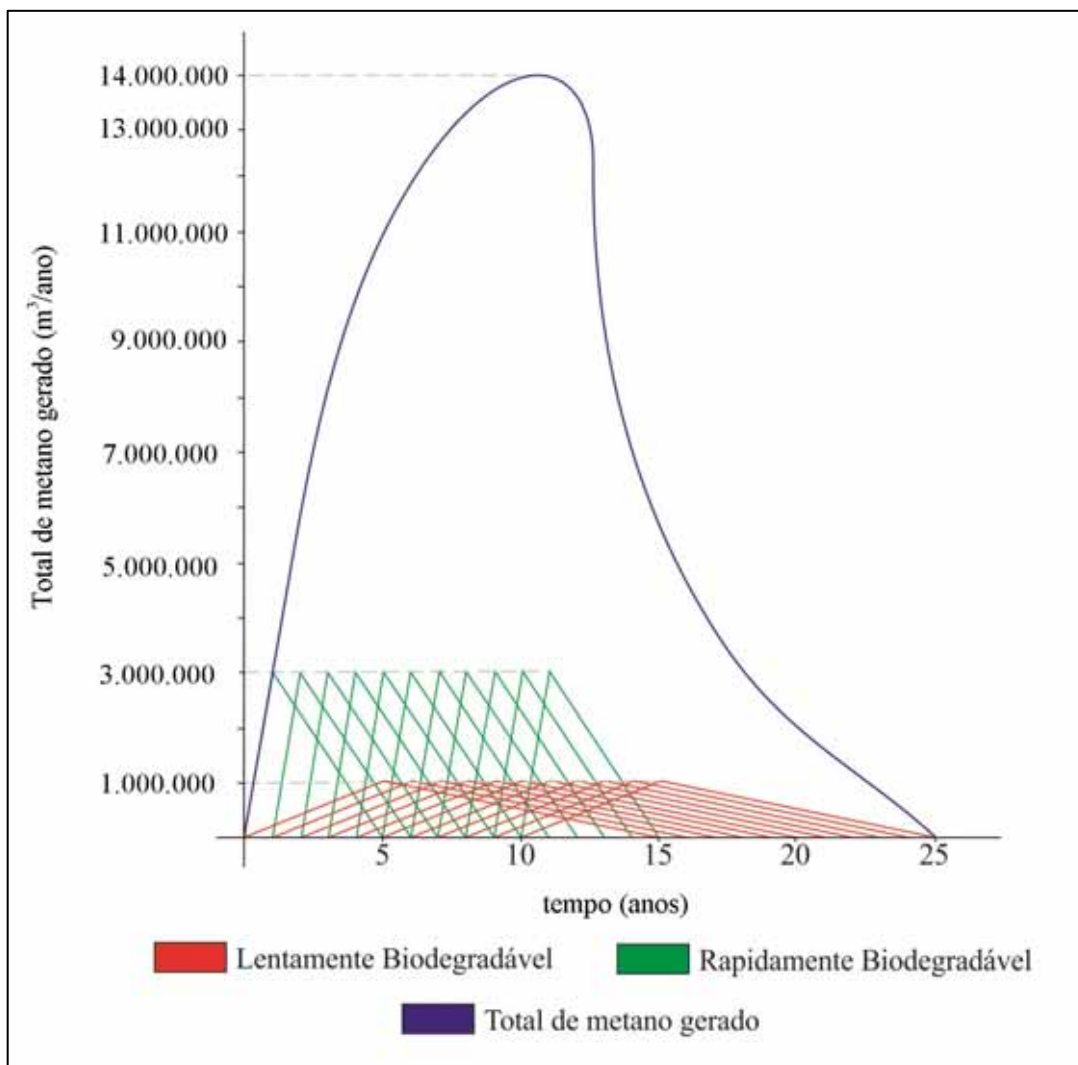


Figura 26 – Geração de biogás segundo o modelo de Tchobanoglous *et al* (1994)

5.5 Modelos desenvolvidos para regiões específicas

Estes modelos possuem peculiaridades que são complicadas de serem reproduzidas a partir de cenários hipotéticos. Alguns dos parâmetros dos modelos são específicos da região de estudo, como por exemplo, o clima e a constituição do resíduo da localidade do aterro. Tais particularidades impedem a realização de estudos mais detalhados no âmbito dos cenários propostos neste trabalho; portanto, não há a possibilidade de se fazer a estimativa da geração de biogás utilizando tais modelos devido à ausência de informações.

5.6 Comparativo entre modelos semelhantes

Neste item do trabalho foram comparadas as simulações do modelos semelhantes, os que possuem parâmetros próximos ou iguais. Isto para que possamos analisar como se comportam e em algum momento tentar evidenciar suas diferenças e tentar entender seus comportamentos para os determinados valores dos parâmetros.

Modelo de Laquidara et al. (1986) X “Aproximação simples” (US EPA, 1996): A comparação destes dois modelos foi feita através dos valores máximo, mínimo e médio da taxa de geração de metano por resíduo depositado. No modelo de Laquidara et. al. (1986) esses valores foram utilizados como sendo o valor máximo o de maior precipitação (> 1000 mm) e o de maior degradabilidade do resíduo com o $k=0,09$, o valor médio o de precipitação intermediária (>250 mm a <1000 mm) e o de degradabilidade media com o $k=0,05$ e o valor mínimo o de menor precipitação (<250 mm) e o de degradabilidade baixa com o $k=0,01$. No modelo “Aproximação simples” (USEPA, 1996) os valores foram os da Tabela 3.

Tabela 21 – Valores das simulações comparados entre os modelos de Laquidara et. al. (1986) e “Aproximação simples” (USEPA, 1996)

	Valor mínimo	Valor médio	Valor máximo
Modelo de Laquidara	86.935.713	171.646.750	218.492.105
Aproximação Simples (USEPA)	196.958.147	393.916.294	788.463.864

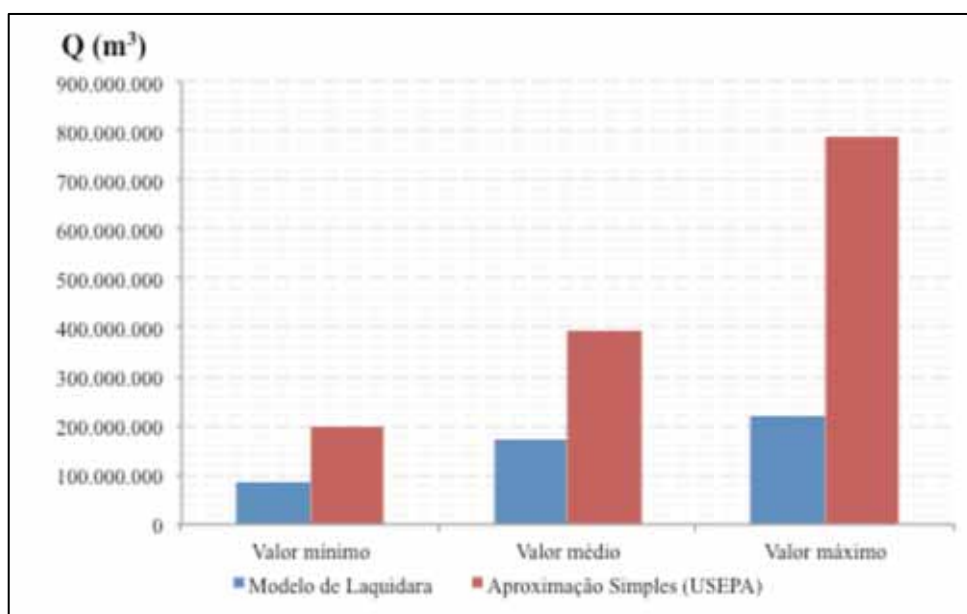


Figura 27 – Gráfico dos valores das simulações comparados entre os modelos de Laquidara et. al. (1986) e “Aproximação simples” (USEPA, 1996)

A partir da Tabela 21, foi gerado o gráfico demonstrado na Figura 27, onde os valores dos dois modelos são comparados e nota-se que o modelo “Aproximação simples” (USEPA, 1996) tem como resultado da sua simulação valores mais altos se comparados com o modelo de Laquidara et. al.. Uma das razões para tal comportamento pode ser o fato do modelo de Laquidara et. al. considerar inicialmente o consumo da matéria orgânica no aterro antes de ser realizado a estimativa da geração, quando que o modelo da USEPA não o considera em sua constante da taxa de geração de metano por massa de resíduo depositado.

“Inventário USEPA” (USEPA, 1997) X “Inventário IPCC” (IPCC, 1996): O modelo desenvolvido pelo IPCC considera a composição gravimétrica (Tabela 19) do resíduo depositado no aterro para realizar a simulação. Enquanto que o modelo da USEPA já possui uma taxa de geração de metano por resíduo depositado pré estabelecida, o que pode ocasionar diferenças entre os resultados.

Tabela 22 – Valores das simulações comparados entre os modelos “Inventário USEPA” (USEPA, 1997) e “Inventário IPCC” (IPCC, 1996)

	Lixão	Aterro controlado	Aterro Sanitário
Invetário IPCC	20.523.101	41.046.203	51.307.753
Invetário USEPA	0	0	99.028.284

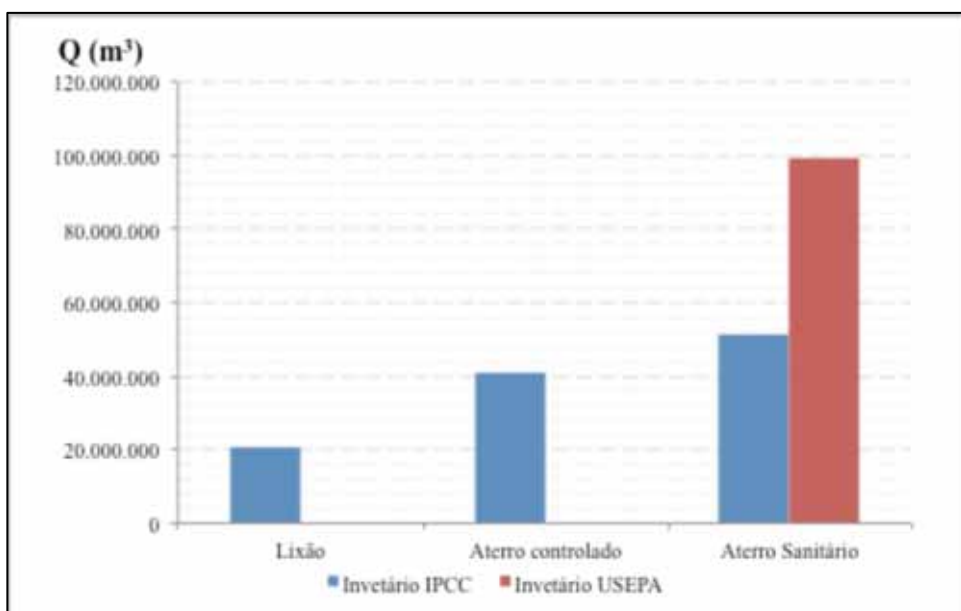


Figura 28 – Gráfico dos valores das simulações comparados entre os modelos “Inventário USEPA” (USEPA, 1997) e “Inventário IPCC” (IPCC, 1996)

Nesta comparação é possível perceber que o modelo desenvolvido pela USEPA, para os parâmetros adotados para os cálculos, tem resultados para a geração de biogás em aterros sanitários na proporção dobrada do modelo desenvolvida pelo IPCC. Isto provavelmente pelo fato do modelo da USEPA não realizar a discriminação dos resíduos dispostos no aterro.

“Método de Projeto” X “Método de Decaimento de Primeira Ordem” X “School Canion”:

Estes modelos possuem parâmetros iguais no momento de suas simulações, sendo eles o potencial de geração do metano com relação a sua degradabilidade (L_0) e a constante de decaimento (k), determinados pelas Tabelas 16 e 18. Os valores comparados são os para resíduos com degradabilidade alta, moderada e relativamente inerte, ainda também dividido entre o grau de umidade da região considerada para a simulação. A Tabela 23 demonstra os resultados obtidos divididos nas condições determinadas para se realizar uma comparação onde os parâmetros são iguais entre os modelos

Tabela 23 – Valores das simulações comparados entre os modelos Método de Projeto, Método de Decaimento de Primeira Ordem e School Canion

Umidade e Valores de k	Relativamente inerte	Degradabilidade moderada	Degradabilidade alta
Método de projeto			
Seco ($k=0,06$)	2.371.797	28.461.569	41.506.455
Umidade média ($k=0,1$)	2.690.615	32.287.382	47.085.766
Úmido ($k=0,225$)	2.835.269	34.023.225	49.617.203
Decaimento de primeira ordem			
Seco ($k=0,06$)	8.620.535	112.066.958	150.859.366
Umidade média ($k=0,1$)	11.159.734	145.076.536	195.295.337
Úmido ($k=0,225$)	15.301.892	198.924.591	267.783.103
School Canion			
Seco ($k=0,06$)	12.105.279	137.193.156	211.842.374
Umidade média ($k=0,1$)	17.259.598	195.608.781	302.042.971
Úmido ($k=0,225$)	29.667.658	336.233.454	519.184.009

A partir dos valores da Tabela 23 foram gerados os gráficos das Figuras 29 e 30, onde são colocados os resultados para os resíduos relativamente inertes, degradabilidade moderada e alta de cada modelo. Analisando os gráficos concluímos que os valores obtidos pelo modelos “School Canion” são maiores se comparados com os demais, e conforme se aumenta a umidade esta discrepância também aumenta, sendo possível concluir que sua relação com a umidade é de grande importância para seu funcionamento.

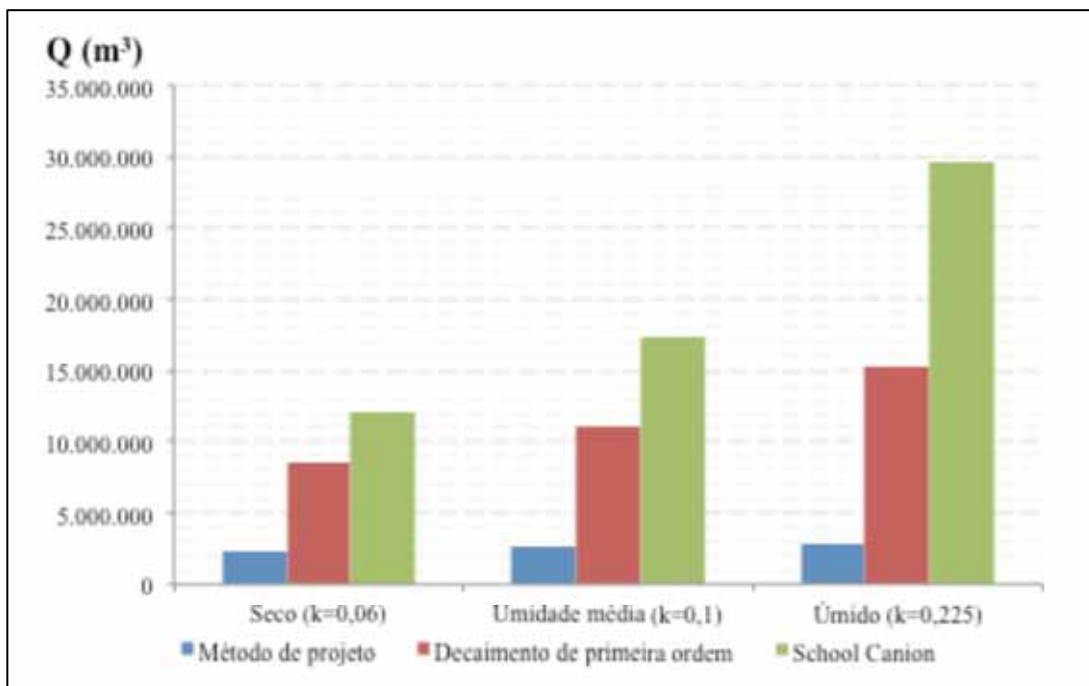


Figura 29 – Gráfico dos valores das simulações para resíduos relativamente inertes comparados entre os modelos Método de Projeto, Método de Decaimento de Primeira Ordem e School Canion

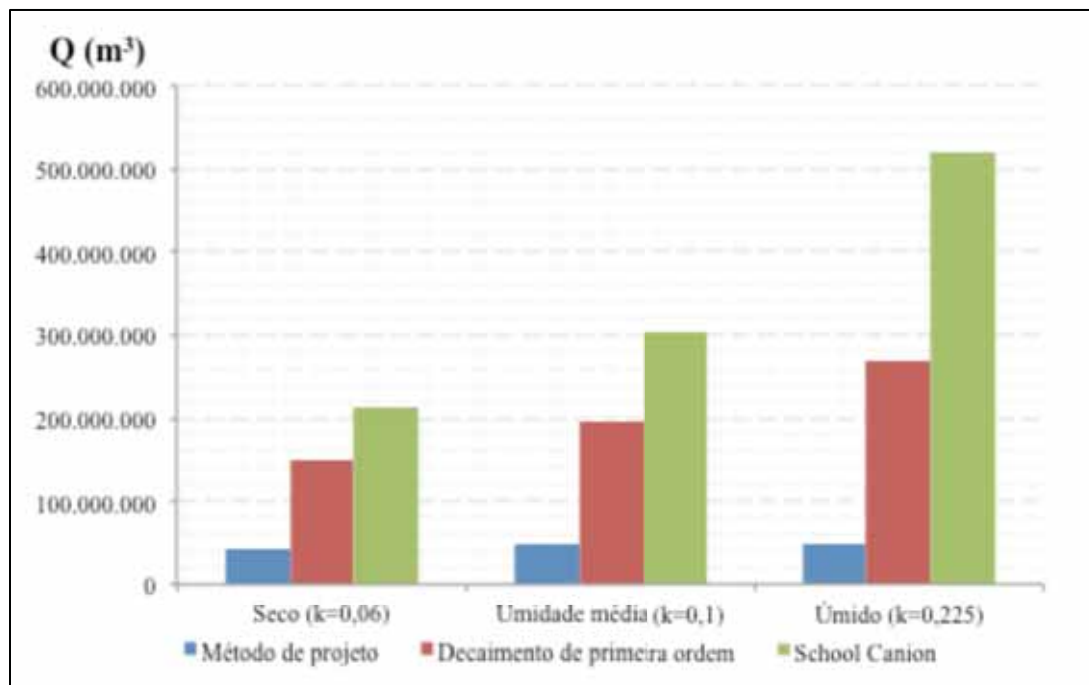


Figura 30 – Gráfico dos valores das simulações para resíduos com degradabilidade alta comparados entre os modelos Método de Projeto, Método de Decaimento de Primeira Ordem e School Canion

6 CONCLUSÃO

No presente trabalho realizou-se um levantamento de modelos matemáticos para a estimativa da produção de biogás a partir da degradação biológica de resíduos sólidos urbanos dispostos em aterros sanitários.

Após análise de todo o material bibliográfico consultado, constatou-se uma grande variedade de modelos quanto à concepção, estrutura, variáveis, parâmetros, natureza e métodos de resolução das equações, uns sendo mais específicos para determinadas condições e outros mais gerais, de aplicação mais ampla por esse motivo. Todos os modelos analisados possuem parâmetros cujas incertezas podem levar a erros consideráveis nas estimativas da produção de biogás em aterros.

Os modelos simplificados, Laquidara et. al. e “Aproximação simples”, apresentam grande diferenças entre os resultados obtidos entre os dois, porém os dois são indicados e podem ser utilizados para uma primeira proposta de dimensionamento do aterro, tendo em vista que eles estimam valores de geração de biogás baseados na produção per capita anual de resíduos sólidos que são aterrados e em uma taxa de produção de biogás por massa de resíduo depositado pré estabelecida, sem considerar as condições climáticas de umidade e grau de degradabilidade do resíduo, parâmetros que mostraram ser fatores de grande influência no processo de geração do biogás.

Os modelo “Inventário IPCC”, que faz o cálculo da taxa de geração de biogás (L_0) baseando-se na caracterização do resíduo, na forma de disposição final e na quantidade de carbono que é consumido do resíduo, obteve resultados menores se comparado com o “Inventário USEPA”, sendo este um modelo que possui o valor da taxa de geração de biogás fixada não considerando nenhuma condição de contorno de onde o aterro está localizado, o que, de forma geral, pode ocasionar em extrapolações no momento de se efetuar o cálculo.

Os modelos cinéticos possuem parâmetros idênticos no momento de se efetuar as simulações, os quais consideram muitos fatores que influenciam diretamente o processo, como por exemplo, o clima onde o aterro se encontra instalado e o potencial de geração de biogás a partir do resíduo aterrado. Este último parâmetro está intimamente relacionado à sua composição, isto é, quanto maior a presença de carbono degradável no resíduo, maior será o potencial de geração de biogás.

Não é possível determinar se algum dos modelos é mais adequado do que o outro, porém podemos compará-los e avaliá-los de acordo com os parâmetros utilizados e suas importâncias na estimativa da geração de biogás. O fato de os modelos cinéticos considerarem

algumas condições de contorno com mais atenção, não significa que eles se encontram mais próximos da realidade de um aterro e sim que estes podem chegar a ser os mais recomendados no momento de se realizar um projeto de reaproveitamento energético em um aterro sanitário.

Desta forma, pode-se concluir que ao se elaborar um projeto de reaproveitamento energético, cuja produção de biogás no aterro será um fator importante no momento do dimensionamento do empreendimento e que este proporcione retorno financeiro, é recomendável a utilização de modelos que considerem o máximo de variáveis possíveis, porem isto não significa que o mesmo terá resultados próximos a realidade do aterro.

Todavia, mesmo os modelos que consideram a maioria de variáveis possíveis no momento do dimensionamento do projeto podem apresentar falhas em suas estimativas devido às incertezas em alguns dos seus parâmetros, podendo gerar prejuízos ao projeto. Neste sentido, ainda é de extrema importância realizar estudos mais aprofundados do tema para se desenvolver técnicas de projeto mais eficientes visando à melhoria dos sistemas de disposição de resíduos sólidos urbanos. As melhorias destes métodos de estimativa poderão reverter-se em benefícios ambientais e econômicos para a sociedade, sendo, portanto, de grande interesse público.

7 BIBLIOGRAFIA

ALCÂNTARA, P. B. *Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados*. 2007. 366p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil – 2011*. São Paulo: 2008. 196 p. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/downloads/Panorama2011.pdf>>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 10.004: Resíduos sólidos: Classificação*. São Paulo, 2004.

BANCO MUNDIAL. *Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe*. Ontário: Conestoga Rovers & Associates, 2003. 248 p. Disponível em: <<http://www.bancomundial.org.ar/lfg/Archivos/Brasil/section1.pdf>>.

BELLO, P. P. G. *Estudo da variação da porcentagem e da estimativa de geração de gás metano para o aterro sanitário do município de Rio Claro – SP*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Rio Claro, 2010. 65 p.

BORBA, S. M. P. *Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários: Estudo de caso*. 134 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. *Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências*. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em 12 jan. 2013.

BRITO FILHO, L. F. de. *Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos*. 2005. 218 p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CETESB. *Manual do usuário do programa de computador Biogás: geração e uso energético – aterros – versão 1.0*. São Paulo: SMA, CETESB, MCT, 2006. 65 p.

DUARTE, A. C. *Projetos de mdL em aterros sanitários no Brasil: alternativa para o desenvolvimento sustentável*. 124 p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

ENSINAS, A. V. *Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP*. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

FRÉSCA, F. R. C. *Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física*. 2007. 134 p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

HANUM, D. F. L. *Mecanismos de desenvolvimento limpo : uma proposta para sustentabilidade do aterro sanitário de Goiânia*. 135 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Produção Sustentável) – Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2007.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). *Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos: Redução de emissões na disposição final*. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S. A. (IPT) / COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM (CEMPRE). *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. Publicação IPT 2622, São Paulo: 2000.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. v.1, 1996.

Disponível em: < <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs4.html> >. Acesso em: 23 jan. 2010.

LAQUIDARA, M. J., LEUSCHNER, A. P. e WISE, D. L., 1986, “Procedure for Determining Potencial Gás Quantities in na Existing Sanitary Landfill”, In: *Wat. Sci. Technology*, 18(12): 151-162.

MENDES, L. G. G. *Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá*. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.

MENDES, L. G. G.; MAGALHÃES SOBRINHO, P. *Comparação entre métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário*. 9 p. Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

MUYLAERT, M.S., (coord.) AMBRAM, R.; CAMPOS, C.P.; MONTEZ, E.M.; OLIVEIRA, L.B.; PEREIRA, A.S.; REIS, M.M. (2000). *Consumo de Energia e Aquecimento do Planeta – Análise do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL – do Protocolo de Quioto – Estudo de Caso*. Rio de Janeiro, Editora da COOPE.

OONK, J., A. BOOM, 1995, “Landfill gas formation, recovery and emissions”. In: Report TNO R95-203, *NOVEM Program Energy Generation from Waste and Biomass (EWAB)*, Apeldoorn, Netherlands.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N. J. V.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; COELHO, S. T. *Aproveitamento do biogás proveniente de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás*. 5 p. In: VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais, Poços de Caldas/MG, 2008.

POHLAND, F. G.; GOULD, J. P. Co-disposal of municipal refuse and industrial waste sludge in landfills. *Water Science Technology*. v.18, n.12, p.177-192. (1986).

TCHOBANOGLIOUS, G., THESEN, H., VIGIL, S. A., 1994, "Composition and Characteristics, Generation, Movement and Control Landfill Gas ". Integrated Solid Waste Management, v. 1, capítulo 11.4, Mc Graw Hill.

USEPA – United States Environmental Protection Agency. Emission Factor Documentation for Ap-42 Section 2.4 Municipal Solid Waste Landfills, North Carolina, USA, August 1997. Disponível: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/index.html>. Acesso: 9 fev. 2013

USEPA – United States Environmental Protection Agency. *Guide for methane mitigation projects* – Gas to energy at landfills and open dumps. Washington: U. S. Editores: Mark Orlic e Tom Kerr, Draft Version 2, 1996.