

## Sumário

1	INTRODUÇÃO .....	2
1.1	O desafio dos resíduos sólidos.....	2
1.2	Aterros Sanitários .....	3
1.3	O Efeito Estufa .....	5
1.4	Créditos de Carbono .....	7
2	OBJETIVOS.....	8
2.1	Objetivos Gerais.....	8
2.2	Objetivos Específicos .....	8
3	METODOLOGIA .....	9
4	REVISÃO DA LITERATURA.....	10
4.1	Mecanismos de Desenvolvimento Limpo .....	10
4.2	Legislação Ambiental .....	10
4.3	Formação do Biogás.....	12
4.3.1	Aspectos físico-químicos.....	12
4.3.2	Processos envolvidos .....	15
4.4	Possibilidade de uso, aplicação e destinação do biogás de aterros 18	
4.4.1	Uso direto do biogás .....	19
4.4.2	Geração de energia.....	19
4.5	Vantagens da utilização do metano.....	20
4.6	Métodos de estimativa de geração de biogás em aterros .....	21
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
5.1	Análise de Caso: Aterro Sanitário de Sete Lagoas .....	25
5.2	Cálculo de geração de biogás no Aterro Sanitário de Sete Lagoas 28	

5.2.1	Equação IPCC .....	28
5.2.2	Equação USEPA .....	29
5.3	Cálculo de geração de energia a partir da vazão do metano .....	31
5.3.1	Energia gerada com resultados da equação do IPCC.....	31
5.3.2	Energia gerada com resultados da equação da USEPA .....	32
5.4	Aproveitamento energético.....	33
6	CONCLUSÃO.....	37
7	REFERÊNCIAS.....	38

## **1 INTRODUÇÃO**

À partir de meados do século XX, a comunidade científica começa a se manifestar em relação a possíveis problemas ocasionados pelo crescimento da população, no que diz respeito ao crescimento do consumo de produtos industrializados, os métodos utilizados para sua fabricação e, conseqüentemente, a geração de resíduos (sólidos, líquidos e gasosos) e sua disposição.

De uma maneira geral, os resíduos sólidos vêm causando grandes preocupações para a sociedade, à medida em que esta vai se desenvolver e, conseqüentemente, produz cada vez mais lixo. A procura de alternativas para minimizar os impactos negativos causados pela geração de lixo tem sido amplamente discutida entre os pesquisadores.

Dentre as inúmeras possibilidades estudadas atualmente, destaca-se a geração de energia através da utilização de gases provenientes da decomposição de resíduos, que será abordada neste trabalho. Essa alternativa expande a vida útil das reservas de matéria prima e energia, na medida em que reduz a demanda por esses recursos, uma vez que viabiliza a utilização mais eficiente dos mesmos.

### **1.1 O desafio dos resíduos sólidos**

Qualquer atividade humana é por natureza geradora de resíduos, sejam sólidos, líquidos ou gasosos, os quais devem ser gerenciados corretamente visando à minimização de custos e redução do potencial de geração de impactos ambientais (MOTA, 1997).

Os resíduos sólidos são de grande complexidade e diversidade, podendo gerar inúmeros impactos negativos à atmosfera, solos, lençóis freáticos e todo ecossistema.

A destinação inadequada dada aos resíduos sólidos no Brasil é proveniente principalmente da falta de planejamento, de repasse de recursos ao setor e políticas públicas adequadas, apesar do tema ter merecido atenção cada vez maior por parte do poder público.

A redução de produção de resíduos é uma medida estratégica preventiva, aumentando o tempo de vida útil de aterros sanitários, e que pode vir a atenuar o problema em todo o país.

A coleta seletiva é uma importante ferramenta que vem sendo utilizada. Atualmente, inúmeros municípios brasileiros incentivam os setores produtivos e população a implantar essa medida.

## **1.2 Aterros Sanitários**

Segundo a norma ABNT NBR 8.419/1984, aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo que não causa danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, sendo obrigatória a cobertura diária dos resíduos com uma camada de terra ou se necessário em intervalos menores.

Essa técnica consiste na compactação dos resíduos no solo, dispendo-os em camadas que são periodicamente cobertas com terra ou outro material inerte, formando células, de modo que se alternem os resíduos e o material de cobertura (Barros et al, 1995).

A NBR 8.419 fixa todos os procedimentos necessários a uma correta elaboração do projeto um aterro sanitário, devendo-se obrigatoriamente apresentar:

- instalações de apoio;
- sistema de drenagem de água pluvial;
- sistema de coleta e tratamento de líquidos percolados (chorume) e de drenagem de gases formados pela decomposição da matéria orgânica presente no lixo;
- impermeabilização lateral e inferior, de modo a evitar a contaminação do solo e do lençol freático.

Para D'Almeida e Vilhena (2000), considerando os aspectos ambientais, o aterro sanitário é um método atraente e de menor custo para a comunidade, com poucos recursos financeiros e humanos, e que pode satisfazer as condições de preservação do meio ambiente.

### 1.3 O Efeito Estufa

Desde a Revolução Industrial, o lançamento de gases responsáveis pelo efeito estufa, como o dióxido de carbono, vem contribuindo para o aumento do aquecimento global. Desta forma, há algum tempo tem-se pesquisado a implementação de tecnologias que visam mitigar os impactos negativos em aterros sanitários, garantindo melhor funcionalidade, segurança e desempenho ambiental.

Uma alternativa para minimizar os problemas da escassez de energia e o aumento do efeito estufa é a utilização do biogás oriundo dos aterros sanitários para a produção energética. Esse aproveitamento, além de produzir energia, destina adequadamente o metano, gás produzido pela decomposição da matéria orgânica disposta nos aterros, um dos principais responsáveis pelo aquecimento global.

O biogás utilizado para a produção energética é basicamente produzido pela decomposição de resíduos orgânicos advindos do lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas, pecuária, lodo de esgoto, dentre outros. O biogás é usualmente composto por uma mistura de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis.

O inventário de produção de gás metano realizado pela Cetesb em 1999, resultado de um convênio com o Ministério de Ciências e Tecnologia, indica a possibilidade de estar disponível um montante que pode variar de 303 a 578 milhões de m<sup>3</sup> de gás metano por ano, tomando como referência apenas

13 grandes aterros, que se devidamente utilizados, possibilitaria a produção de 60 a 144 MW de energia elétrica.

Destinar o metano gerado pelo lixo ao uso energético apresenta uma vantagem adicional, pois tem um potencial de contribuição para o aumento do efeito estufa até 21 vezes superior ao do dióxido de carbono.

Diante disso, o presente trabalho está baseado em investigação documental. Sob perspectiva acadêmica é relevante examinar as limitações do aproveitamento do metano em aterros sanitários.

Os aterros sanitários representam oportunidades de geração ou recuperação de energia e produção de fertilizantes orgânicos (compostagem), que podem ser associados a um processo de reciclagem, com ganhos econômicos e ambientais pela matéria prima recuperada.

A geração de energia a partir do gás do lixo tem um significativo potencial de reduzir o risco de mudança do clima global. Os benefícios da substituição dos combustíveis fósseis e da consequente diminuição do impacto sobre mudanças climáticas podem ser comercializados no mercado internacional, na forma de créditos de carbono (emissões de carbono evitadas).

Além disso, os sistemas de recuperação dos gases do lixo podem reduzir o odor, os riscos de incêndios e explosões, além de representarem uma fonte de renda para o aterro sanitário a partir da venda do biogás.

#### **1.4 Créditos de Carbono**

Em dezembro de 1997 foi assinado o Protocolo de Quioto que é um tratado internacional com compromissos mais rígidos para a redução da emissão dos gases que provocam o efeito estufa, considerados, de acordo com a maioria das investigações científicas, como causa do aquecimento global.

O Protocolo de Quioto determina que países desenvolvidos signatários reduzam em média 5,2% das emissões de gases de efeito até o fim deste ano.

Visando atenuar possíveis perdas econômicas advindas do tratado, foi estabelecida flexibilização dos índices de redução, através da comercialização de créditos de carbono entre os signatários.

Os créditos de carbono ou Redução Certificada de Emissões (RCE) são emitidos quando ocorre a redução de emissão de gases do efeito estufa. Foi convenicionado que uma tonelada de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) equivalente corresponde a um crédito de carbono. Este crédito pode ser negociado no mercado internacional.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivos Gerais**

O presente Trabalho tem como objetivo analisar o potencial de geração de energia com base na produção efetiva de metano resultante da degradação anaeróbia dos resíduos sólidos urbanos do município de Sete Lagoas.

### **2.2 Objetivos Específicos**

A partir dessa análise, objetiva-se sugerir adaptações a serem implantadas neste aterro, para que futuramente, o biogás gerado por seus resíduos possa ser utilizado para aproveitamento energético.

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia é aspecto de fundamental importância para qualquer trabalho científico. Esta ferramenta vem orientar a investigação, planejando ações e prevendo possíveis contratempos.

No trabalho em questão, a metodologia utilizada foi previamente definida em levantamento de dados prévios para definição do aterro a ser estudado, visita ao local escolhido, levantamento dados secundários através de consultas a sites, livros didáticos e outros documentos divulgados. Após esta etapa, o presente estudo foi elaborado.

## **4 REVISÃO DA LITERATURA**

### **4.1 Mecanismos de Desenvolvimento Limpo**

Esse item trata dos aspectos legais relacionados com a qualidade do ar, os aspectos normativos relacionados com a construção de aterros sanitários e o Protocolo de Quioto. Serão explicitados os mecanismos deste Protocolo que incentivam investimentos em projetos de MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) nos países em desenvolvimento baseados em energias alternativas que reduzam os GEE (Gases de Efeito Estufa), possibilitando a compra e venda de crédito de carbono resultantes dessa operação.

### **4.2 Legislação Ambiental**

Em relação à legislação ambiental vigente, no que se refere à análise prévia de projeto, implantação e operação de Aterros Sanitários, podemos citar:

- Resolução CONAMA 001/1986 – Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para avaliação de impactos ambientais;
- Resolução CONAMA 003/1990 – Dispõe sobre padrões e aspectos da qualidade do ar;
- Resolução CONAMA 005/1993 – Dispõe sobre o tratamento de resíduos gerados em estabelecimentos de saúde, portos e aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários;

- Resolução CONAMA 237/1997 – Estabelece norma geral sobre licenciamento ambiental, competências, listas de atividades sujeitas a licenciamento, etc;
- Deliberação Normativa COPAM 007/1981 – Fixa normas para a disposição de resíduos sólidos;
- Deliberação Normativa COPAM 009/1993 – Estabelece normas e procedimentos para licenciamento de obras de saneamento;
- Deliberação Normativa COPAM 052/2001 – Convoca municípios para o licenciamento ambiental de sistema adequado de disposição final de lixo e dá outras providências;
- Deliberação Normativa COPAM 074/2004 – Estabelece critérios de porte e potencial poluidor de empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente no Estado de Minas Gerais;
- Lei 18.031/2009 – Institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos.

### **4.3 Formação do Biogás**

A formação do biogás em aterros sanitários se dá a partir da decomposição de resíduos orgânicos presentes no lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas, pecuária, lodo de esgoto, dentre outros. O biogás é usualmente composto por uma mistura de 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis. Segundo PECORA dependendo da eficiência do processo de produção, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de metano.

A formação e a taxa de geração dos principais constituintes do biogás de aterros sanitários são variáveis ao longo do tempo. Em condições normais, a taxa de decomposição atinge um pico entre o primeiro e segundo ano e diminui continuamente por alguns anos. (FREITAS, 2007).

#### **4.3.1 Aspectos físico-químicos**

Como a concentração de outros gases no biogás é relativamente pequena comparada ao  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ , utilizam-se como referência as propriedades físico-químicas desses dois componentes. Contudo, deve-se considerar para a escolha da tecnologia de operação, limpeza e combustão a presença dos outros gases em menor quantidade.

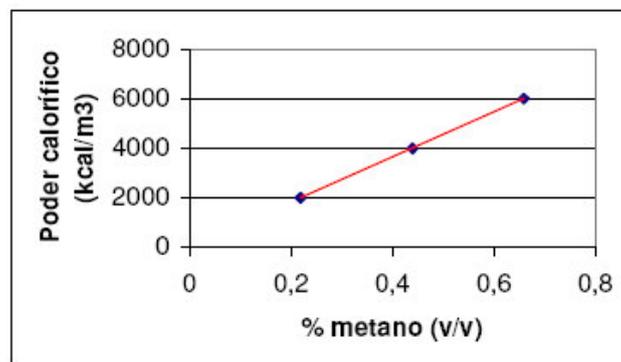
O metano é o principal componente do biogás quando utilizado como combustível. A presença de outras substâncias não combustíveis como água e dióxido de carbono, tornam o processo de queima menos eficiente. Isto ocorre pois essas substâncias que atuam com o combustível retêm uma boa

parte da energia gerada. Quanto maior a concentração de impurezas, menor será o poder calorífico do biogás.

Outra característica importante é a umidade, que influencia diretamente a temperatura da chama, diminui o poder calorífico e os limites de inflamabilidade. O volume específico também deve ser considerado quando se deseja a manipulação do gás para armazenamento e utilização futura.

Estudos mostram que a quantidade de metano presente no biogás aumenta seu poder calorífico, já que o CO<sub>2</sub> é a forma mais oxidada do carbono não podendo ser queimado.

O gráfico a seguir apresenta o poder calorífico do biogás (kcal/m<sup>3</sup>) de acordo com o percentual de metano.



**Gráfico 01:** Relação entre o poder calorífico do biogás e porcentagem de metano em volume.

**Fonte:** Alves, 2000.

Segundo FILHO (2005), a capacidade de um aterro gerar gás vai depender de muitos fatores como, por exemplo, a composição do resíduo, umidade,

pH, entre outros. Os fatores que afetam a geração de biogás são descritos a seguir:

a) Composição do resíduo: principal variável em relação à produção de biogás. Quanto maior a fração orgânica de resíduos, maior será a produção de metano.

b) Umidade: variável também extremamente importante na geração de biogás, pois a água interfere diretamente nos processos de fermentação anaeróbia e na mistura de substâncias solúveis. Novamente, quanto maior a umidade, maior a produção de biogás.

c) Granulometria: variável referente à superfície de contato das partículas do resíduo, que também contribui para o aumento da geração de biogás.

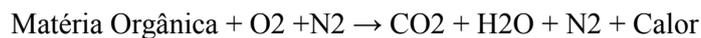
d) pH: fator limitante para a geração de metano através da decomposição de lixo. Faixa ótima de pH entre 6 e 8;

e) Temperatura: variável que determina, entre outros, a atividade metabólica dos microorganismos que decompõe o lixo. Ressalta-se, neste caso, que o gás gerado atinge até 60° C em função da atividade constante de decomposição nos aterros.

## 4.3.2 Processos envolvidos

### 4.3.2.1 *Processo aeróbio*

A decomposição aeróbia inicia depois da disposição do lixo no aterro sanitário, enquanto o oxigênio está presente, ocorrendo a degradação dos resíduos pelos microorganismos naturais. A decomposição aeróbia produz dióxido de carbono e libera calor. A expressão a seguir mostra outros gases que são formados neste processo:



Alguns fatores podem influenciar na decomposição aeróbia como a técnica de compactação, o tipo de cobertura, a composição do resíduo, a temperatura e a umidade ambiente e também a do resíduo.

### 4.3.2.2 *Processo anaeróbio*

O processo de geração de biogás nos aterros sanitários acontece quando não há a presença de oxigênio em um processo de fermentação anaeróbia, onde resulta a produção de gás metano. O metano é emitido na atmosfera devido à diferença de pressão através dos drenos, por trincas ou pela superfície de cobertura, quando esta não foi bem vedada.

Segundo CEPEA, 2004, o processo da degradação anaeróbia é muito lento, podendo produzir gases por mais de 30 anos. Neste período, as formações e as quantidades gasosas são diferenciadas, dependendo das fases da degradação anaeróbia do resíduo.

O processo anaeróbico é dividido em quatro fases, de acordo com as bactérias presentes em cada fase (CEPEA, 2004):

**Fase Acidogênica:** é a fase inicial, produzida por enzimas celulares, que decompõem a matéria orgânica formando compostos mais simples, como ácidos solúveis (ácidos graxos, aminoácidos e açúcares). Os subprodutos formados são principalmente água, hidrogênio e dióxido de carbono. As bactérias presentes são as *Clostridium* y *Bacillus*. Essa fase pode ser representada pela seguinte expressão química:

Matéria Orgânica + Bactérias Acidogênicas  $\rightarrow$  CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + ácidos e açúcares

A duração da fase acidogênica é de algumas semanas, finalizando com o pico de produção de CO<sub>2</sub> (chegando a cerca de 90%) e H<sub>2</sub> (que chega a alcançar a faixa de 20%).

**Fase Metanogênica instável:** é a segunda fase do processo anaeróbico, que ocorre na presença de microorganismos normalmente presentes no solo. As bactérias responsáveis são as *Methanobacterium Brvanti* y *Methanosarcina Barkeri*, que transformam os ácidos orgânicos e o CO<sub>2</sub> em metano. A expressão química é:

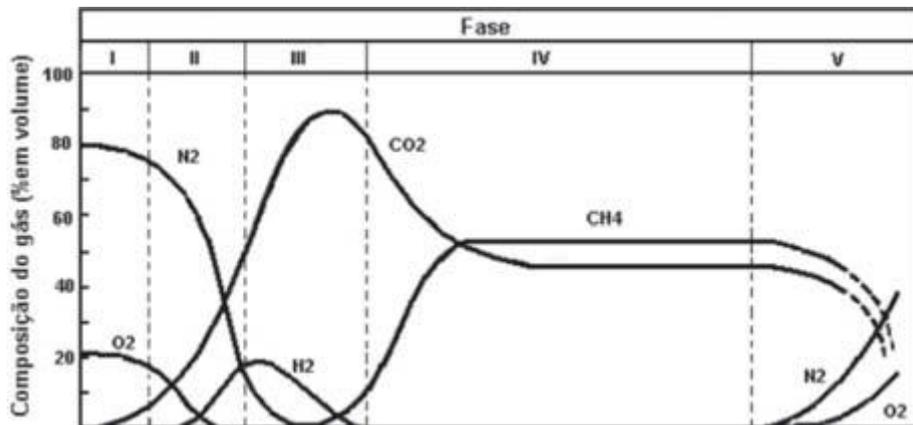
Ácidos Orgânicos + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub> + Bactérias Metanogênicas  $\rightarrow$  CH<sub>4</sub> + H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub>

O período de incremento da formação de metano é de seis meses a dois anos, com produção de metano entre 50% e 60% da composição do biogás, gerando adicionalmente CO<sub>2</sub> e traços de outros gases.

**Fase Metanogênica estável:** é a fase mais longa, estendendo-se por décadas. A composição básica é de cerca de 60% de metano, 40% de CO<sub>2</sub> e pequenas frações variáveis de outros gases, só sofrendo grandes variações em caso de perturbações do equilíbrio de fatores como umidade, cobertura, etc.

**Fase final:** ocorre após várias décadas com o decréscimo da porcentagem de metano na composição do biogás até que se torne desprezível, praticamente esgotando-se o material degradável nas condições do aterro. Nota-se a ocorrência de um material orgânico remanescente, ainda biodegradável, mas que apenas voltará a fermentar em condições diferentes às do aterro, como se verificadas alterações estruturais ou mudanças na natureza do local.

O gráfico 2 demonstra a produção dos componentes do biogás em relação ao tempo.



**Gráfico 02** - Produção dos componentes do biogás em relação ao tempo.

**Fonte:** RCE, 2005.

#### 4.4 Possibilidade de uso, aplicação e destinação do biogás de aterros

O gás metano, principal constituinte do biogás, por ser um combustível considerado abundante e de custo processo de produção relativamente baixo (por existir em qualquer lixão ou aterro sanitário), se mostra como uma importante alternativa para a complementação no suprimento da demanda de combustíveis derivados de petróleo. Além disso, ao utilizá-lo para algum fim, evita-se que o seja liberado diretamente na atmosfera e contribua para o aumento do efeito estufa.

O metano pode ser utilizado para produção de energia útil como eletricidade, vapor, combustível para caldeiras ou fogões, combustível veicular, ou para abastecer gasodutos com gás de qualidade.

Para sua utilização, existem alguns meios que maximizam seu potencial energético. As mais importantes são o uso direto do gás e a geração de energia.

A escolha da melhor alternativa para a utilização do metano em um aterro pode variar de acordo com características técnicas e de custos.

#### **4.4.1 Uso direto do biogás**

O uso mais simples e de maior custo-efetividade do gás do lixo é como combustível de média capacidade térmica para caldeiras, uso em processos industriais (operações de secagem, fornos, produção de cimento e asfalto), ou em equipamentos de baixa capacidade térmica (geladeira, ar condicionado, etc.). Através de gasodutos, o gás é transportado diretamente para um consumidor próximo e será utilizado em substituição ou complemento do combustível tradicionalmente usado. Somente baixa remoção de condensado e um tratamento de filtração são requeridos podendo ser necessárias pequenas modificações nos equipamentos de combustão existentes.

#### **4.4.2 Geração de energia**

O maior uso do gás do lixo, atualmente, é de geração de energia elétrica que pode ser utilizada no abastecimento do próprio aterro sanitário.

No entanto, além da simples produção de eletricidade, pode-se produzir simultaneamente energia térmica (processo denominado cogeração), o que elevaria a eficiência de 20 a 50% para cerca de 80% de aproveitamento da

energia contida no combustível. Esta pode ser usada localmente para aquecimento, refrigeração, entre outras utilidades.

#### **4.5 Vantagens da utilização do metano**

A utilização do gás metano proporciona várias vantagens em relação a outros combustíveis, principalmente em relação à segurança. Algumas das principais vantagens são:

- Possui densidade inferior ao ar, logo em caso de vazamento, ele rapidamente se dispersa na atmosfera, o que evita a perigosa formação de poças, (característica de combustíveis líquidos como: álcool, gasolina, diesel).
- Alto limite de inflamabilidade do metano, 5 a 15%, o que significa que, em comparação com outros gases, precisa de um volume maior em mistura com o ar para que haja combustão.
- Temperatura mínima de acendimento (537° C) maior que de outros combustíveis (gasolina 280° C e GLP 365° C), logo para ocorrer a ignição espontânea (sem auxílio de calor externo) a temperatura ambiente deve estar no mínimo citado.

Devido a estas propriedades, a possibilidade de incêndios ou explosões em caso de vazamento do gás se torna consideravelmente pequena, que não é o caso de combustíveis líquidos.

#### **4.6 Métodos de estimativa de geração de biogás em aterros**

Segundo CETESB/SMA (2003), existem diferentes métodos para calcular a parcela de metano presente na geração do biogás, desde aqueles que apresentam aproximação pouco confiável, considerando somente a quantidade de resíduo sólido doméstico disposto no aterro, até métodos que consideram a cinética de geração de biogás em função de três tipos importantes de parâmetros, que são as condições climáticas locais, a concentração de nutrientes no solo e a composição do resíduo.

Algumas metodologias para estimativas teóricas da produção de gás metano em locais de deposição de resíduos sólidos urbanos são facilmente encontradas na literatura. Esses métodos variam em suas considerações, em sua complexidade e na quantidade de dados de que necessitam. Uma das metodologias adotadas de fácil aplicação foi desenvolvida pelo IPCC (International Panel on Climate Change), conforme a equação (1), a seguir, que envolve a estimativa da quantidade de carbono orgânico degradável presente no lixo, calculando assim a quantidade de metano de acordo com a quantidade de lixo depositada.

Neste caso, ressalta-se que é necessário que se colete dados estatísticos sobre a população local e produção per capita de lixo. Caso não haja dados disponíveis para o cálculo na região, poderão ser usados dados padronizados fornecidos pelo IPCC (International Panel on Climate Change), podendo interferir na confiabilidade dos resultados.

$$Q_{CH_4} = \text{Popurb} \times \text{Taxa RSD} \times \text{RSDf} \times L_0 \quad (1)$$

Sendo:

$Q_{CH_4}$ : metano gerado ( $m^3CH_4$ /ano)

Popurb: população urbana (habitantes)

Taxa RSD: taxa de geração de resíduos sólidos domiciliares por habitante por ano (kg de RSD/habitante x ano)

RSDf: fração de resíduos sólidos domésticos que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos [%]

$L_0$ : potencial de geração de metano do lixo (kg de  $CH_4$ /kg de RSD)

O valor de  $L_0$  (produção total de metano), como já discutido, depende da composição do resíduo e, em particular, da fração de matéria orgânica presente. O valor de  $L_0$  é estimado pelo conteúdo de carbono do resíduo, na fração de carbono biodegradável e num fator de conversão estequiométrico. Para facilitar os cálculos, utiliza-se o valor aproximado de 170  $m^3$  de metano para cada tonelada de resíduos doméstico (CEPEA, 2004).

A maior compactação do resíduo não tem efeito direto no parâmetro de  $L_0$ . No entanto, a compactação e a densidade do lixo têm um efeito direto na massa de lixo num dado volume e, portanto, no potencial de quantidade de biogás que pode ser produzido durante algum tempo, bem como nas

características de desempenho dos sistemas que são necessários para coleta do produto (Mendes, 2005).

Para maior confiabilidade dos cálculos desenvolvidos neste Trabalho, optou-se por comparar os resultados obtidos através da equação do IPCC com os resultados obtidos com a equação (2) desenvolvida pela Agência Americana de Proteção Ambiental (USEPA), também recomendada para a elaboração de inventários, listada a seguir:

$$Q_{CH_4} = \text{População} \times \text{Taxa RSD} \times \text{RSDf} \times 0,45 \times F \quad (2)$$

Sendo:

$Q_{CH_4}$  = metano gerado [ $m^3$ /ano];

População = número de habitantes atendidos pelo aterro (habitantes);

Taxa RSD = taxa de geração de resíduos sólidos por habitante por ano (kg RSD/habitantes x ano)

RSDf = fração de resíduos sólidos coletados que é depositada nos LDRS (%);

0,45 = volume de biogás gerado por 1kg de resíduo sólido ( $m^3$  biogás/kg RSD);

F = fração de metano no biogás (%).

As metodologias apresentadas são uma aproximação que serve para orientação e prévia análise de viabilidade econômica de instalação de equipamentos para coleta e geração de energia através do biogás, pois calculam a produção desta matéria prima em função de dados do Censo sem levar em conta a cinética de geração do biogás pelos resíduos (CETESB/SMA, 2003).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Análise de Caso: Aterro Sanitário de Sete Lagoas

O Aterro Sanitário de Sete Lagoas foi implantado no ano de 2009, tendo sua operação iniciada em 13/12/2011, após obtenção da Licença de Operação nº285/2011, emitida pela URC-COPAM Rio das Velhas.



**Foto 01:** Entrada do Aterro Sanitário de Sete Lagoas

**Fonte:** Autor, 2012

Localizado em uma área de 23 hectares, ao lado do antigo lixão municipal, o Aterro atende 100% da população urbana, tendo sido projetado de modo a

ter sete parcelas de aproximadamente cinco metros de altura, com vida útil estimada em 12 anos (até 2023).

Diariamente recolhidos, os resíduos sólidos domésticos são enviados ao Aterro, passam pela plataforma de pesagem, sendo posteriormente dispostos, compactados e cobertos por camadas de terra. Atualmente não há qualquer separação das frações recicláveis e orgânicas do lixo.



**Foto 02:** Compactação do lixo.

**Fonte:** Autor, 2012

Nestes locais, estão localizados os drenos de chorume e gás em forma de espinhas de peixe, sendo que este primeiro passa por tratamento em lagoas anaeróbias e facultativas, e o segundo somente é queimado sem qualquer outro tipo de aproveitamento.



**Foto 03:** Dreno de queima de gases

**Fonte:** Autor, 2012



**Foto 04:** Vista geral do Aterro: Compactação do lixo, lagoas de tratamento de chorume e drenos de queima de gases.

**Fonte:** Autor, 2012

## 5.2 Cálculo de geração de biogás no Aterro Sanitário de Sete Lagoas

Os cálculos sobre a geração do metano no Aterro Sanitário de Sete Lagoas foram realizados de acordo com as referências estudadas, utilizando-se duas fórmulas que apresentaram maior adequação em relação às informações obtidas.

### 5.2.1 Equação IPCC

Pela equação do IPCC (International Panel on Climate Change, 1996) obtém-se a vazão do metano através da multiplicação da população, taxa de resíduo sólido domiciliar, fração de resíduo sólido doméstico e do potencial de geração do metano, obtendo-se assim o resultado em m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> / ano.

$$Q_{CH_4} = \text{Popurb} \times \text{TaxaRSD} \times \text{RSDf} \times \text{L0}$$

Para cada elemento foi usada uma diferente referência. A estimativa de aterramento de lixo foi disponibilizada pela própria Prefeitura Municipal, (equivalente a **Popurb x TaxaRSD**).

A fração de resíduos sólidos domésticos (RSDf) foi baseada apenas na taxa de resíduos sólidos urbanos, sendo 1 na equação. O potencial de geração de metano do lixo (L0) é de 170 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> / t de resíduo (CEPEA, 2004) para os aterros domésticos.

Sendo assim, temos para o ano de 2012:

$$Q_{CH_4} \text{ 2012} = 47.450,00 \text{ (ton)} \times 0,17$$

$$Q_{CH_4} 2012 = 8.066.500,00 \text{ m}^3$$

Utilizando a mesma metodologia de exploração comercial tem-se na tabela a seguir a geração de gás por ano e sua acumulação até 2023.

ANO	População Atendida (100%)	KG de Resíduos (dia)	KG de Resíduos (ano)	M <sup>3</sup> METANO (mês)	M <sup>3</sup> METANO (ano)	M <sup>3</sup> METANO (acumulados)
2012	220.750	132.450	48.344.171	684.876	8.218.509,10	16.285.009,10
2013	222.957	133.774	48.827.613	691.725	8.300.694,19	24.585.703,29
2014	225.187	135.112	49.315.889	698.642	8.383.701,13	32.969.404,42
2015	227.439	136.463	49.809.048	705.628	8.467.538,14	41.436.942,56
2016	229.713	137.828	50.307.138	712.684	8.552.213,52	49.989.156,08
2017	232.010	139.206	50.810.210	719.811	8.637.735,66	58.626.891,74
2018	234.330	140.598	51.318.312	727.009	8.724.113,01	67.351.004,75
2019	236.673	142.004	51.831.495	734.280	8.811.354,14	76.162.358,90
2020	239.040	143.424	52.349.810	741.622	8.899.467,69	85.061.826,58
2021	241.431	144.858	52.873.308	749.039	8.988.462,36	94.050.288,95
2022	243.845	146.307	53.402.041	756.529	9.078.346,99	103.128.635,93
2023	246.283	147.770	53.936.062	764.094	9.169.130,46	112.297.766,39

**Tabela 01:** Estimativa de geração de biogás no Aterro Sanitário de Sete Lagoas utilizando-se a metodologia do IPCC

### 5.2.2 Equação USEPA

Outra equação que pôde utilizada com base nos dados obtidos foi desenvolvida pela USEPA e geralmente é recomendada para a elaboração de inventários.

$$Q = \text{População} \times \text{TaxaRSD} \times \text{RSDf} \times 0,45 \times F$$

Há nessa equação somente uma variável não utilizada pela equação anterior que é a fração de metano no biogás (F), dada em %, que de acordo com

dados do CEPEA, 2004 equivale a 50 % de metano no biogás liberado do aterro.

Sendo assim, tem-se:

$$Q_{CH_4} 2012 = 47.450.000 \text{ (kg)} \times (0,45 \times 0,5)$$

$$Q_{CH_4} 2012 = 10.676.250,00 \text{ m}^3$$

Utilizando a mesma metodologia de exploração comercial tem-se na tabela a seguir a geração de gás por ano e sua acumulação até 2023.

ANO	População Atendida (100%)	KG de Resíduos (dia)	KG de Resíduos (ano)	M <sup>3</sup> METANO (mês)	M <sup>3</sup> METANO (ano)	M <sup>3</sup> METANO (acumulados)
2012	218.564	130.000	47.450.000	889.688	10.676.250,00	10.676.250,00
2013	220.750	132.450	48.344.171	906.453	10.877.438,51	21.553.688,51
2014	222.957	133.774	48.827.613	915.518	10.986.212,90	32.539.901,41
2015	225.187	135.112	49.315.889	924.673	11.096.075,03	43.635.976,43
2016	227.439	136.463	49.809.048	933.920	11.207.035,78	54.843.012,21
2017	229.713	137.828	50.307.138	943.259	11.319.106,13	66.162.118,34
2018	232.010	139.206	50.810.210	952.691	11.432.297,19	77.594.415,53
2019	234.330	140.598	51.318.312	962.218	11.546.620,17	89.141.035,70
2020	236.673	142.004	51.831.495	971.841	11.662.086,37	100.803.122,07
2021	239.040	143.424	52.349.810	981.559	11.778.707,23	112.581.829,30
2022	241.431	144.858	52.873.308	991.375	11.896.494,30	124.478.323,61
2023	243.845	146.307	53.402.041	1.001.288	12.015.459,25	136.493.782,85

**Tabela 02:** Estimativa de geração de biogás no Aterro Sanitário de Sete

Lagoas utilizando-se a metodologia da USEPA

### 5.3 Cálculo de geração de energia a partir da vazão do metano

Para estimativa do potencial de geração de energia no Aterro, é necessário obter-se primeiro o cálculo da potência disponível na queima do mesmo. Como foram encontradas duas vazões de metano acumuladas no ano de 2012, por duas fórmulas diferentes, será calculada energia para ambos resultados, de acordo com as seguintes equações:

$$P_x = [(Q_x \times P_c (\text{metano}) / 31.536.000) \times E_c (k / 1000)];$$

$$E_{\text{disponível}} = P_x \times [1 / (365 \times 24)]$$

Onde  $P_c$  é o poder calorífico do metano, equivalente a 35.530.000 J / m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>, o  $E_c$  é a eficiência de coleta dos gases, que sugerida pelo CETESB é 75% e o  $k$  que é um dado, de valor adimensional 1000.

#### 5.3.1 Energia gerada com resultados da equação do IPCC

Como a vazão estimada no ano de 2012 é igual a 8.066.500,00 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> obtém-se os seguintes valores de potência e energia:

$$P_x (2012) = [(8.066.500,00 \times 35.530.000 / 31.536.000) \times 0,75 (1000 / 1000)]$$

$$P_x (2012) = 6.816.085,00 \text{ kW}$$

$$E_{\text{disponível}} (2012) = 6.816.085,00 \times [1 / (365 \times 24)]$$

$$E_{\text{disponível}} (2012) = 779 \text{ kWh ou } 560.880 \text{ kWh/mês}$$

$$E_{\text{disponível}} (2023) = 884 \text{ kWh ou } 636.480 \text{ kWh/mês}$$

Energia gerada acumulada (2023) = 94.890.117 kW

Estes valores , no entanto, devem ser ajustados conforme a capacidade e eficiência de conversão do biogás em energia elétrica. Segundo Ferling (2003), para equipamentos “ciclo Otto”, esta equivale a 34%. Sendo assim, a energia acumulada até 2023, efetivamente transformada, equivale a 32.262.639,78 kW.

### **5.3.2 Energia gerada com resultados da equação da USEPA**

Como a vazão estimada no ano de 2012 é igual a 10.676.250 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> obtém-se os seguintes valores de potência e energia:

$$P_x (2012) = [(10.676.250 \times 35.530.000 / 31.536.000) \times 0,75 (1000 / 1000)]$$

$$P_x (2012) = 9.021.289,00 \text{ kW}$$

$$\text{Edisponível (2012)} = 9.021.289,00 \times [1 / (365 \times 24)]$$

$$\text{Edisponível (2012)} = 1.030 \text{ kWh ou } 741.600 \text{ kWh/mês}$$

$$\text{Edisponível (2023)} = 1.159 \text{ kWh ou } 834.480 \text{ kWh/mês}$$

$$E \text{ gerada acumulada (2023)} = 115.335.428 \text{ kW}$$

Novamente corrigindo estes valores segundo Ferling (2003), temos a energia acumulada em 2023 equivalente a 39.214.045,52 kW.

#### 5.4 Aproveitamento energético

Calculada a capacidade de geração de metano no Aterro, deve-se seguir à análise de possíveis utilizações do mesmo. No caso deste Trabalho, a hipótese escolhida foi a de verificação de possibilidade de fornecimento de energia elétrica ao próprio local e domicílios próximos.

A tabela a seguir apresenta a relação de equipamentos e estimativa de consumo no Aterro, através de dados obtidos com a empresa responsável por sua operação.

EQUIPAMENTOS	QUANTIDADE	CONSUMO ESTIMADO
Geladeira	01	40 kWh/mês
Computador	03	45 kWh/mês
Televisão	03	45 kWh/mês
Ar Condicionado	02	260 kWh/mês
Microondas	01	15 kWh/mês
Lâmpadas (60 w)	20	290 kWh/mês
Postes	10	300 kWh/mês
Refletores	02	150 kWh/mês
<b>Total</b>		<b>1.145 kWh/mês</b>

**Tabela 3:** Gasto mensal de energia estimado no Aterro Sanitário de Sete Lagoas

**Fonte:** Prefeitura Municipal de Sete Lagoas e Eletrobrás, 2012

Já a tabela a seguir apresenta a estimativa de consumo mensal de energia em uma residência com quatro pessoas.

EQUIPAMENTOS	QUANTIDADE	CONSUMO ESTIMADO
Geladeira	01	40 kWh/mês
Computador	01	15 kWh/mês
Televisão	02	30 kWh/mês
Chuveiro	01	80 kWh/mês
Microondas	01	15 kWh/mês
Lâmpadas (60 w)	10	145 kWh/mês
Ferro de passar	01	3 kWh/mês
<b>Total</b>		<b>328 kWh/mês</b>

**Tabela 4:** Gasto mensal de energia estimado para uma residência.

**Fonte:** Eletrobrás, 2012

Utilizando-se um valor médio de energia disponível no Aterro, obtido através da geração do biogás pelas equações do IPCC e USEPA, tem-se:

Potencial de energia gerada até 2023 (média): 35.738.342,65 kW ou 248.162 kWh/mês. Dividindo-se este valor, por aqueles estimados de consumo no Aterro e em domicílios temos:

$(248.162 - 1.145)/328 = 753$  domicílios e o próprio aterro atendidos.

Continuando a análise, deve-se seguir à estimativa de custos de instalação do grupo gerador, comparando o custo de potência instalada com o custo da energia fornecida pela Cemig (Companhia Energética de Minas Gerais). Sendo assim, seguem os cálculos.

- Custo do kWh da Cemig em agosto de 2012: R\$0,62.

- Custo médio de geradores de energia a gás: R\$2.000,00 por kW instalado.

Neste caso, seria utilizado um gerador de 400 kW (faixa de potência disponível no mercado).

- Custo de energia elétrica fornecida pela Cemig, simulando-se o cenário de 248.162 kWh/mês até 2023:  $248.162 \times 144 \text{ (meses)} \times 0,62 = \text{R}\$22.155.903,36$  (valor obtido sem previsão de reajuste na tarifa de energia).

- Custo da instalação de um sistema gerador:  $\text{R}\$2.000,00 \times 400 \text{ kW} = \text{R}\$800.000,00$ .

Sendo assim, a economia seria em torno de:  $\text{R}\$22.155.903,36 - \text{R}\$800.000,00 = \text{R}\$21.355.903,36$ .

Utilizando a mesma metodologia, para instalação de um sistema gerador para abastecimento apenas do Aterro Sanitário, tem-se:

- Custo da energia elétrica fornecida pela Cemig:  $1.145 \text{ kWh/mês} \times 144 \text{ (meses)} \times \text{R}\$0,62 = \text{R}\$102.225,60$ .

- Custo da instalação de um sistema gerador:  $\text{R}\$2.000,00 \times 2 \text{ kW} = \text{R}\$4.000,00$ .  
Neste caso, calcula-se um coeficiente de segurança para as adaptações necessárias em torno de 50%, elevando o valor final para  $\text{R}\$6.000,00$

Sendo assim, a economia seria em torno de:  $\text{R}\$102.225,60 - \text{R}\$6.000,00 = \text{R}\$96.225,60$ .

Analisando-se os resultados obtidos conclui-se que a instalação do grupo gerador de baixa potência não só é viável como em um cenário hipotético

economizaria em torno de R\$21.300.000,00 aos cofres da Prefeitura Municipal em um período de doze anos. No caso do aproveitamento apenas no próprio Aterro Sanitário, a economia ultrapassaria R\$95.000,00 no mesmo período. Além disto, haveria melhoria da imagem do empreendimento junto à comunidade, contando com a possibilidade de ações de marketing ambiental.

## 6 CONCLUSÃO

A conclusão da análise da hipótese de aproveitamento do biogás produzido no Aterro Sanitário de Sete Lagoas refere-se às diversas possibilidades de utilização deste insumo, tendo em vista seu aproveitamento energético e mitigação de impactos ambientais negativos advindos da queima e emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

Conforme discutido ao longo deste Trabalho, existem maneiras diversas para estimativa de produção de biogás em aterros sanitários, levando-se em consideração variáveis em relação às regiões onde estão construídos e tipos de resíduos nestes dispostos.

No entanto, todas as pesquisas de desenvolvimento destas metodologias convergem no sentido e senso comum da necessidade de aproveitamento destes insumos, uma vez que, apesar de abundantes, ainda são pouco utilizados à partir deste conceito.

Os resultados apresentados neste Trabalho identificam a real possibilidade de aproveitamento do biogás gerado no Aterro Sanitário de Sete Lagoas, tendo em vista não somente a economia gerada ao próprio empreendimento, como possibilidade de ações de marketing e educação ambiental, utilização e fornecimento de gás de qualidade, estando todas estas ações diretamente relacionadas à preocupação mundial em relação ao meio ambiente e ao conceito de desenvolvimento sustentável.

## 7 REFERÊNCIAS

ABREU, Fernando Castro de et al. **Biogás de Aterro para Geração de Eletricidade e Iluminação.** Disponível em < <http://cenbio.ice.usp.br/download/projetos/aterro.pdf> >. Acessado em 10/08/2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos **NBR - 8419.**  
AZEVEDO, Lizandra Prado de; LANDIM, Ana Luiza Pinto Ferreira. **O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários:unindo o inútil ao sustentável.** Disponível em < <http://www.bndes.gov.br/conhecimento/bnset/set2704.pdf> >. Acessado em 15/08/2012.

BANCO MUNDIAL. **Guia de Recuperação do Gás do Lixo em aterros municipais** BIOGÁS EM SUBSTITUIÇÃO A DERIVADOS DE PETRÓLEO. Disponível em < <http://www.demec.ufmg.br/disciplinas/ema003/gasosos/biogas/substitu.htm>>. Acessado em 21/09/2012.

BRAZ, José Adelino; SILVA, Celso Luiz da. **III-113 – Avaliação do potencial energético do biogás de aterro sanitário gerado pelos resíduos sólidos domésticos do município de Rio Claro.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 21º, 2000.

BUENO, Chris. Energia e lixo: problemas e soluções. Disponível em < <http://www.setorreciclagem.com.br> >. Acessado em 10/09/2012.

CALDERONI, Sabetai. Lixo e energia elétrica: a nova fronteira da economia ambiental. Disponível em < <http://www.reciclaveis.com.br/sabetai.htm> >. Acessado em 10/09/2012.