

UNIVERSIDADE JOSÉ DO ROSÁRIO VELLANO
OMAR JOÃO DA MATA

ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO
SANITÁRIO DE BETIM-MG

Alfenas – MG
2012

UNIVERSIDADE JOSÉ DO ROSÁRIO VELLANO
OMAR JOÃO DA MATA

ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO DE
BETIM-MG.

Dissertação apresentada a Universidade José do
Rosário Vellano, como parte das exigências para a
conclusão do Curso de Mestrado em Sistemas de
Produção na Agropecuária.

Orientador: Prof. Dr. Adriano Bortolotti da Silva

Alfenas – MG

Mata , Omar João da
Estimativa da produção de biogás no aterro de Betim-
MG/.—Omar João da Mata.—Alfenas, 2012.
35 f.

Orientador : Prof. Dr. Adriano Bortolotti da Silva
Dissertação (Mestrado em Sistemas de Produção
na Agropecuária)- Universidade José do Rosário Vellano
1.Aterro sanitário 2. Gás de aterro 3. Geração de
biogás I. Título

CDU: 628.336.6(043)



Certificado de Aprovação

TÍTULO: ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO DE BETIM - MG

AUTOR: OMAR JOÃO DA MATA

ORIENTADOR: Prof. Dr. Adriano Bortolotti da Silva

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de **Mestre Profissional em Sistemas de Produção na Agropecuária** pela Comissão Examinadora.

Prof. Dr. Adriano Bortolotti da Silva

Prof. Dr. José Ricardo Mantovani

Prof. Dr. Pablo Forlan Vargas

Alfenas, 05 de junho de 2012.

Prof. Dr. José Messias Miranda
Coordenador do Mestrado Profissional
Sistemas de Produção na Agropecuária

Este trabalho é dedicado à Maria Batista de Oliveira,

Aquela que me ensinou a acreditar,

*“Mãe não é aquela que num simples ato de cópula
sementeia filhos para o mundo, mas sim
aquela que dá amor, carinho e dedicação”*

“Omar”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, por me dar força e perseverança e a todos que me apoiaram e incentivaram no decorrer destes anos de faculdade, dedico em especiais agradecimentos principalmente:

Aos meus irmãos, Mozart/Sueli, José Ronaldo/Vera, minha sobrinha Ana Lucia responsável pelo meu estágio.

Ao gerente administrativo do aterro de Betim, Dr. Leonardo Brant.

Ao meu colega de mestrado, Messias Selemar Maia.

Aos meus pais (*in memoriam*).

Agradeço aos meus professores, principalmente ao Dr. José Messias de Miranda e em especial agradecimento ao Dr. Adriano Bortolotti da Silva, pela orientação, apoio e incentivo.

RESUMO

MATA, João Omar. Estimativa da produção de biogás em aterros sanitários para a geração de metano. Orientador: Adriano Bortolotti da Silva. Alfenas: UNIFENAS, 2011. Dissertação. (Mestrado em Sistemas de Produção na Agropecuária).

O objetivo deste estudo foi medir a emissão de biogás a partir de um aterro monitorado na cidade de Betim, Estado de Minas Gerais, no sudeste do Brasil, e determinar parâmetros para a aplicação de modelos matemáticos para avaliar a produção de metano e a geração de energia possível para a região específica. O estudo foi realizado no aterro sanitário da cidade. Com 500.000 habitantes, e produzindo 300 toneladas de resíduos por dia, Betim começou a operar seu aterro sanitário em 2002 e deverá ser concluída em 2012. O sistema de disposição e tratamento de lixo inclui o aterro sanitário, lagoas de tratamento de chorume e um pátio de compostagem. Ele recebe lixo doméstico e comercial da cidade e os restos de poda e capina. Os resíduos de poda e capina, restaurantes e caminhões de lixo são transformados em matéria orgânica no pátio de compostagem. O gás é constituído por 50% -60% de metano gerado pela decomposição da matéria orgânica por bactérias, e também de dióxido de carbono, oxigênio, hidrogênio, sulfureto de hidrogênio, amoníaco, monóxido de carbono, água e pequenas percentagens de outros elementos. Várias coleções e análises foram realizados e comparados com estimativas de medição diferentes das biogás captura sistema de aterros sanitários por meio de métodos diferentes: Banco Mundial - BM; Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima - IPCC, e Estados Unidos Agência de Proteção Ambiental - EPA, com o objetivo de encontrar parâmetros para avaliar os dados obtidos. A comparação dos nossos dados com as curvas previstas com os métodos acima, e os resultados fornecidos pelo laboratório, tornou possível para validar os modelos teóricos.

Palavras-chave: aterro sanitário; gás de aterro, geração de biogás

ABSTRACT

MATA, Omar João. Estimate of biogas production in a sanitary landfill for the generation of methane. Advisor: Adriano Bortolotti da Silva. Alfenas: UNIFENAS, 2011. Dissertation. (Master's degree in Agricultural Production Systems)

The purpose of this study was to measure biogas emission from a monitored landfill in the city of Betim, State of Minas Gerais, in southeast Brazil, and determine parameters for the application of mathematical models to evaluate methane production and the possible generation of energy for the specific Betim region. The study was conducted at the city sanitary landfill. With 500,000 inhabitants, and producing 300 tons of residues a day, Betim started to operate its sanitary landfill in 2002 and is expected to close it in 2012. The system of disposition and treatment of garbage includes the landfill, manure treatment ponds and a composting yard. It receives domestic and commercial waste from the city and the remains of pruning and weeding. The residues from pruning and weeding, restaurants and garbage trucks are transformed into organic matter on the composting yard. The gas consists of 50%-60% of methane generated by decomposition of the organic matter by bacteria, and also of carbon dioxide, hydrogen, oxygen, hydrogen sulphide, ammonia, carbon monoxide, water and small percentages of other elements. Several collections and analyses were carried out and compared with different measurement estimates of the biogas capturing system of sanitary landfills by different methods: World Bank – WB; Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC; and United States Environment Protection Agency – USEPA, with the aim of finding parameters to evaluate the data obtained. The comparison of our data with the curves foreseen with the methods above, and the results provided by the laboratory, made it possible to validate the theoretical models.

Keywords: Sanitary landfill; Landfill gas; Biogas generation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Produção de Gás metano Tchoonoglou-----	17
Figura 2	Drenos de captação e queima de biogás -----	18
Figura 3	Queima do biogás -----	20
Figura 4	Geração de metano – Metodologias- BM, USEPA e IPCC-----	26
Figura 5	Geração de metano- Metodologias- BM, USEPA, IPCC e REAL-----	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Composição média das misturas gasosas	16
Tabela 2- Valores sugeridos para K e Lo	20
Tabela 3- Previsão da quantidade de resíduo a ser depositado na CTR Betim	22
Tabela 4 – Vazão de metano: metodologias BM, USEPA, IPCC e REAL	25

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Produção de metano-----	21
Quadro 2	Cálculo da Estimativa de Energia que deixa de ser produzida -----	21
Quadro 3	Cálculo da Produção de Metano para Betim -----	28
Quadro 4	Cálculo da produção de Energia que deixa de ser Gerada -----	28

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO -----	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO -----	12
2.1 Lixo e Aterro sanitário -----	12
2.2 Produção de Metano-----	12
2.3.Biogás -----	16
3. MATERIAL E MÉTODOS -----	18
3.1 Localização do Aterro e Coleta de Dados-----	18
3.2 Localização dos Drenos -----	18
3.3 Estimativa da produção de metano-----	19
3.4 Estimativa de Geração de Metano e Potencial de Energia Elétrica -----	21
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO-----	21
4.2 Quantidade de Lixo recebido no Aterro de Betim e região -----	22
4.3 Diferentes Frações do Lixo Coletado no Aterro-----	22
4.4. Resposta das Diferentes Metodologias Aplicadas para Produção de Metano -----	24
4.5. Resultado de obtenção de Metano-----	27
5. CONCLUSÃO-----	30
6. REFERÊNCIAS -----	31

1. INTRODUÇÃO

A geração de lixo, atualmente, é um dos grandes problemas socioambientais da humanidade. O lixo cria problemas na logística de colheita, transporte e armazenamento, bem como gera impactos no meio ambiente.

Nos últimos anos, a sociedade organizada vem cobrando dos pesquisadores, empresas, governos atitudes ambientalmente corretas para a coleta, transporte e armazenamento do lixo produzido nas cidades, exigindo a criação de aterros sanitários controlados.

Nos aterros sanitários é possível o armazenamento correto do lixo, bem como selecionar materiais recicláveis (plásticos, metais, vidros e etc.), produzir compostos orgânicos (húmus, compostagem e adubos líquidos) e coleta de biogás visando à produção de energia renovável.

O biogás é o produto da decomposição de matéria orgânica por bactérias anaeróbias, é composto por 60% de metano 35% de dióxido carbono, 5% de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis (PECORA, 2006)

O aterro sanitário de Betim-MG trata adequadamente cerca de 300 toneladas dia de lixo. A produção de biogás em aterros sanitários pode gerar grande quantidade de metano, sendo esta uma fonte alternativa de energia limpa e renovável.

Além do mais, a disposição do lixo, depois de coberto, pode acarretar um grande impacto ambiental, pela sua degradação, tanto pela infiltração do lixiviado no solo, lençol freático, contaminação dos rios e nascentes de águas, principalmente a emissão descontrolada do biogás responsável pelo aquecimento global (efeito estufa).

Outro fator a ser levado em consideração é que a gestão de resíduos é um dos maiores problemas para todas as cidades. O custo é bastante alto, algumas cidades gastam milhões de dolares por ano na manipulação desses aterros, sem que haja retorno em benefício da população.

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo quantificar a produção de biogás gerado pelo aterro sanitário, bem como a projeção dessa produção nos tempos e estimar a possível produção de energia elétrica.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Lixo e Aterro Sanitário

O Brasil produz cerca de 195 mil toneladas de resíduos sólidos por dia, e a geração por habitante de uma cidade brasileira varia entre 0,4 e 0,7 kg/hab.dia⁻¹. A disposição e tratamento no país se distribuem da seguinte forma: 76,1% depositados em lixões a céu aberto; 21,8% em aterros controlados e sanitários; e 2,1% em outras destinações (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, 2010).

Não existe no Brasil leis que regularize com segurança a produção de metano pela decomposição de matéria orgânica em aterros sanitários, tornando-se assim inviável detectar os tipos e taxas de produção de metano, em face de os aterros serem considerados como solução fácil, prática e barata em termos de disposição final dos resíduos urbanos e outros. Podemos citar ainda a causa da grande extensão territorial e das diferentes classes sociais e econômicas, o que dificulta a obtenção de dados estatísticos. Assim, muitos aterros brasileiros possuem sistema de coletas e queima de biogás de forma inadequada (não controlada) e ineficaz (United Nations Framework Convention on Climate Change - UNFCCC, 2010)

Alcântara (2007) afirma que os resíduos sólidos urbanos, denominados vulgarmente de lixo, se constituem numa mistura heterogênea de materiais sólidos que podem ser parcialmente reciclados e reutilizados, e vêm se constituindo em um dos maiores problemas da sociedade moderna.

Uma das principais responsabilidades do Município é garantir que a capacidade do aterro seja suficiente para a eliminação dos resíduos processados ou crus. De acordo com o Plano Diretor de Resíduos Sólidos, o município deve manter uma capacidade de destinação de pelo menos por três anos para permitir o tempo suficiente para construir um novo segmento de aterro (EPA, 2005).

Segundo Sáez *et al.* (2001) nas cidade mais desenvolvidas a produção média de resíduos sólidos urbanos chega a 3,0 Kg/hab.dia⁻¹, e , levando-se em conta os resíduos agrícolas e industriais, este número pode chegar a valores bem maiores. No Brasil, atualmente, a produção média de resíduo sólido urbano chega a 0,924Kg/hab.dia⁻¹; no entanto, cidades importantes, como Brasília, produzem em média 1,58 Kg/hab.dia⁻¹, (ABRELPE, 2007).

2.2. PRODUÇÃO DE METANO

A norma brasileira de operação de aterros (NBR 13.896/97), em seu item 5.3, sobre emissões atmosféricas, sugere que “Todos os aterros devem ser desenvolvidos para minimizar emissões atmosféricas e promover a captura e destruição de eventuais emissões”. Esta norma não representa uma obrigação legal, apenas uma recomendação. Por esta razão, projetos de aterros geralmente optam por utilizar *flare* aberto, drenos coletadores do biogás, que é um dispositivo utilizado para queima do biogás. A queima do metano torna-se muito conveniente para reduzir as emissões atmosféricas, assim como os odores desagradáveis nas imediações do aterro.

A captação do biogás, resultante da decomposição dos resíduos orgânicos compactados em aterros, que é viável do ponto de vista econômico, energético e ambiental, traria redução de custo para a prefeitura local e um destino nobre para o lixo (CUNHA, 2002).

Machado (2005) afirmou que conhecer a biodegradabilidade e composição do resíduo é de grande importância no estudo dos recalques de um aterro sanitário, em longo prazo, e na estimativa do volume de gás produzido em relação à massa total do resíduo disposto.

Os aterros de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), ao contrário dos maciços de solos compactados, são constituídos por diferentes tipos de componentes (metais, plásticos, papéis, vidros, madeiras, têxteis, resíduos orgânicos, pedras e solos) que, quando depositados, interagem formando um maciço heterogêneo e poroso. Vários desses componentes se transformam, ao longo do tempo, devido a fenômenos físico-químicos e biológicos, o que resulta na geração de gás e chorume, com consequente redução de massa e de volume do resíduo depositado (MACHADO, 2005).

Quando o lixo é depositado, seu potencial contaminante torna-se evidente uma vez que, após a sua disposição no aterro, inicia o processo de biodegradação, que compreende reações físicas, químicas e biológicas, resultando na formação de chorume e do biogás. O chorume é um líquido de coloração escura e odor desagradável, que possui elevada carga orgânica e diversas espécies de microrganismos. O biogás, por sua vez, é composto, em grande parte, por gás carbônico e metano, principais responsáveis pelo efeito estufa (PAES, 2003).

O biogás é uma mistura resultante da fermentação anaeróbia de material orgânico encontrado em resíduos animais e vegetais, lodo de esgoto, lixo ou efluentes industriais, como vinhaça, restos de matadouros, curtumes e fábricas de alimentos (GIACAGLIA; SILVA DIAS, 1993).

O biogás é composto por uma mistura de gases, alguns em grandes percentagens como o metano e dióxido de carbono, que são os principais gases provenientes da decomposição da biodegradação dos resíduos orgânicos e outros, em menor percentagem, que variam de acordo com material de resíduo recebido e a idade do aterro (Environmental Protection Agency - EPA, 2005).

A biodegradação dos resíduos sólidos foi estudada por diversos autores, no caso específico de substratos sólidos confinados em aterros sanitários. Existem etapas da degradação da matéria orgânica; no entanto, a literatura relata que nenhum aterro apresenta uma única fase ou uma sequencia ordenada de fases de degradação, existindo um conjunto simultâneo de diferentes fases e idades, cujo desenvolvimento pode variar de acordo com as condições físicas, químicas e biológicas, associadas às células do aterro (MERBACH Jr, 1989; POHLAND & GOULD, 1986; FARQUAR & ROVERS, 1973). Conforme os autores, são as seguintes as fases da biodegradação descrita:

Fase Aeróbia - onde se inicia o processo de degradação aeróbia pela predominância de fungos e bactérias devido à presença de oxigênio após a cobertura do aterro. Na decomposição dos resíduos orgânicos, a reação libera calor, elevando a temperatura em torno de 55 a 70° C, consumindo quase a totalidade de oxigênio e microrganismos para formação de dióxido de carbono e água, sem a interferência do N₂, num período muito curto, influenciado pelo tipo de cobertura do aterro, compactação do lixo, temperatura e umidade do meio ambiente.



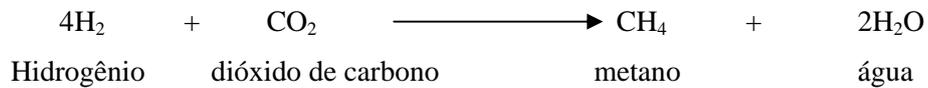
Fase Anaeróbia Metanogênica Instável - é o processo que se realiza com ausência de oxigênio, a velocidade de degradação é muito lenta, reduz as concentrações de CO₂ e H₂, aumenta a formação dos acetatos, dos ácidos, reduzindo o pH, para uma produção estável de metano.



Fase Anaeróbia Metanogênica Ácida - converte os ácidos acéticos e outros ácidos mais complexos em produção de 90% de dióxido de carbono e água, ou seja, as enzimas celulares que decompõem a matéria orgânica obtendo ácidos solúveis como: graxos, aminoácidos e açúcares

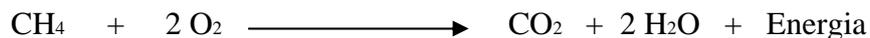


Fase Anaeróbia Metanogênica Estável é quando a biodegradação atinge uma produção constante de metano nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP), a reação é estritamente anaeróbia, e o pH gira em torno de 6,8 a 8, continuando a subir diminuindo as concentrações de demanda bioquímica de oxigênio (DBO).



Fase de Maturação é a fase final e mais longa, em que diminui a taxa de geração de metano e gás carbônico. O que restaram na massa de lixo contém substratos de difícil biodegradação, tornando-se a decomposição microbiológica lenta.

O metano, por sua vez gerado, em contato com o ar atmosférico pode entrar em combustão com o oxigênio, apresentando uma reação do tipo exotérmico, em função das ligações químicas entre os átomos de hidrogênios e carbono, liberando grande quantidade de calor (energia térmica), que pode ser aproveitado no próprio aterro. O metano é um gás de fácil combustão e por isso, nos locais onde ele é gerado, existe sempre o risco de ocorrerem explosões.



A decomposição anaeróbica produz calor e água, mas diferentemente da decomposição aeróbica, que também produz certa quantidade de metano. Durante a quarta fase, o metano é gerado na faixa entre 40 e 70% do volume total (McBEAM; ROVERS; FARQUHAR, 1995).

A oxidação do metano também foi constatada em ambientes anaeróbios (ZEHNDER; BROCK, 1980). O controle das emissões de metano em aterros pode ser realizado por meio da captação de biogás e combustão (flares), combustão como geração de energia (NIKIEMA; BRZEZINSKI; HEITZ, 2007) e por via biológica através da oxidação aeróbica nas coberturas dos aterros ou em biofiltros (EINOLA; KARHU; RINTALA, 2008; NIKIEMA; BRZEZINSKI; HEITZ, 2007; BARLAZ *et al.*, 2004; HILGER; HUMER, 2003; BOECKX; VAN CLEEMPUT; VILLARALVO, 1996; BENDER; CONRAD, 1995; WHALEN; REEBURGH; SANDBECK, 1990).

2.3. BIOGÁS

O poder calorífico inferior (PCI) do biogás é de cerca 5.500 kcal/m³, quando a proporção de metano é de cerca de 60% (CASINI, 2003), sendo a composição básica apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição média das misturas gasosas

Metano	(CH ₄)	50% a 75%
Dióxido de Carbono	(CO ₂)	25% a 40%
Hidrogênio	(H ₂)	0,5% a 2,5%
Oxigênio	(O ₂)	0,1% a 1%
Sulfeto de Hidrogênio	(H ₂ S)	0,1% a 0,5%
Amônia	(NH ₃)	0,1% a 0,5%
Monóxido de Carbono	(CO)	0% a 0,1%
Água	(H ₂ O)	Variável

Fonte: Cassini *et al.* (2003)

A composição dos gases gerados nos aterros é função das características dos resíduos e de suas fases de decomposição. Enquanto alguns constituintes se fazem presentes em grandes quantidades, outros apenas se constituem em elementos traços. De maneira geral, os constituintes principais são aqueles que, juntos, representam quase a totalidade (99%) dos gases encontrados nos aterros, como o CH₄ e CO₂. O biogás, no entanto, é composto de 50 a 60% de metano, 25 a 40% de CO₂ e, em pequena quantidade de outros elementos, como N₂, H₂, H₂S e NH₃ (CASSINI *et al.*, 2003).

Analisando a Figura 1, pode-se observar que a taxa de produção do biogás durante os cinco primeiros anos de deposição do resíduo orgânico em um aterro é rápida, e gradativamente lenta a biodegradação depois dos primeiros cinco anos depositados, em que a temperatura é um fator importante na degradação (aeróbia e anaeróbia) da matéria orgânica do aterro sanitário, pois na degradação em fase anaeróbia os microrganismos se desenvolvem em função da temperatura. (TCHOBONOGLOUS *et al.*, 1993).

O desenvolvimento e crescimentos dos microrganismos depende da temperatura do meio, sendo classificados em: Psicrófilos, até 20° C; Mesófilos, de 20° a 40° C; Termófilos, de 40 a 80° C; e Hipertermófilos, acima de 80° C. (MADIGAM *et al.*, 2002 *apud* ACÂNTARA 2007). A quantidade total de gás produzido corresponde diretamente às áreas triangulares conforme mostra a Figura 1.

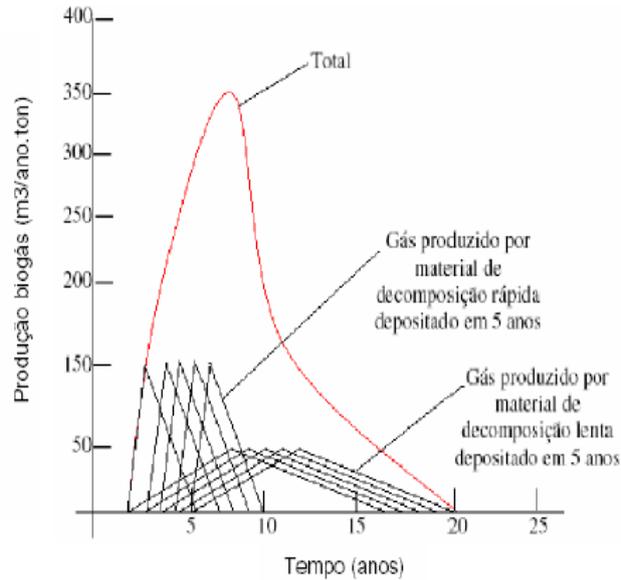


Figura 1- Produção de gás durante um período de cinco anos a partir de materiais orgânicos rápida e lentamente decompostos num aterro.

Fonte: Tchobanoglous *et al.* (1993).

Para Firmo (2006), o modelo de Tchobanoglous *et al* (1993), é multifase e apresenta uma metodologia de avaliação da quantidade de biogás gerado em aterro em função da decomposição elementar do lixo, utilizando relações estequiométricas de decomposição. O modelo assume os resíduos rapidamente decompostos durante os três primeiros meses até aos cinco anos, onde a produção de biogás atinge seu pico.

Ao final do segundo ano após sua decomposição, os resíduos rapidamente degradáveis atingem o seu pico máximo de produção de biogás, diminuindo a sua produção à partir deste instante até o sexto ano, quando cessa a produção. O primeiro ano é considerado uma fase de preparação onde a produção é praticamente nula, por se tratarem de resíduos lentamente degradáveis.

Pela carência de legislação brasileira, as empresas ligadas aos aterros sanitários não se sentem obrigadas a fornecerem informações, em especial no que diz respeito às emissões de gases do efeito estufa, e a busca de coletas e informações são insuficientes na obtenção de armazenamento de dados, principalmente em nível de localidades dos aterros.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização do Aterro e Coleta de Dados

As coletas de dados foram realizadas no aterro de Betim, por ter uma parceria com a UNIMED, o que facilitou e permitiu o meu acesso às instalações, o acompanhamento das operações e a disponibilização de dados técnicos e de relatórios gerenciais. O aterro está localizado a 13 Km de Betim, região metropolitana de Belo Horizonte, com uma população de 500.000 habitantes, situado na latitude $7^{\circ} 36' 16''$ N, no meridiano, longitude $15^{\circ} 19' 24''$ W, ocupando 50% dos 34 hectares.

Pelo levantamento de dados técnicos e mapeamentos de vários aterros, como aterro controlado de Londrina/PR, aterro da Muribeca/Pe, aterro de Nova Iguaçu/RJ, aterro sanitário de Campinas/SP, e depois de verificado a infraestrutura de cada um deles pelos projetos apresentados para geração de metano a partir do gás de aterro sanitário, o escolhido foi o aterro de Betim, região metropolitana de Belo Horizonte - MG, por ser um aterro modelo, já recebendo o lixo reciclado e também quanto à receptividade e apoio gerencial.

3.2 Localização dos Drenos

Existem 256 drenos verticais de captação de biogás distribuídos pelo aterro (Figura 2), são constituídos por tubos de concreto perfurados, visando assegurar uma superfície livre para escoamento de gases para a atmosfera. Eles estão instalados linearmente a uma distância de 30 metros uns dos outros, desde o fundo do aterro até, aproximadamente, um metro acima da superfície. Estes drenos são utilizados na realização das medições de vazão do biogás.



Figura 2 - Drenos de captação e queima do biogás. Betim. 2011

3.3 Estimativa da produção de metano

Para calcular a produção de metano no aterro de Betim, foi necessária a utilização de diferentes modelos, e para o fator fundamental e de grande importância foi a caracterização química dos resíduos, para desta forma obter-se o potencial de produção do biogás. Como não foi possível obter estes dados, foi utilizada a forma indireta da composição gravimétrica dos resíduos. Aplicando os parâmetros admitidos (Tabela 2) para o aterro sanitário de Betim nas equações apresentadas, ao longo dos 40 anos, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 4.

A partir das três metodologias citadas, foram calculados os diferentes potenciais para geração de biogás, podendo assim fazer um comparativo técnico, com a finalidade de buscar os melhores parâmetros para calcular a taxa de produção de gás por tonelada de resíduo. E para calcular a geração de biogás do aterro de Betim durante o tempo de deposição, foram utilizadas as fórmulas, recomendada pelas seguintes metodologias:

International Panel On Climate Change

$$(IPCC) \quad LFG = K \cdot L_0 \cdot R \cdot e^{-k(t-c)}$$

United States Environmental Protection Agency

$$(USEPA) \quad LFG = L_0 \cdot R \cdot (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad c = 0 \quad \text{para aterro ativos}$$

World Bank

$$(BM) \quad LFG = K \cdot L_0 \cdot R \cdot e^{-kt} \quad t = 0 \quad \text{para aterros em atividades . Onde:}$$

LFG = quantidade total de gás gerado durante um ano (m^3 /ano)

L_0 = potencial total de geração de metano do resíduo (m^3 /ton. de lixo)

R = variação média anual aceita durante a vida útil (t/ano)

k = velocidade de degradação do lixo (1/ano)

t = tempo de desde a abertura do aterro (ano atual)

c = ano de disposição do resíduo no aterro (início de operação).

Quando se usam as metodologias recomendadas pelo BM (Banco Mundial); USEPA (United States Environmental Protection Agency); e IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Chang), com valores diferenciados para K (velocidade de degradação do lixo), e L_0 (potencial de geração de metano do resíduo), conforme Tabela 2, obtém-se valores diferenciados na geração de biogás. De acordo com os levantamentos bibliográficos brasileiros, os parâmetros atribuídos para L_0 e K , fatores estes mais importantes para calcular a vazão de biogás num aterro, a norma Brasileira atribui valores para K que variam de 0,05 a

0,15 ano⁻¹, e Lo, que varia de 140 a 190 m³ CH₄/ton⁻¹, isto devido ao clima, à qualificação e quantidade de resíduo sólido disposto no aterro (ABNT/ NRB 4810, 1992)

Tabela 2. Valores sugeridos para K e Lo

TABELA PARÂMETROS	VALORES DE LO E K RECOMENDADOS		
	BM	USEPA	IPCC
K (ANO ⁻¹)	0,06	0,04	0,05
Lo (m ³ CH ₄ /t _{RSU})	170	100	89.5

Fonte: Banco Mundial (2003)

Estes cálculos foram realizados a partir da quantidade de lixo recebida pelo aterro de Betim entre os anos de 2002 e 2012. Para o ano de 2010 foi realizado um estudo sobre as diferentes frações do lixo coletado na região de Betim.

O biogás do aterro de Betim não é queimado pelo processo *flare* de estrutura metálica, por ser um sistema altamente caro, Ele é queimado sobre o próprio dreno e o acendimento é manual (Figura 3), de forma precária, apresentando vários drenos apagados e outros destruídos pela alta temperatura da chama, destruindo da estrutura dos drenos.



Figura 3- Queima do biogás. Betim. 2011

Por ser altamente combustível, o biogás necessita diariamente ser drenado para evitar explosões no local do aterro. A estimativa é que apenas 20% do gás é queimado, e o restante é emitido para a atmosfera, causando impacto ambiental e o aquecimento global.

3.4 Estimativa de geração de metano e potencial de energia elétrica.

Para a estimativa da geração de metano (Quadro 1) e potencial de energia elétrica foi utilizada a metodologia descrita pelo IPCC, levando em conta para os cálculos de produção de metano, população, geração de resíduo, entre outros fatores vistos no Quadro 1. A partir da produção de metano foi calculada a estimativa de geração de energia elétrica usando a fórmula descrita do Quadro 2.

Quadro -1. Parâmetros Utilizados para Calcular a produção de CH₄ para Aterro de Betim

Indicador	Abreviatura	Medição	Comentários
População Urbana	Pop _{urb}	500.000	Nº habitantes
Taxa de Geração de Resíduo	RSD	600g/dia	Por habitante
Resíduo Sólido	RSDf	0,6	Depositados em locais de disposição
Fator de Correção do Metano	FCM	1	-
Carbono Degradável no RSD	COD	0,16	-
Fração de COD	CODf	0,77	fração que realmente degrada
Giga grama	Gg	10 ⁻⁹	
Fração de CH ₄ no Gás de Aterro	F	0,4	
Taxa conversão C em CH ₄		16/12	
Quantidade de Metano recuperado	R	Desprezível	Gg CH ₄ /ano não emitido, queima no flare
Fator de Oxidação	OX	Desprezível	não há formação de CO ₂ antes da queima de metano

Prod.CH₄ (Gg/ano) = (Popurb x DSD x RSDf x FCM x COD x CODf x F x 16/12 – R) x (1 – OX)
IPCC 2011

Quadro 2 - Cálculo da Estimativa de Energia que deixa de ser produzida.

Energia Disponível	ED	MWh/dia	
Calculo da Energia Disponível	PD	(ton CH ₄ /ano) x PC (GJ/ton CH ₄) x Ec x m = MWh/dia	
Eficiência do gerador	m	0,28	(adimensional)
Poder calorífico inferior do metano	PC	50 GJ/ton CH ₄	
Fator de conversão de energia	Ec	GJ=0,278 MWh.	

Fórmula ED = PD x PC x Ec x m

Fonte: IPCC, 2011

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Quantidade de lixo recebida no aterro sanitário da região de Betim

A Tabela 3 apresenta previsão da quantidade de lixo recebido pelo aterro desde o ano de 2002 até o ano de 2012. A invasão habitacional localizada próximo ao aterro sanitário é um dos fatores que contribuíram para acelerar a desativação do aterro sanitário, recebendo lixo até dezembro de 2012 (Tabela 3). Quando o CTR de Betim iniciou suas atividades em 2002, a deposição de resíduos no aterro nesse ano foi de 49.775 toneladas. E a partir do ano de 2009, o aterro passou a receber lixo de mais quatro cidades vizinhas (Mario Campos, Igarapé, São Joaquim e Sarzedo), proporcionando um aumento na deposição de lixo no aterro (Tabela 3), resultando assim um ganho de 72% na vazão de metano (Tabela 4).

Tabela 3 – Previsão da quantidade de resíduo e ser depositado no CTR Betim

Ano	Quantidade de resíduo recebida (t/ano)
2002	49 775
2003	51 780
2004	53 230
2005	55 370
2006	58 450
2007	63 580
2008	74 370
2009	86 850
2010	93 323
2011	109 500
2012*	116 800

*Previsão de quantidade no ano de 2012

4.3 Diferentes frações do lixo coletado na região de Betim em 2010

De acordo com o monitoramento dos resíduos coletados para o aterro de Betim em 2010, visto no Quadro 3, o que proporcionou maior volume colhido foi o de resíduos domésticos, que teve um aumento considerável, passando de 49% para 54%, destacando-se as coletas regionais, pela qual apresentaram o percentual, respectivamente. Já em relação aos resíduos comerciais, verificou-se uma redução considerável, passando de 19% para 9%. Tal fato talvez esteja relacionado em parte à coleta seletiva realizada no Município e em parte a um percentual que pode ter sido caracterizado como resíduos de capina, jardinagem e canteiros públicos, já que a massa final de resíduos, durante a triagem, dificulta a

identificação de alguns componentes. Quanto aos resíduos especiais, principalmente produtos de resíduos hospitalares têm uma destinação especial, uma parte é incinerada em local apropriado e a outra parte oriunda de lixos biológicos que são depositados em aterros especializados, recobertos por argila e bem compactados, e vários drenos distribuídos para uma eventual incineração, finalidade esta de amenizar a proliferação do ar atmosférico.

Quadro 3. Monitoramento da diferentes frações do lixo na região de Betim em 2010

Mês	RE		RC		ROM		RSS		RP		RD		TOTAL
	m/ Kg	%total	m/Kg	%total	m//Kg	% total	m/Kg	% total	m/Kg	% total	m/Kg	% total	
Jan	176.30	2,41	704.370	9,64	1.152.040	15,77	37.160	0,51	44.870	0,61	5.189.370	71	7.303.940
Fev	158.560	2,2	756.960	10,51	1.100.940	15,29	41.530	0,58	18.740	0,26	5.125.020	71	7.201.740
Mar	219.640	2,59	861.070	10,17	1.344.800	15,88	52.180	0,62	20.040	0,24	5.968.360	71	8.466.090
Abr	128.670	1,68	806.160	10,51	1.225.130	15,99	52.310	0,68	7.970	0,1	5.441.720	71	7.660.960
Mai	153.160	1,91	844.230	10,53	1.185.210	14,79	53.000	0,66	59.630	0,74	5.719.820	71	8.015.050
Jun	193.541	2,45	922.860	11,69	1.175.140	14,89	45.080	0,57	72.030	0,91	5.485.490	69	7.894.141
Jul	106.480	1,33	724.350	9,15	1.162.140	14,68	48.110	0,61	96.090	1,23	5.779.220	73	7.915.390
Ago	78.930	1,11	79.750	1,12	1.098.480	15,46	48.680	0,69	87.510	1,23	5.711.970	80	7.105.320
Set	101.770	1,44	0	0	1.138.130	16,06	52.570	0,74	107.030	1,51	5.686.350	80	7.085.850
Out	72.270	0,96	0	0	1.233.780	16,42	52.100	0,69	35.000	0,47	6.120.085	81	7.513.235
Nov	71.560	0,89	0	0	1.370.170	17,06	52.220	0,65	54.470	0,68	6.484.870	81	8.033.290
Dez	85.390	0,94	0	0	1.569.610	17,19	53.930	0,59	104.020	1,14	7.315.170	80	9.128.020
Total	1.546,09	1,66	5.698.750	6,11	14.755.470	15,79	588.870	0,63	707.400	0,76	70.027.445	75	93.323.026

Legenda: RE Resíduo Especial; RSS Resíduo de Serviço de Saúde; RP Resíduo Público; RC Resíduo Comercial; RD Resíduo Doméstico; ROM Resíduos Outros Municipais

RE Resíduo Especial: são gerados por hospitais farmácias e indústrias, merecem tratamentos especiais em seu manuseio, transporte e disposição final.

RSS Resíduo de Serviço de Saúde: presença de agentes biológicos, altamente contaminantes. Dependendo de sua reciclagem, devem ser esterilizados ou incinerados;

RP Resíduo Público: instalações públicas, parques, praças, jardins etc...

RC Resíduo Comercial: são gerados em estabelecimentos comerciais, variando de acordo com a atividade desenvolvida;

RD Resíduo Doméstico: são os gerados nas atividades diárias em residências, constituídos geralmente por restos de alimentos, papéis, jornais, revistas e embalagens;

ROM Resíduos Outros Municipais: gerados por entulhos, restaurantes, limpeza pública.

Resíduo sólido doméstico em maior quantidade pode gerar maior quantidade de metano, devido à composição química dos componentes biodegradáveis dos restos de alimentos que define as características dos constituintes dos substratos gerados a partir da biodegradação dos resíduos em grande porcentagem, tais como; carboidratos, proteínas e lipídios (MACIEL, 2003)

Reinhart e Cooper (1992) afirmaram que a produção de metano em aterros sanitários de resíduos sólidos domésticos, tiveram a maior produção: aproximadamente 10,5 milhões de toneladas/ano. Segundo Bahr *et al.* (2006), a emissão mundial de metano em aterros sanitários de resíduos sólidos é estimada em 60 milhões de toneladas por ano, sendo 15% destes provenientes de aterros chineses.

Entretanto, dever ser levada em conta a coleta de lixo seletiva, bem como a triagem, realizada entre a chegada do lixo, e a sua posterior deposição. Isto pode auxiliar, fazendo com que ocorra maior deposição de matéria orgânica e aumento na geração de metano.

A coleta seletiva, como parte do processo de gestão de resíduos, é responsabilidade municipal. Porém, muitos municípios não a fazem ou fazem-na em pequenas proporções, alegando o alto custo do sistema. Betim, em uma iniciativa inovadora, investiu em um amplo programa de coleta seletiva e quantificou não só os gastos, mas também os ganhos alcançados. O resultado mostra um baixo investimento em face dos grandes benefícios sociais e ambientais alcançados. A triagem é feita em um galpão de 480 m² em área de 1200 m² localizado na região central de Betim, para a separação do material, amparado pelas leis municipais.

4.4 Resposta das diferentes metodologias aplicadas para produção de metano

O presente trabalho demonstrou diferentes resultados para a produção de metano no aterro sanitário de Betim, aplicando as metodologias recomendadas pelo BM, USEPA e IPCC. Quando se aplicam diferentes valores para Lo e K, nas citadas metodologias verificou-se ganho diferenciado na produção. A maior produção de metano foi obtida com a metodologia recomendada pelo USEPA, quando comparada com as outras.

A geração real de metano aumentou no período observado de 2002 a 2012, iniciando com uma geração de 335. 648,16 e atingindo 787. 611,60 m³ de metano. O CTR da cidade de Caieiras – SP, cidade com 450 mil habitantes, gerou, em 2004, 2.763.891,37 m³ de metano (CEMBIO, 2004), valores bem superior ao obtido na CTR Betim

A metodologia apresentada pelo IPCC nos primeiros anos (Tabela 6) fornece quantidades de metano inferiores às obtidas da aplicação da metodologia Banco Mundial e USEPA. Entretanto, com o passar do tempo, a metodologia IPCC supera as outras metodologias. Estes valores se devem basicamente às fórmulas empregadas nas diferentes metodologias (Tabela 4 e Figura 4).

Tabela 4. Vazão de CH₄ m³/ano CTR Betim - Metodologias BM, USEP, IPCC e REAL

Ano	BM	USEPA	IPCC	BETIM
	k=0,06 ano-1 Lo=170 m ³ /t	k=0,04ano-1 Lo=100 m ³ /t	k=0,05 ano-1 Lo=89,5m ³ /t	Vazão Real (m ³ /ano)
2002	253 750,50	97 585,28	67 550,26	335 648,16
2003	264 078,00	199 051,75	73 876,16	349 156,08
2004	271 473,00	300 961,25	79 836,54	358 932,24
2005	282 387,00	393 519,30	87 304,07	373 386,24
2006	298 095,00	529 759,37	96 885,59	394 147,44
2007	324 258,00	678 310,02	110 792,39	434 51,52
2008	379 287,00	908 118,15	136 239,15	508 202,64
2009	442 935,00	1 189 197,80	167 258,69	593 507,52
2010	476 187,00	1 411 398,07	189 034,44	629 616,24
2011	558 450,00	1 804 997,74	233 057,15	738 362,88
2012	595 600,00	2 078 827,30	261 340,00	787 611,60

Nos drenos observados, torna-se inviável verificar a vazão do biogás separadamente, devido às diferentes fases de decomposição da matéria orgânica. O biogás do aterro de Betim é coletado por uma rede composta por seis células sobrepostas e 256 drenos verticais interligados por tubos horizontais em forma de escama de peixe adaptadas aos coletores de biogás e chorume, com uma capacidade nominal atual de produção de 400 m³/h de biogás purificado e não utilizado. Os drenos verticais construídos de concretos perfurados e envoltos por britas, atravessam todo o perfil do aterro, desde o revestimento de fundo até a superfície do aterro.

Em resposta às diferentes metodologias utilizadas, o trabalho apresenta produção de metano diferenciado, quando se usam parâmetros para K e Lo, quando em comparação aos valores reais, calculados em 50% da vazão do biogás, dados estes fornecidos pelo laboratório responsável pela análise e cálculo de produção da vazão de metano do aterro sanitário de Betim.

Analisando as metodologias aplicadas na Figura 4, a metodologia apresentada pelo USEPA, para o período monitorado, 2002 a 2005, fornece quantidade de metano superior às obtidas pela aplicação das metodologias do BM e IPCC. O comportamento crescente da curva apresentada na Figura 4 indica o período que o aterro está recebendo lixo, pois a cada quantidade de lixo depositado, soma-se um novo valor até o final de 2012. A partir de 2012, o último ano de deposição de resíduo no aterro, ele passa a apresentar um decaimento em torno de 7,0 % da vazão a cada ano. Podemos ainda analisar e comparar que a geração de metano fornecida pela USEPA tem valores significativos em relação as demais metodologias.

Supondo que o aterro continua a receber resíduo por um período maior de tempo, podemos observar um valor intermediário às demais metodologias.

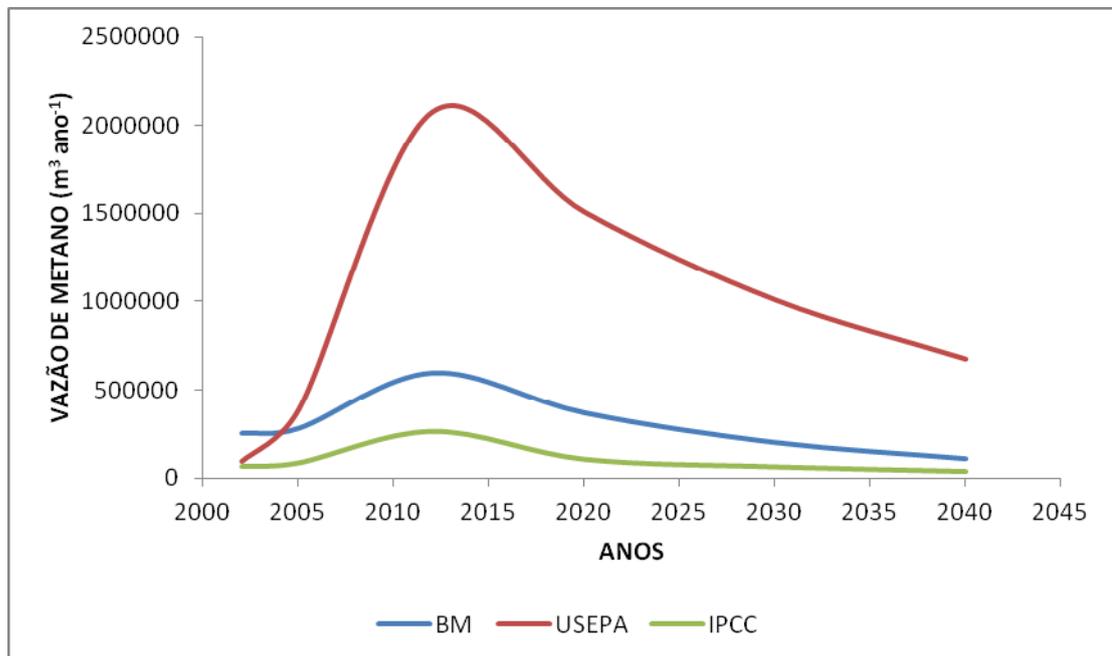


Figura 4. Geração de Metano – metodologias BM, USEPA e IPCC.

Um fator importante nos aterros é a taxa de recuperação do biogás pelo sistema de drenagem de gases. Este valor é da ordem de 75%, podendo chegar a 90%, ou menos de 50% em aterros mal planejados e operados (USEPA, 2008).

Nos anos de 2002 a 2005, a geração real de metano na CTR de Betim foi superior a todas as metodologias empregadas para a estimativa de geração de metano (Tabela 4 e Figura 4). Estes valores podem estar relacionados às condições climáticas, com maior temperatura e umidade relativa do ar observada em um país tropical como o Brasil, que aceleram a degradação da matéria orgânica, quando comparados aos países do hemisfério norte, onde foram desenvolvidas essas equações de estimativa. Outro fator são os valores atribuídos ao L_0 (potencial de geração do resíduo) e K (tempo de degradação do lixo).

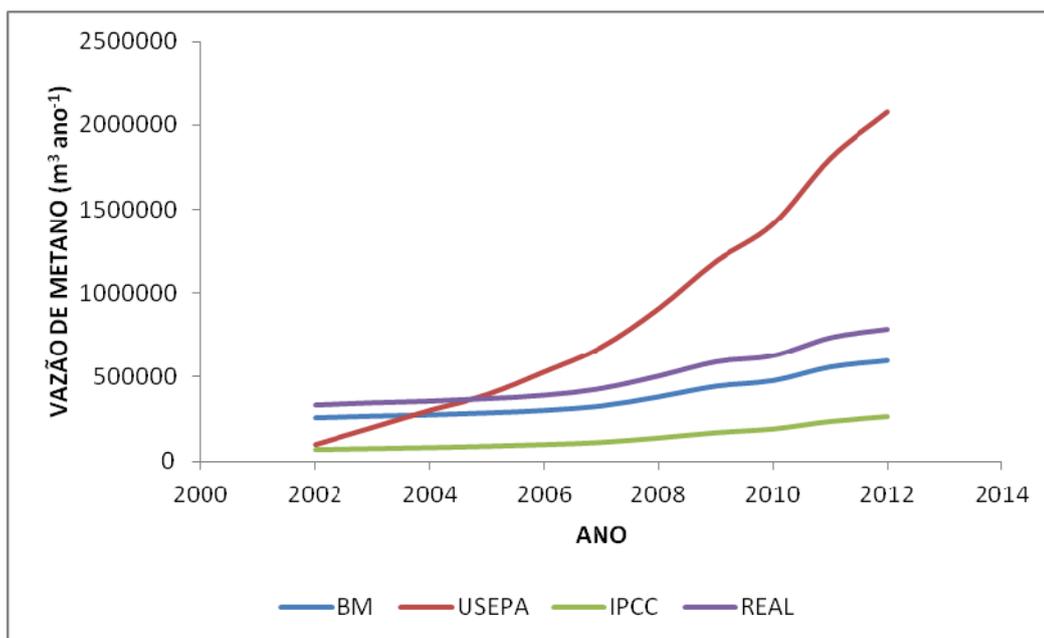


Figura 5 - Geração de Metano – metodologias BM, USEPA, IPCC e REAL

A partir de 2005 observou-se a tendência da curva USEPA apresentar um grande crescimento em relação à geração real de metano. A curva que mais se aproximou da geração real de metano foi a metodologia BM que, com alteração nos valores de $L_0 = 170 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton}_{\text{res}}$ e $K = 0,06 \text{ ano}^{-1}$, pode apresentar melhor ajuste para os valores observados no Aterro Sanitário de Betim.

Para que não ocorram riscos de incêndios e explosões no aterro sanitário, é necessário um investimento de novas tecnologias de captação e queima do biogás, amenizando o impacto ambiental e o aquecimento global.

4.5. Resultado obtenção de metano

Atualmente o aterro sanitário de Betim - MG recebe resíduos de uma população de 500.000 habitantes, gerando uma produção “per capita”, de 0,6 Kg/dia de resíduo, ou seja, quantidade (em peso) de lixo que cada habitante gera por dia, totalizando em média $600 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{h}$.

Conforme se pode observar no Quadro 4, em que se recomenda nova fórmula para o cálculo de metano, a metodologia fornecida pelo IPCC teve um aumento considerado na produção de metano e uma ótima estimativa para a geração de energia, por se tratar de lixo orgânico reciclado, uma vez que a fórmula utilizada é pela produção “per capita” obtida, ou seja, quantidade que cada indivíduo gera de lixo por dia.

Quadro 4. Cálculo da Produção de Metano para Betim e Região (2011)

$$\text{Prod.deCH}_4 \text{ (Gg/ano)} = (\text{Pop}_{\text{urb}} \times \text{DSD} \times \text{RSDf} \times \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{CODf} \times \text{F} \times 16/12 - \text{R}) \times (1 - \text{OX})$$

Prod.CH ₄	Kg/Nm ³	(500.000 hab) x 6 x 10 ⁻⁷ (Gg/dia.hab) x 365 (dias/ano) x 0,6] x 1 x 0,16 x 0,77 x 0,4 x 1,33 = 4.306.135,68 Kg/ano = 4.306,13 ton de CH ₄ / ano / Densidade do Metano
Vol. De CH ₄	Nm ³ /hr	4 306.135,68 / 0,716 = 6 014.155,97 Nm ³ / ano (dividido por 365 dias e por 24 horas) = 688,26m ³ /h

Quadro 5. Cálculo da Estimativa da Produção de Energia que deixa de ser Gerada para 2012.

ED (MWh/dia) = PD (ton CH ₄ /ano) x PC (GJ/ton CH ₄ x Ec x m = 4 316,92 x 50 x 0,278 x 0,28 = 16 801,45/365 = 46,00 MWh/dia.
--

Observa-se conforme no Quadro 4, que houve um elevado percentual na geração de metano, em face de a equação envolver a taxa de geração de resíduo sólido doméstico por habitante/dia, e a população atual, em relação à quantidade de resíduo sólido disponível no aterro. Podemos ainda salientar que a geração “per capita”, não isenta o percentual de lixo descartável, portanto o valor estimado da equação pode superar os valores da primeira equação, onde podemos estabelecer uma correlação entre o resíduo reciclado e a taxa de geração de resíduo sólido doméstico por habitante, aumentando assim o valor da geração de metano em relação às metodologias recomendadas pelo BM, USEPA e IPCC.

Vale ressaltar ainda que a operação de um aterro de resíduo é um processo muito dinâmico, pois a cada momento são depositadas novas quantidade de resíduos, interferindo nos diversos níveis de camadas (células). Assim, na mesma área de um aterro podem ocorrer diferentes fases de decomposição e obtenção de metano.

O aterro sanitário de Betim possui biogás suficiente para produção de energia elétrica, até o ano de 2040. Em consequência de seu fechamento em 2012, encerrando a deposição de lixo no aterro, terá capacidade de produção de biogás por mais 30 anos, perdendo, diariamente, produção suficiente de biogás para gerar 46 MWh/dia.

Os dados apresentados no Quadro 5 sugerem que o aterro sanitário de Betim adequadamente instalado pode gerar 4.316,92 ton. CH₄/ano, e pode gerar 46,00 MWh/dia, energia suficiente para ser utilizada dentro do próprio aterro.

Neste enfoque fica evidente que a geração estimada de energia elétrica de 46 MWh/dia produzida pelo aterro de Betim está compatível com a produzida nos principais aterros do Brasil.

O aterro de Campinas/SP em 2010 gerou energia de 58 MWh/dia (IBGE, 2010). Os aterros Bandeirantes, desde outubro de 2004, e São João, desde janeiro de 2008, produzem energia elétrica de 24 MWh/dia e 20 MWh/dia (ICLEI, 2009), energia suficiente para garantir o abastecimento de 800 mil moradores, ao mesmo tempo em que geram receita em créditos de carbono (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2010).

5. CONCLUSÕES

A utilização dos modelos matemáticos é viável para avaliar a produção de biogás produzido pelo aterro sanitário de Betim. O modelo mais próximo para estimar a produção de metano foi a metodologia proposta pelo Banco Mundial. O metano gerado pelo aterro tem o potencial para geração de 46 MWh/dia.

6. REFERÊNCIAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 10004. **Resíduos Sólidos- Classificação**, Brasil, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. NBR 8419. **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – procedimento**, Brasil, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA URBANA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS –ABRELP. **Panorama de resíduos sólidos no Brasil**. São Paulo, 2003. 189 p.

BAHR, T. *et al.* **Clean Development Mechanism** : tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões. [S.l.:s.n.], 2006.

BANCO MUNDIAL. **Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe**, 2003, 125f. Disponível em < http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas_access_po.htm > Acesso em 10 mar. de 2011.

BARLAZ, M.A. *et al.* Evaluation of a biologically active cover for mitigation of landfill gas emissions. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 18, p. 4891-4899, set. 2004.

BENDER, M.; CONRAD, R. Effect of CH₄ concentrations and soil conditions on the induction of CH₄ oxidation activity. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 27, n. 12, p. 1517-1527, dez. 1995.

BOECKX, P.; VAN CLEEMPUT, O.; VILLARALVO, I. Methane emission from a landfill and the methane oxidising capacity of its covering soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 28, n. 10-11, p. 1397-1405, out./nov. 1996.

CASSINI, S. T. (coord.). **Digestão de resíduos sólidos orgânicos e aproveitamento do biogás**. Rio de Janeiro: ABES, Rima - Projeto PROSAB, 2003. 210 p.

CENBIO. Centro Nacional de Referência em Biomassa. **Projeto Instalação e Testes de uma Unidade de Demonstração de Geração de Energia Elétrica a partir de Biogás de Tratamento de Esgoto – ENERGBIOG**. Relatório Técnico Final. São Paulo, 2005.
Disponível em: < <http://cenbio.iee.usp.br/publicacoes.htm> >, Acesso em 08 jul. 2011.

CUNHA, M. E. G. **Análise do Setor Ambiental no Aproveitamento Energético de Resíduos**: um estudo de caso do município de Campinas. 2010. Dissertação (Mestrado) - Planejamento de Sistemas Energéticos/Área Interdisciplinar. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, 2010.

EINOLA, J-K.M.; KARHU, A.E.; RINTALA, J.A. Mechanically-biologically treated municipal solid waste as a support medium for microbial methane oxidation to mitigate landfill greenhouse emissions. **Waste Management**, v. 28, n. 1, p. 97-111, jan. 2008.

ENSINAS, A. V., **Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta em Campinas – SP**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2003,

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Landfill Methane Outreach Program**, Disponível em < <http://www.epa.gov/lmop>>. Acesso em 28 abr. 2011.

EPA. **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: 2 mai. 2012.

FIRMO, A.L.B. **Análise numérica de aterros de resíduos sólidos urbanos**: calibração de experimentos em diferentes escalas, 2008. 138 f. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco, 2008.

Governo do Estado de São Paulo – Secretaria do Estado do Meio Ambiente. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Governo Federal – Ministério da Ciência e Tecnologia. Biogás Geração e Uso **Energético**. Disponível em: <<http://homologa.ambiente.sp.gov.br/biogas/software.asp>. Acesso em: 28 mai. 2012.

HAM, R. K.; MORTON A. B. **Measurement and Prediction of Landfill Gas Quality and Quantity in Sanitary Landfill: process, technology and environmental impact**. New York: Academic Press, 1999.

HILGER, H.; HUMER, M. Biotic landfill cover treatments for mitigating methane emissions. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 84, n. 1-2, p. 71-84, maio 2003.

ICLEI - Governos Locais pela Sustentabilidade, Secretariado para América Latina e Caribe **Manual para aproveitamento do biogás**. Escritório de projetos no Brasil, São Paulo, 2010. (aterros sanitários, v.1). Disponível em <<http://homologa.ambiente.sp.g>. Acesso em 28 mai. 2012.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC, 1996 a). **Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero**, versión revisada (Vol 2). Disponível em: <<http://www.ipccnggip.iges.or.jp/public/gl/spanish.htm> > Acesso em: 20 mar. 2011.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual** (Vol.3). Disponível em:< <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6> > Acesso 20 mar. 2011.

MACIEL, F.J.; JUCA J.F.T. **Avaliação Simplificada do Biogás no Aterro de Londrina/Pr. Relatório de Resultados** : Grupo de Resíduos Sólidos. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2009.

MACHADO, S, L,; L. R. B,; MACHADO, F. C. **Relatório final de Atividades de Convênio de Cooperação Técnica UFBA/BATTRE**. Salvador, 2005.

MCBEAN, E.A.; ROVERS, F.A.; FARQUHAR, G.J. **Solid Waste Landfill Engineering and Design**. New Jersey: Prentice Hall, 1995.

MERBACH JR., P. S. **Estudos de avaliação de metais pesados em percolado de aterro sanitário em função do tempo de disposição**, 1989. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 1989.

NIKEMA, J.; BRZEZINSKI, R.; HEITZ, M. Elimination of methane generated by biofiltration: a review. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 6, n. 4, p. 261-84, out. 2007.

PAES, R.F.C. **Caracterização do chorume produzido no Aterro da Muribeca**, 2003. 150 f.. Dissertação (Mestrado) - Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande – PB, 2003.

POHLAND, F.G; GOULD, J.P. **Fate of Heavy Metal During Landfill Stabilization of Solid Wastes Material with Leachate Recycle**. USA: Draft Final Report, 1986.

Prefeitura de São Paulo. **Cidade de São Paulo na COP 15 Copenhague**. 2009. Disponível em <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/meio_ambiente/noticias/?p=13141> Acesso em 18 abr. 2012.

REINHART, D.R., COOPER D.C. Flux chamber design and operation for the measurement of municipal solid waste landfill gas emission rates. **Air Waste Management Association**, p.1067-1070,1992.

SILVA *et al.* **Dimensionamento da Produção de Biogás a partir de resíduos residenciais, industriais e de matrizes suínas na Comunidade de Vila Paciência (RJ)**. Disponível em: <<http://www.gpi.ufrj.br/pdfs/artigos/DA%20SILVA,%20E.%20R.%;%20NAVARRO,%20L.%20L.%20N.,%20ALMEIDA,%20S.%20C.%20A.%20Dimensionamento%20da%20Producao%20de%20Biogas%2>>. Acesso em 18 abr. 2012

TCHOBANOGLIOUS, G.; SCHROEDER, E. D. **Water quality: biological treatment methods**. USA: Addison-Wesley Publishing Company, 1985. p. 595-675.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATECHANGE (UNFCCC), Disponível em < [http:// unfcc . int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf](http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf). Acesso em 16 abr. 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), AP 42 Section 2.4 – **Municipal Solid Waste Landfills, Related Information**(1996), Disponível em:< <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch02/related/c02s04.html>>. Acesso em 20 jan. 2012.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), **Municipal Solid Waste Landfills**, (1998) (Fórmula). Disponível em <<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s04.pdf>> . Acesso em: 20 jan. 2012.

WHALEN, S.C.; REEBURGH, W.S; SANDBECK, K.A. Rapid methane oxidation in a landfill cover soil. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 56, n. 11, p. 3405-3411, nov. 1990.

ZEHNDER, A.J.B.; BROCK, T.D. Anaerobic methane oxidation: occurrence and ecology. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 39, n. 1, p. 194-204, jan. 1980.