

3

Redução de emissões na disposição final

MDI
MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO
aplicado a resíduos sólidos

Redução de emissões na disposição final

2007



Ministério do
Meio Ambiente

Ministério das
Cidades



República Federativa do Brasil

Luiz Inácio Lula da Silva – Presidente

Ministério das Cidades

Marcio Fortes de Almeida – Ministro de Estado

Rodrigo José Pereira-Leite Figueiredo – Secretário Executivo

Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental - SNSA

Leodegar da Cunha Tiscoski – Secretário

Umberto Luiz Teixeira – Diretor de Desenvolvimento e Cooperação Técnica

Sergio Antonio Gonçalves – Diretor do Departamento de Articulação Institucional

Márcio Galvão Fonseca – Diretor do Departamento de Água e Esgotos

Ernani Ciríaco de Miranda – Coordenador do Programa de Modernização do Setor Saneamento (PMSS)

Ministério do Meio Ambiente

Marina Silva – Ministra de Estado

João Paulo Ribeiro Capobianco – Secretário Executivo

Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano

Eustáquio Luciano Zica – Secretário

Silvano Silvério da Costa – Diretor de Ambiente Urbano

Publicação

Coordenação Geral

Ana Lucia Nadalutti La Rovere

Superintendente de Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente do IBAM

Tereza Cristina Baratta

Diretora da Escola Nacional de Serviços Urbanos do IBAM

Coordenação Técnica

Karin Segala

Redação

Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk

Colaboração

Marcelo de Paula Neves Lelis – MCidades

Leandro Batista Yokomizo – MMA

Sílvia Martarello Astolpho – MMA

Coordenação Editorial

Sandra Mager

Design Gráfico e Diagramação

Paulo Felício

Revisão

Leandro Quarti Lamarão

O conteúdo desta publicação é de cunho autoral e não necessariamente expressa juízo do Governo brasileiro.

van Elk, Ana Ghislane Henriques Pereira

Redução de emissões na disposição final / Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk. Coordenação de Karin Segala – Rio de Janeiro: IBAM, 2007.

40 p. 21 cm. (Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos)

1. Resíduos sólidos. 2. Desenvolvimento sustentável. I. Instituto Brasileiro de Administração Municipal. II. Segala, Karin (Coord.). III. Série

CDD 628.4

SUMÁRIO

MENSAGEM DOS MINISTÉRIOS DAS CIDADES E DO MEIO AMBIENTE 7

APRESENTAÇÃO 9

1. INTRODUÇÃO 11

2. ATERROS SANITÁRIOS 13

2.1 Conceituação 13

2.2 Normas técnicas 13

2.3 Licenciamento ambiental 14

2.4 Projeto 15

2.5 Remediação de lixões 24

3. BIOGÁS E MDL 27

3.1 Composição do biogás 27

3.2 Fatores que afetam a produção de metano 29

3.3 Modelos para estimativa de geração de gás 31

3.4 Aproveitamento energético do biogás 33

GLOSSÁRIO DE SIGLAS 35

BIBLIOGRAFIA 37

MENSAGEM DOS MINISTÉRIOS DAS CIDADES E DO MEIO AMBIENTE

O Ministério das Cidades, por meio da Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (SNSA), em conjunto com o Ministério do Meio Ambiente, no âmbito da Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano (SRHU), e com o apoio do Banco Mundial e recursos disponibilizados pelo Governo do Japão, lançou o projeto Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) Aplicado à Redução de Emissões de Gases Gerados nas Áreas de Disposição Final de Resíduos Sólidos.

Este projeto tem como foco os 200 municípios mais populosos, que concentram mais da metade da população brasileira e são responsáveis por cerca de 60% do total de resíduos sólidos urbanos gerados no país. As atividades do projeto visam a contribuir para o desenvolvimento sustentável nas áreas urbanas, disseminando o MDL como ferramenta eficaz para a implementação de programas econômicos, sociais e ambientais. Destinam-se, também, ao aproveitamento do biogás proveniente de aterros para a geração de energia e à erradicação de lixões, contribuindo para a inclusão social e para a emancipação das famílias que vivem da catação dos resíduos sólidos, proporcionando benefícios nos aspectos ambientais e sociais envolvidos.

Além do **componente capacitação**, realizado por meio de cursos em âmbito regional e municipal e apoiado pela publicação desta série de manuais, intitulada Mecanismos de Desenvolvimento Limpo Aplicado a Resíduos Sólidos, o Projeto MDL também engloba outros três componentes:

- **Estudos de viabilidade da utilização do biogás gerado nas áreas de disposição final de resíduos sólidos urbanos** – conduzidos para os municípios selecionados entre aqueles 200 mais populosos;
- **Ação governamental** – unificação da agenda governamental para a implementação de políticas públicas voltadas para a gestão de resíduos sólidos, com enfoque na redução de emissões e no aproveitamento energético do biogás;
- **Unificação de base de dados e desenvolvimento do Portal Governamental** – desenvolvimento e integração de bases de dados e de sistemas de informação disponíveis no Governo Federal sobre o gerenciamento integrado de resíduos sólidos, incorporando o tema MDL.

Esta iniciativa está alinhada com as premissas constantes da Lei 11.445/2007, que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico, e contará com recursos aportados pelo Plano de Aceleração do Crescimento (PAC), que prevê investimentos para o fortalecimento da gestão integrada de resíduos sólidos, apoiando e promovendo a implantação de aterros sanitários, a erradicação de lixões, a coleta seletiva e a inclusão social de catadores.

Nesse sentido, também é compromisso do Governo Federal viabilizar a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelecerá normas e diretrizes para o gerenciamento dos diferentes tipos de resíduos, nos níveis municipal, estadual e federal.

Com o Projeto MDL, o Ministério das Cidades e o Ministério do Meio Ambiente trazem para discussão esse importante tema, buscando mais transparência e efetividade em suas ações e reforçando a determinação do Governo Federal em reduzir o lançamento de gases de efeito estufa e em enfrentar os impactos negativos decorrentes das mudanças climáticas.

Ministério das Cidades

Ministério do Meio Ambiente

APRESENTAÇÃO

O projeto *Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) Aplicado à Redução de Emissões de Gases Gerados nas Áreas de Disposição Final de Resíduos Sólidos* prevê a realização de estudos de viabilidade técnica, social, institucional e econômica para municípios brasileiros, associados ao desenvolvimento de um programa de capacitação em gestão integrada de resíduos sólidos com foco no MDL.

O IBAM foi a instituição parceira convidada a coordenar o **componente capacitação** do projeto, que compreende a realização de cursos voltados para técnicos e gestores municipais e a produção de cinco manuais.

Os manuais foram elaborados com o propósito de estreitar a relação entre a gestão dos resíduos sólidos urbanos e o MDL, na perspectiva de

destacar oportunidades de melhoria voltadas para a sustentabilidade dos sistemas municipais de manejo dos resíduos sólidos.

Os cinco manuais da série *Mecanismo de Desenvolvimento Limpo Aplicado a Resíduos Sólidos* são:

1. Gestão integrada de resíduos sólidos

Mostra que o sistema de gestão integrada, além de ser o caminho conseqüente para a melhoria do manejo dos resíduos sólidos urbanos, também é capaz de otimizar a viabilidade de comercialização de Reduções Certificadas de Emissões com habilitação ao MDL. Esse caminho consolida uma oportunidade para a sustentabilidade ambiental, social e econômica dos sistemas de gestão de resíduos sólidos nos municípios.

2. Conceito, planejamento e oportunidades

Descreve e analisa os objetivos do Protocolo de Quioto e do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, incluindo o detalhamento das etapas de um projeto, especificando as metodologias de cálculo de créditos de carbono relacionadas à gestão de resíduos sólidos existentes e as aprovadas, os modelos institucionais adequados para o projeto e os investimentos e custos estimados para a sua implementação. Apresenta ainda as estratégias para a viabilização de projetos, os riscos, as vantagens e os benefícios ambientais, sociais e econômicos.

3. Redução de emissões na disposição final

Apresenta a forma mais adequada para a disposição final de resíduos sólidos urbanos: os aterros sanitários. Descreve as normas existentes, os procedimentos para o licenciamento ambiental, os elementos de projetos exigidos, o monitoramento ambiental e geotécnico dos sistemas de disposição final de resíduos sólidos, e a remediação dos lixões. Trata ainda do biogás de aterros e dos modelos mais empregados nas metodologias de projetos aplicados ao MDL.

4. Agregando valor social e ambiental

Aborda as oportunidades sociais que se abrem para catadores de materiais recicláveis e para a população residente no entorno dos locais de disposição final, a partir de projetos sobre resíduos sólidos no âmbito do MDL. Além disso, apresenta as contribuições para o desenvolvimento sustentável do país hospedeiro em que os projetos serão implementados e sua convergência com outras agendas e compromissos internacionais.

5. Diretrizes para elaboração de propostas de projetos

Apresenta o conjunto de conhecimentos gerais necessários para a elaboração de propostas de projeto em função de oportunidades visualizadas junto a entidades financiadoras. Oferece ainda informações sobre a elaboração de projetos na área de resíduos sólidos urbanos com vistas à redução da emissão de gases de efeito estufa no âmbito do MDL.

1

INTRODUÇÃO

No Brasil, dentre as atribuições dos municípios, está a de coletar e dispor o seu lixo adequadamente. Por várias razões, como escassez de recursos, deficiências administrativas e falta de visão ambiental, na maioria dos casos, os resíduos são vazados em locais inapropriados, o que provoca degradação do solo, contaminação dos rios e lençóis freáticos, por meio do chorume, e poluição atmosférica, devido à liberação do biogás.

Resultante da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, o biogás é rico em metano (CH_4). Esse gás tem grande potencial combustível e é um contribuinte antrópico significativo para o aquecimento global. Como indicado no Manual 2, estudos recentes indicam que, em um horizonte de

100 anos, o poder de aquecimento global do metano é 21 vezes maior do que o do dióxido de carbono¹.

De acordo com o estudo do potencial de geração de energia renovável proveniente dos aterros sanitários nas regiões metropolitanas brasileiras, os resíduos sólidos urbanos, devido a seu elevado teor de matéria orgânica, representam cerca de 12% das fontes emissoras de gás metano, sendo que a disposição final é responsável por 84% desse valor, segundo o Inventário Nacional das Emissões de Gases Efeito Estufa.

Com o advento do Protocolo de Quioto e a criação do mercado de carbono regulado pelo Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), configurou-se uma oportunidade real para a

¹ United Nations Framework Convention on Climate Change, 2004.

geração de recursos a partir do correto manejo dos sistemas de disposição de resíduos sólidos urbanos por meio do tratamento do biogás dos aterros sanitários, o que certamente é bastante positivo para o meio ambiente e para a qualidade de vida da população. Um atrativo a mais nesse campo é que a atual legislação brasileira para aterros sanitários trata apenas da captação e drenagem dos gases gerados, mas não exige a sua queima, o que aumenta as possibilidades de implantação de sistemas de aproveitamento ou queima do biogás

que possam vir a se beneficiar da venda de créditos de carbono.

O setor de energia elétrica é outro que pode se beneficiar nesse contexto, já que é possível gerar energia a partir do biogás coletado, evitando a emissão de gases de efeito estufa e possibilitando a inserção no mercado de carbono.

Outras vantagens da captação e tratamento do biogás são a minimização de odores que tantos transtornos causam às comunidades circunvizinhas, bem como a redução de vetores causadores de doenças.

2

ATERROS SANITÁRIOS

2.1 Conceituação

O aterro sanitário é uma obra de engenharia projetada sob critérios técnicos, cuja finalidade é garantir a disposição dos resíduos sólidos urbanos sem causar danos à saúde pública e ao meio ambiente.

É considerado uma das técnicas mais eficientes e seguras de destinação de resíduos sólidos, pois permite um controle eficiente e seguro do processo e quase sempre apresenta a melhor relação custo-benefício. Pode receber e acomodar vários tipos de resíduos, em diferentes quantidades, e é adaptável a qualquer tipo de comunidade, independentemente do tamanho.

O aterro sanitário comporta-se como um reator

dinâmico porque produz, através de reações químicas e biológicas, emissões como o biogás de aterro, efluentes líquidos, como os lixiviados, e resíduos mineralizados (húmus) a partir da decomposição da matéria orgânica.

2.2 Normas técnicas

Todo projeto de aterro sanitário deve ser elaborado segundo as normas preconizadas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). No caso dos aterros sanitários Classe II², a norma a ser seguida é a de número NBR 8419/1984 e NB 843/1983, que descreve as diretrizes técnicas dos elementos essenciais aos projetos de aterros, tais como impermeabilização da base e impermeabilização superior,

² Segundo a NBR 10004/2004, resíduos da Classe II são os Não Perigosos, divididos em IIA-Não Inertes e IIB-Inertes.

monitoramento ambiental e geotécnico, sistema de drenagem de lixiviados e de gases, exigência de células especiais para resíduos de serviços de saúde, apresentação do manual de operação do aterro e definição de qual será o uso futuro da área do aterro após o encerramento das atividades.

De acordo à Norma NBR 8419/1984, o projeto de um aterro sanitário deve ser obrigatoriamente constituído das seguintes partes: memorial descritivo, memorial técnico, apresentação da estimativa de custos e do cronograma, plantas e desenhos técnicos.

Assim como os aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos têm normas específicas, outros tipos de aterros, como os de resíduos perigosos, também devem ser elaborados seguindo os princípios técnicos estabelecidos pelas normas descritas a seguir:

- apresentação de projetos de aterros de resíduos industriais perigosos – Procedimento – NBR 8418/1983 e NB 842/1983;
- apresentação de projetos de aterros de resíduos perigosos – Critérios para projeto, construção e operação – NBR 10157/1987 e NB 1025/1987;
- apresentação de projetos de aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação – Procedimento – NBR 13896.

2.3 Licenciamento ambiental

Todo aterro, antes de ser implementado, deve obter as licenças exigidas pelos órgãos ambientais, municipais, estaduais ou federal. O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) regula, em nível nacional, o licenciamento desse tipo de atividade através das seguintes resoluções:

Resolução CONAMA 01/1986 – define responsabilidades e critérios para a Avaliação de Impacto Ambiental e define atividades que necessitam do Estudo de Impacto Ambiental (EIA), bem como do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA).

Resolução CONAMA 237/1997 – dispõe sobre o sistema de Licenciamento Ambiental, a regulamentação dos seus aspectos como estabelecidos pela Política Nacional do Meio Ambiente.

Resolução CONAMA 308/2002 – estabelece as diretrizes do Licenciamento Ambiental de sistemas de disposição final dos resíduos sólidos urbanos gerados em municípios de pequeno porte.

Assim, segundo as diretrizes dessas resoluções, devem ser requeridas as seguintes licenças:

Licença Prévia (LP) – é requerida com a apresentação do projeto básico, com vistas à verificação da adequação da localização e da viabilidade do empreendimento.

Com base nesse pedido, quando for necessária a realização de um Estudo de Impacto Ambiental,

o órgão de controle ambiental procederá à elaboração de uma Instrução Técnica, que é uma orientação sobre os aspectos relevantes, relacionados ao projeto e ao local, que devem ser enfocados no EIA e no respectivo RIMA. O EIA é o relatório técnico que apresenta o conjunto de atividades técnicas e científicas destinadas a identificar, prever a magnitude e valorar os impactos de um projeto e suas alternativas. O RIMA é o documento que consubstancia, de forma objetiva, as conclusões do EIA, elaborado em linguagem corrente adequada à sua compreensão pelas comunidades afetadas e demais interessados. Durante a análise do EIA pelo órgão de controle ambiental, o RIMA fica disponível aos interessados no projeto. A avaliação de impacto ambiental é apresentada em audiência pública, para conhecimento e apreciação dos interessados, e as considerações feitas nessa ocasião são analisadas para eventual incorporação no parecer final do órgão de controle. O EIA e o RIMA devem ser feitos por uma empresa contratada pelo empreendedor, pois este não tem permissão para realizar tais estudos diretamente.

Licença de Instalação (LI) – após os estudos serem aprovados (EIA/RIMA), e o projeto executivo elaborado, o empreendedor solicita a licença de instalação da obra. Com a concessão da LI pelo órgão ambiental responsável, o empreendedor poderá dar início à obra do aterro sanitário, para a implantação do projeto aprovado.

Licença de Operação (LO) – concluída a obra, solicita-se a licença para operar o aterro sanitário, que será concedida desde que a obra tenha sido implantada de acordo com o projeto licenciado na LI. De posse da LO, o empreendedor poderá iniciar a operação do aterro sanitário.

Está em discussão no âmbito do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, resolução que busca simplificar procedimentos para o licenciamento de aterros de pequeno porte.

2.4 Projeto

O projeto de concepção de um aterro sanitário passa por várias etapas. A primeira refere-se aos estudos preliminares, que consistem na caracterização do município e na elaboração de um diagnóstico do gerenciamento de resíduos sólidos no local. Esses estudos visam a levantar informações sobre a geração per capita de resíduos sólidos gerados no município, a composição gravimétrica e os serviços de limpeza executados. A segunda etapa consiste na escolha da área adequada para a instalação, considerada a partir de critérios técnicos, ambientais, operacionais e sociais. A área escolhida deve ser caracterizada através de levantamentos topográficos, geológicos, geotécnicos, climatológicos e relativos ao uso de água e solo. Na concepção do projeto devem ser apresentadas a escolha e a justificativa da escolha de cada uma dos vários elementos que compõem um aterro sanitário, como a drenagem das águas superficiais,

a impermeabilização da camada superior e inferior, a drenagem e o tratamento dos lixiviados e gases, bem como o plano de monitoramento para avaliar o impacto causado pela obra, os métodos de operação do aterro e as sugestões de uso futuro da área após encerramento das atividades. A implantação de equipamentos para a captura e o aproveitamento do biogás visando à utilização do MDL em aterros já licenciados deve ser precedida pela realização dos procedimentos necessários à adequação da licença ambiental existente.

2.4.1 Estudo de área

A seleção da área para a construção do aterro sanitário é uma fase muito importante no processo de implantação. A escolha correta do local é um grande passo para o sucesso do empreendimento, pois diminui custos, evitando gastos desnecessários com infra-estrutura, deslocamentos de veículos, impedimentos legais e oposição popular.

Em geral, faz-se primeiro uma pré-seleção de áreas disponíveis no município e, a partir de então, realiza-se um levantamento dos dados dos meios físico e biótico. É comum construir o aterro sanitário em uma área contígua ao antigo lixão, desde que este não esteja situado em locais de risco ou restrição ambiental. Em certos casos, a prefeitura tem interesse em utilizar determinadas áreas, seja porque são áreas degradadas por atividades anteriores, seja porque são áreas

erodidas ou, até mesmo, que não se prestam a outras atividades.

Nesse sentido, é importante traçar critérios para a escolha da área, os quais devem ser amplos, abrangendo tanto questões técnicas como econômicas, sociais e políticas. Os critérios técnicos são impostos pela norma da ABNT NBR 10.157/1987 e pela legislação federal, estadual e municipal. Esses condicionantes abordam desde questões ambientais, como o limite de distância de corpos hídricos e a profundidade do lençol freático, até aspectos relativos ao uso e à ocupação do solo, como o limite da distância de centros urbanos, a distância de aeroportos etc. Os critérios econômicos dizem respeito aos custos relacionados à aquisição do terreno, à distância do centro atendido, à manutenção do sistema de drenagem e ao investimento em construção. Finalmente, os critérios políticos e sociais abordam a aceitação da população à construção do aterro, o acesso à área através de vias com baixa densidade e a distância dos núcleos urbanos de baixa renda. Alguns critérios são mais importantes do que outros, e, para isso, devem ser estabelecidos notas e pesos para cada um. Uma idéia de pontuação recomendada pelo “Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos”, juntamente com os valores de peso para cada item, estão listados nas Tabelas 1 e 2, o que facilita a escolha da área mais adequada para

Critérios	Prioridade	Pontuação
Atendimento à legislação ambiental em vigor	1	10
Atendimento aos condicionantes político-sociais	2	6
Atendimento aos principais condicionantes econômicos	3	4
Atendimento aos principais condicionantes técnicos	4	3
Atendimento aos demais condicionantes econômicos	5	2
Atendimento aos demais condicionantes técnicos	6	1

Tabela 1 – Peso dos critérios

Fonte: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos – SEDU/IBAM, 2001

Tipo de Atendimento	Peso
T – Atende totalmente	100%
P – Parcial ou com obras	50%
NA – Não atende	0%

Tabela 2 – Peso percentual do tipo de atendimento

Fonte: Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos – SEDU/IBAM, 2001

receber o aterro sanitário. A melhor área será aquela que obtiver o maior número de pontos. A Tabela 3, na página seguinte, apresenta um exemplo de como pode ser feita a escolha de uma área, comparando-se e relacionando-se as características de cada uma em três categorias: recomendáveis, recomendáveis com restrições e não-recomendáveis.

Alguns pontos fundamentais devem ser observados na escolha da área:

- o aterro não deve ser instalado em áreas sujeitas a inundação;
- entre a superfície inferior do aterro e o mais alto nível do lençol freático deve haver uma camada natural de solo, de espessura mínima de 1,50 m;
- o aterro deve ser instalado em uma área onde haja predominância de material de baixa permeabilidade, com coeficiente de permeabilidade (k) inferior a 5×10^{-5} cm/s;
- o aterro só pode ser construído em área permitida, conforme legislação local de uso do solo;
- deve-se atentar para a proximidade de aeroportos e aeródromos⁴.

⁴ Resolução CONAMA n° 4, de 09/10/1995 e Portaria n° 1.141/GM5, de 08/12/1987, COMAR. Os dois documentos se referem a vazadouros e não a aterros sanitários.

Dados necessários	Classificação das áreas		
	Recomendada		
	Sim	Com restrições	Não
Vida útil	Maior que 10 anos	Menor que 10 anos ou a critério do órgão ambiental	Menor que 10 anos sem aprovação formal do órgão ambiental
Distância do centro atendido: 5-20km	Menor que 10km	10 – 20km	Maior que 20km
Zoneamento Ambiental	Áreas sem restrições		Unidades de conservação ambiental e correlatas
Densidade populacional do entorno	Baixa	Media	Alta
Uso e ocupação das terras	Áreas devolutas pouco valorizadas		Ocupação intensa
Valor da terra	Baixo	Médio	Alto
Aceitação da população e ONGs	Boa	Razoável	Inaceitável
Distância com relação aos cursos d'água	Maior que 200m	Menor que 200m, com aprovação do órgão ambiental	Menor que 200m, sem aprovação específica do órgão ambiental

Tabela 3 – Critérios considerados adequados para a escolha da área para a instalação do aterro sanitário

2.4.2 Elementos de projeto

O projeto de um aterro sanitário deve prever a instalação de elementos para captação, armazenamento e tratamento dos lixiviados e biogás (quando necessário), além de sistemas de impermeabilização superior e inferior. Esses elementos são de fundamental importância, pois, quando bem executados e monitorados, tornam a obra segura e ambientalmente correta, com reflexos diretos na melhoria da qualidade de vida da população do entorno do aterro.

Sistema de drenagem das águas superficiais

Tem a função de evitar a entrada de água de escoamento superficial no aterro. Além de aumentar o volume de lixiviados, a infiltração das águas superficiais pode causar instabilidade na massa de resíduos pelas poro-pressões induzidas. Para definição do local e dimensionamento do sistema de drenagem superficial, parte-se dos dados obtidos nos levantamentos topográficos e climatológicos.

Sistema de impermeabilização de fundo e de laterais

A impermeabilização da fundação e das laterais do aterro tem a função de proteger e impedir a percolação do chorume para o subsolo e aquíferos existentes. No Brasil, a exigência mínima para a contenção de lixiviados é de que as camadas de fundo e laterais consistam de uma camada simples, podendo ser de argila compactada de permeabilidade inferior a 10^{-7} cm/s ou geomembranas de polietileno de alta densidade (PEAD) com espessura mínima de 1mm. A qualidade do material e os métodos de construção devem assegurar durabilidade e segurança, no sentido de diminuir os impactos ambientais.

Sistema de drenagem dos lixiviados

O lixiviado, também chamado de chorume ou percolado, é originado de várias fontes: da umidade natural dos resíduos que podem reter líquidos através da absorção capilar; de fontes externas, como água de chuvas, superficiais e de mananciais subterrâneos, de água de constituição da matéria orgânica e das bactérias que expelem enzimas que dissolvem a matéria orgânica para a formação de líquidos.

A composição, quantidade e produção dos lixiviados dependem de uma série de fatores, como condições climáticas, temperatura, umidade, pH,

composição, densidade dos resíduos, forma de disposição e idade dos resíduos.

Os lixiviados apresentam grande concentração de substâncias sólidas e alto teor de matéria orgânica. Esses líquidos, quando percolam através do substrato inferior do aterro sem que antes tenham passado por um processo de tratamento, contaminam os lençóis de água subterrâneos. Por essa razão, um sistema eficiente de drenagem é importante para evitar a acumulação de lixiviados dentro do aterro.

A drenagem dos lixiviados pode ser executada através de uma rede de drenos internos – geralmente constituídos de tubos perfurados envoltos com brita, com conformação similar a uma “espinha de peixe” – que levam o chorume drenado para um sistema de tratamento. O material utilizado na construção do dreno deve ser resistente ao resíduo e ao chorume, e projetado de forma a não sofrer obstruções. A drenagem deve estar acima da camada impermeabilizante inferior.

Um modelo de sistema de drenagem é apresentado na Figura 1, na página seguinte.

Sistema de tratamento de lixiviados

Os lixiviados são considerados um problema do ponto de vista do tratamento, uma vez que são altamente contaminantes e sua qualidade e quantidade se modificam, com o passar do tempo,

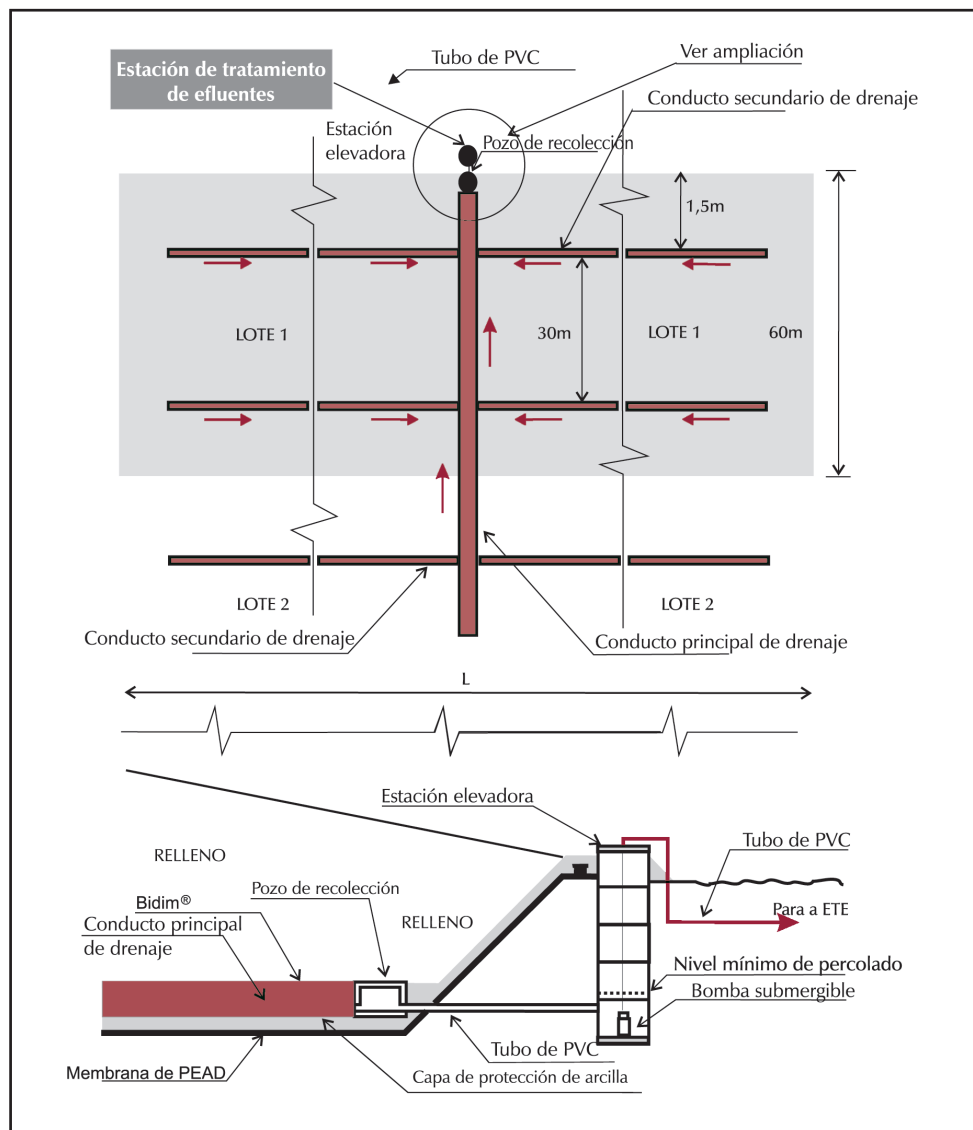


Figura 1 – Sistema de drenagem de chorume

Fonte: Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos - SEDU/IBAM, 2001

em um mesmo aterro. A legislação ambiental exige tratamento adequado para o lançamento dos lixiviados, e normalmente para atender os padrões estabelecidos é necessária uma combinação de diferentes métodos.

Os mais usuais são: tratamentos biológicos aeróbios ou anaeróbios (lodos ativados, lagoas, filtros biológicos) e os tratamentos por processos físico-químicos (diluição, filtração, coagulação, floculação, precipitação, sedimentação, adsorção, troca iônica, oxidação química). Os tratamentos biológicos e físico-químicos podem ser combinados. No caso de haver necessidade de melhoria na qualidade final do efluente, admite-se o uso de tecnologias mais sofisticadas para o polimento do efluente, como é o caso da nanofiltração.

O chorume também pode ser recirculado para o interior da massa de resíduos (com o objetivo de manter o grau de umidade necessário ao processo de decomposição dos resíduos orgânicos) para molhar as vias internas ou pode ser encaminhado para Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) em condições especiais e desde que estas suportem a carga adicional representada pelo chorume sem prejudicar seu processo de tratamento.

Sistema de drenagem dos gases

É feito através de uma rede de drenagem adequada, evitando que os gases escapem através dos meios porosos que constituem o subsolo e atinjam fossas, esgotos e até edificações. Os drenos

são compostos, na maioria dos casos, por uma coluna de tubos perfurados de concreto armado envoltos por uma camada de brita ou rachão, que é fixada à coluna de tubos através de uma tela metálica, como mostrado nas Figuras 2 e 3, na página seguinte.

Cobertura intermediária e final

O sistema de cobertura diário (intermediário e final) tem a função de eliminar a proliferação de vetores, diminuir a taxa de formação de lixiviados, reduzir a exalação de odores e impedir a saída descontrolada do biogás. A cobertura diária é realizada ao final de cada jornada de trabalho; a cobertura intermediária é necessária naqueles locais onde a superfície de disposição ficará inativa por mais tempo, aguardando, por exemplo, a conclusão de um determinado patamar, para então dar início ao seguinte; a cobertura final tem por objetivo evitar a infiltração de águas pluviais – o que resultaria em aumento do volume de lixiviado – e o vazamento dos gases gerados na degradação da matéria orgânica para a atmosfera. A cobertura final também favorece a recuperação final da área e o crescimento de vegetação (Castilho Jr., 2003).

A cobertura final pode ser de diferentes tipos: camada homogênea de argila, ou mistura de argila e material granulado, argila com diferentes geossintéticos, solos orgânicos, lamas e lodos de estação de tratamentos de água e esgotos, entre

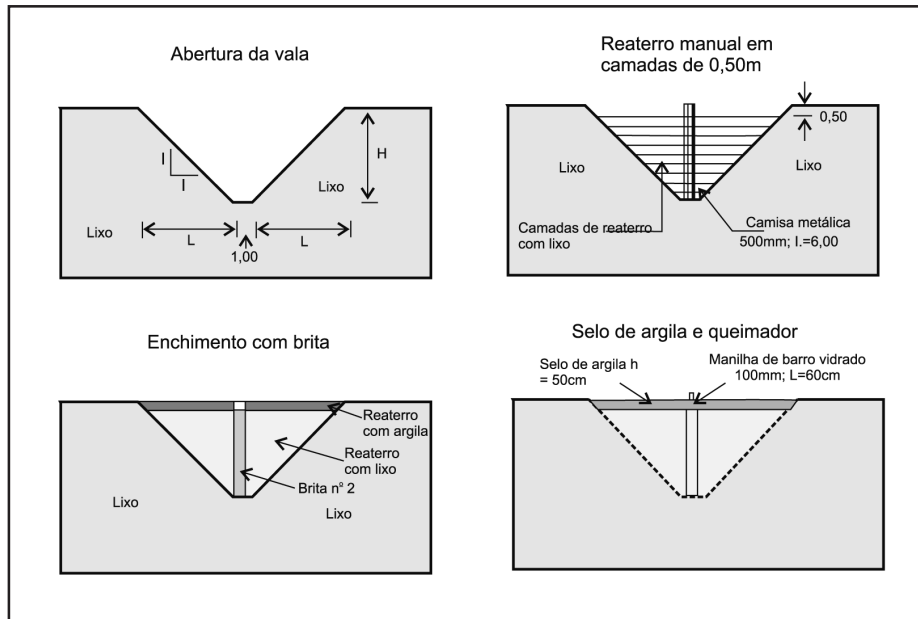


Figura 2 – Execução de poços de drenagem de gases

Fonte: Manual Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos -SEDU/IBAM, 2001

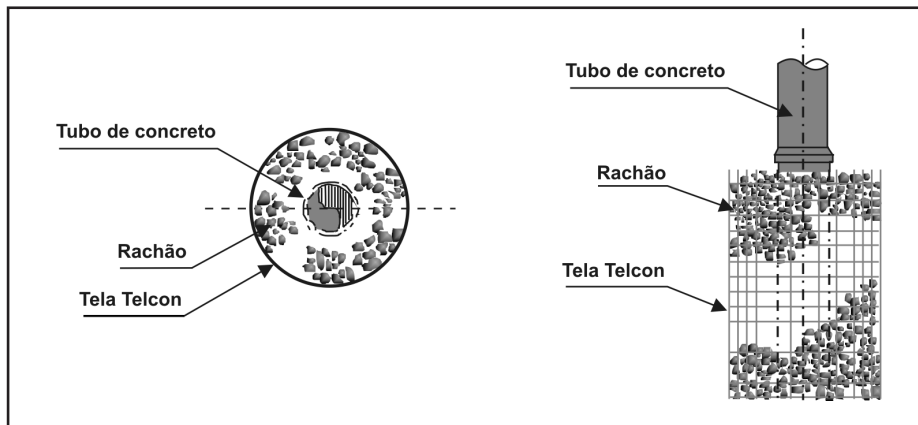


Figura 3 – Detalhes drenos de gás

Fonte: Iturri, 2006

outros. No Brasil, a grande maioria dos aterros possui cobertura com camada homogênea de argila compactada. A vegetação é um elemento que deve sempre estar associado à superfície das camadas, independentemente do sistema adotado, para evitar problemas de erosão e contração do solo (Maciel, 2003).

Componentes complementares

Além desses dispositivos, os aterros sanitários devem conter outros componentes que são considerados básicos, como cerca para impedir a entrada de pessoas e animais, vias de acesso interno transitáveis, cinturão verde ao redor do aterro, guarita para o controle da entrada de veículos, sistema de controle da quantidade e do tipo de resíduo, escritório para o desenvolvimento de atividade administrativa, oficina de manutenção e guarda de equipamentos, sistema de comunicação interna e externa, iluminação para operação noturna, banheiros, refeitórios, identificação do local e acessos às frentes de aterramento.

2.4.3 Monitoramento

É de extrema importância o monitoramento do aterro, tanto durante a sua operação quanto após o encerramento das atividades, para garantir a preservação do meio ambiente, a salubridade da população do entorno e a segurança da obra, bem como a estabilidade do maciço e a integridade

dos sistemas de drenagem de lixiviados e gases. É composto de monitoramento ambiental e geotécnico, descritos a seguir.

Monitoramento Ambiental

Deve ser realizado de forma a atender aos órgãos de controle ambiental e à legislação vigente:

- controle das águas superficiais através de análises físico-químicas e bacteriológicas em pontos determinados tecnicamente, a montante e a jusante do aterro;
- monitoramento das águas subterrâneas – instalação de poços, a montante e a jusante no sentido do fluxo do escoamento preferencial do lençol freático;
- estação pluviométrica – grandes aterros;
- controle da qualidade do chorume após o tratamento, através de análises físico-químicas para caracterização do chorume;
- controle da descarga de líquidos lixiviados no sistema de tratamento.

Monitoramento Geotécnico

- inspeção visual – indícios de erosão, trincas e fissuras na camada de cobertura ou qualquer outro sinal do movimento da massa de resíduos;
- deslocamentos verticais e horizontais – marcos superficiais e inclinômetro;
- medidas de pressões de gases e líquidos no interior do maciço – piezômetros.

Em um aterro sanitário concebido com o objetivo de viabilizar a venda de créditos de carbonos através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, devem ser monitorados periodicamente a pressão, a vazão, a temperatura e a composição do biogás, como indicado no Manual 2.

Além do monitoramento descrito acima, é necessário que se tenha um controle sobre os resíduos, de modo a conhecer as suas características físicas, como composição gravimétrica, teor de umidade e densidade.

2.4.4 Operação e uso futuro da área

Uma vez concluídas as obras de implantação e obtida a licença de operação, pode-se dar início efetivo ao recebimento das cargas de resíduo no aterro, o que deverá obedecer a um plano operacional previamente elaborado. De acordo com Castilho Jr. (2003), esse plano deve ser simples, contemplando todas as atividades operacionais rotineiras em um aterro e garantindo operação segura e ininterrupta. Uma operação inadequada pode fazer com que um aterro sanitário se transforme rapidamente em um lixão.

Em um projeto de aterro sanitário deve estar previsto também o reaproveitamento da área após o encerramento de suas atividades ou o final de sua vida útil. É comum, nesse tipo de área, a construção de parques de lazer para a comunidade, centros de treinamento/capacitação de trabalhadores, edificações de pequeno porte,

novas urbanizações etc. O local pode ser usado tanto para o lazer quanto para a geração de empregos e renda para a comunidade, através de atividades ambientalmente corretas. O importante é propiciar algum tipo de benefício às comunidades próximas ao aterro sanitário, que antes sofreram com a passagem dos caminhões e o cheiro dos gases.

Para construir em área de aterro sanitário, é preciso um cuidado especial. Devido à composição fortemente heterogênea dos resíduos, por maiores que tenham sido os cuidados tomados na operação, é possível a ocorrência de recalques elevados, o que pode dificultar e onerar as construções nesses locais. Um aterro sanitário pode sofrer recalques durante décadas.

Ressaltam-se também, entre as dificuldades, as mudanças das características de resistência e compressibilidade que ocorrem com a massa de resíduos, ao longo do tempo, devido aos processos de degradação química e biológica.

2.5 Remediação de lixões

O lixão é a forma inadequada de dispor os resíduos sólidos urbanos sobre o solo, sem nenhuma impermeabilização, sem sistema de drenagem de lixiviados e de gases e sem cobertura diária do lixo, causando impactos à saúde pública e ao meio ambiente. É comum encontrar nos lixões vetores transmissores de doenças e outros animais. Nesses locais também é frequente a presença de pessoas

excluídas socioeconomicamente, inclusive idosos e crianças, trabalhando como catadores, em condições precárias e insalubres.

Essas áreas devem ser remediadas (para o que é necessário o requerimento de licenciamento ambiental⁶) e fechadas, para propiciar segurança à população do entorno, a melhoria da qualidade do solos e das águas superficiais e subterrâneas, e a minimização dos riscos à saúde pública, garantindo harmonia entre o meio ambiente e a população local.

Muitas vezes os lixões são construídos em áreas completamente inadequadas; em alguns casos, porém, apesar de a disposição dos resíduos ser feita sem o emprego de critérios técnicos de engenharia, as áreas apresentam boas características para a implantação de um aterro sanitário. Nessas situações, pode-se avaliar a possibilidade de aproveitamento do local para a construção do aterro sanitário, desde que se promova antes um programa de recuperação ambiental do lixão e de seu entorno. Tal procedimento é indicado por razões econômico-financeiras – já que há grande dificuldade de encontrar áreas adequadas disponíveis nos municípios –, mas, principalmente, por razões ambientais. Assim, quando o município está implantando um sistema de gestão integrada de resíduos sólidos e tem um lixão como forma

de disposição final, a primeira coisa a ser feita é traçar uma estratégia de procedimento com as seguintes alternativas:

- remediar e fechar o lixão;
- recuperar a área do lixão seguindo bases sanitárias e ambientais adequadas e implementação de um aterro sanitário no local, de modo que continue recebendo os resíduos do município;
- implantar um novo aterro sanitário em outra área; essa alternativa deve ser feita em conjunto com a primeira.

O encerramento das atividades de um lixão deve ser precedida de um projeto de recuperação ambiental da área, incluindo uma investigação geoambiental do lixão e da sua área de influência, com monitoramento da qualidade do ar, das águas superficiais e subterrâneas, durante o tempo que durar o processo de liberação de gases e/ou de chorume.

As ações corretivas para as áreas degradadas por lixões que encerraram as atividades de vazadouros de resíduos são descritas a seguir.

Recomendações gerais

- delimitação da área, que deve ser cercada completamente para impedir a entrada de animais e pessoas;
- realização de sondagens para definir a espessura da camada de lixo ao longo da área degradada;

⁶ Artigo 1 CONAMA 308/2002.

- limpeza da área de domínio;
- movimentação e conformação da massa de lixo: os taludes devem ficar com declividade de 1:3 (V:H);
- cobertura final dos resíduos expostos com uma camada de solo argiloso de 0,50m de espessura e uma camada de solo vegetal de 0,60m de espessura sobre a camada de argila;
- promoção do plantio de espécies nativas de raízes curtas, preferencialmente gramíneas.

Recomendações para o controle dos lixiviados, dos gases e das águas superficiais

- construção de valetas para a drenagem superficial ao pé dos taludes em toda a área;
- execução de um ou mais poços verticais para a drenagem de gases;
- aproveitamento dos furos de sondagens e implantação de poços de monitoramento

(sendo no mínimo dois a montante do lixão recuperado e dois a jusante);

- instalação de poços a montante e a jusante do lixão para averiguação da qualidade da água;
- monitoramento das águas superficiais.

Recomendações de caráter social

- promoção do cadastramento dos catadores, de forma a conhecer o perfil de cada um;
- estudo e implantação de alternativas de emprego e renda para os catadores, retirando-os da frente de trabalho irregular e insalubre.

Tanto para aterros sanitários como para antigos lixões, deve-se considerar a possibilidade de captação do biogás para queima em *flares* e/ou aproveitamento energético, para que sejam vendidos como créditos de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, conforme já abordado no Manual 2.

3

BIOGÁS E MDL

3.1 Composição do biogás

O biogás de aterros é composto de vários gases, principalmente metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), que, juntos, constituem aproximadamente 99% de seu total. Os outros componentes, como monóxido de carbono, hidrogênio, nitrogênio, ácido sulfídrico e amônia, estão presentes em pequenas quantidades. O biogás é gerado pela decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos.

Na Tabela 4 apresentam-se as distribuições percentuais típicas dos gases encontrados em um aterro sanitário.

Componente	Porcentagem*
Metano	45 - 60
Dióxido de carbono	40 - 60
Nitrogênio	2 - 5
Oxigênio	0,1 - 1,0
Enxofre, mercaptanas	0 - 1,0
Amônia	0,1 - 1,0
Hidrogênio	0 - 0,2
Monóxido de carbono	0 - 0,2
Gases em menor concentração	0,01 - 0,6

Tabela 4 - Constituintes típicos encontrados no biogás dos aterros RSU

Fonte: Tchobanoglous et al (1994).

* A distribuição percentual exata variará segundo o tempo de uso do aterro.

3.1.1 Formação do metano

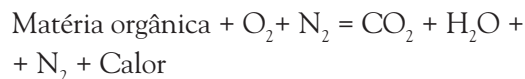
A transformação da massa de resíduos de um aterro sanitário em gases não é um processo simples, principalmente por conta da diversidade de materiais que a compõem e pelas interações físico-químicas e biológicas que ocorrem com o passar do tempo. As atividades microbiológicas têm grande influência na produção de biogás em aterros sanitários. No entanto, outros mecanismos, como a volatilização e as reações químicas, também exercem um papel importante na formação de metano, agindo isoladamente ou associados à microbiologia.

As comunidades microbianas que implementam a decomposição dos resíduos imprimem dois tipos de metabolismos, o aeróbio e o anaeróbio, os quais estão condicionados à presença de oxigênio na massa de resíduos. Apenas na fase inicial de deposição dos resíduos no aterro ocorre a degradação aeróbia. Essa fase é relativamente curta, e com o recobrimento dos resíduos o ambiente logo torna-se favorável à presença de bactérias anaeróbias, as quais predominam por longos períodos e são responsáveis pela formação do metano. A seguir estão descritas as distintas fases de decomposição dos resíduos em um aterro sanitário, de acordo com estudo desenvolvido por Cepea & Fealq.

3.1.2 Processo aeróbio

O oxigênio presente nos espaços vazios dos

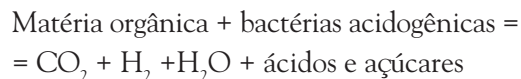
resíduos, juntamente com o oxigênio dissolvido nos resíduos, quando associado à umidade, acelera a decomposição aeróbia, gerando dióxido de carbono, água e calor. Nessa fase a composição do gás será de 100% de CO₂.



3.1.3 Processo anaeróbio

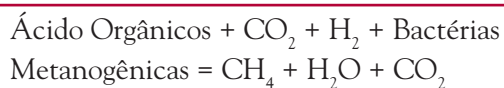
Esse processo inicia-se quando o oxigênio torna-se ocluído na massa de resíduos, como consequência da superposição de camadas de resíduos. A velocidade de degradação anaeróbia é muito lenta, podendo produzir gases por mais de 30 anos. Ao longo desse período, as formações e as quantidades gasosas são diferenciadas, dependendo das fases da degradação anaeróbia nos resíduos. O processo anaeróbio pode ser dividido em quatro fases:

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. Essa fase é representada pela seguinte equação química:



A duração da fase acidogênica é de algumas semanas, finalizando com um pico na produção de CO_2 , que chega a 90%, e com o H_2 chegando à faixa de 20%.

Fase Metanogênica Instável: é a segunda fase do processo anaeróbio, que ocorre na presença de microorganismos normalmente presentes no solo. As bactérias são a *Methanobacterium brvanti* e a *Methanosarcina barkeri*, que transformam os ácidos orgânicos e o dióxido de carbono em metano. A expressão química é:



O período de incremento da formação de metano é de seis meses a dois anos. O biogás gerado nessa fase é composto por 50% a 60% de metano.

Fase metanogênica estável: é a fase mais longa, estendendo-se por décadas. A composição básica é de cerca de 60% de metano (CH_4), 40% de dióxido de carbono (CO_2) e pequenas frações variáveis de outros gases, só sofrendo grandes variações em caso de perturbações do equilíbrio de fatores como umidade e cobertura da massa de resíduos.

Fase final: ocorre após várias décadas, quando a porcentagem de metano na composição do biogás tenha chegado a um índice 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, se verificadas alterações estruturais ou mudanças na natureza do local.

As diferentes fases de decomposição da matéria orgânica presente na massa de resíduos não estão claramente definidas no tempo e podem ocorrer simultaneamente em diferentes partes do aterro, como resultado da composição heterogênea dos resíduos e dos microambientes gerados dentro do aterro. Mesmo assim, a duração de cada fase de geração de gás variará conforme a distribuição dos componentes orgânicos no aterro, a disponibilidade de nutrientes, a umidade dos resíduos, a entrada de água no aterro e o grau de compactação inicial.

3.2 Fatores que afetam a produção de metano

Vários fatores afetam a formação do metano: os relacionados com os ambientes externo e interno das células e os relacionados com a forma de construção e operação do aterro e as características iniciais dos resíduos. A seguir são apresentados os fatores mais relevantes, embora todos tenham um papel importante no processo.

Umidade: a decomposição biológica da matéria orgânica é totalmente dependente da presença de umidade, necessária em uma determinada

quantidade que permita uma atividade microbiana satisfatória.

Temperatura: a temperatura é altamente importante no processo de formação de metano. Quanto mais elevada, maior será a atividade bacteriana e, conseqüentemente, a produção de metano. Dois aspectos devem ser considerados com relação à temperatura: a temperatura desenvolvida dentro da massa de resíduos e a influência da temperatura externa sobre os processos que ocorrem internamente. A faixa ótima de temperatura para a geração de metano é de 30°C a 40°C, sendo que temperaturas abaixo dos 15°C propiciam severas limitações para a atividade metanogênica. Flutuações de temperatura são comuns na parte mais elevada do aterro, como resultado das mudanças na temperatura local.

pH: esse parâmetro influi na formação de metano, já que a atividade das bactérias metanogênicas é bastante sensível às suas variações. O pH ótimo para o desenvolvimento dessas bactérias está na faixa entre 6 e 8 (Christensen et al., 1992).

Composição dos resíduos: a quantidade e o tipo de resíduos orgânicos são fatores que exercem importante influência na taxa de produção de gases: quanto maior a fração orgânica biodegradável, maior será o potencial de produção de gases.

Tamanho das partículas: há uma relação inversamente proporcional entre a superfície exposta dos resíduos e o tamanho dos mesmos, expressa pela superfície específica (área da superfície/volume). Sendo assim, observa-se um aumento da velocidade de degradação quando a massa é composta por resíduos menores, o que tem motivado o uso de trituradores, por exemplo, na compostagem e nos processos mecânico-biológicos. Vale salientar que o tamanho das partículas tem influência na degradação dos resíduos tanto nos processos aeróbios quanto nos anaeróbios.

Forma de construção e operação do aterro: o projeto específico do aterro e a forma de operação influenciam na produção de metano. Aterros com altura elevada e com um sistema eficiente de impermeabilização da camada de cobertura fomentarão o predomínio de atividade anaeróbia, que é a grande responsável pela formação do metano; da mesma forma, a compactação aumenta a densidade da massa de resíduos, o que propicia o encurtamento da fase aeróbia.

É importante ressaltar que o Brasil possui, na maior parte do seu território, condições favoráveis para a produção de biogás em aterros sanitários, pelas condições de umidade e temperatura e, principalmente, pela predominância de matéria orgânica na composição dos resíduos sólidos.

3.3 Modelos para estimativa de geração de gás

Existem diversos métodos de cálculo de estimativa de geração de biogás em aterros sanitários. Os mais conhecidos e empregados são os modelos recomendados pelo Banco Mundial, pela Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) e pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). A seguir é feita uma breve revisão sobre os referidos modelos.

3.3.1 Modelo recomendado pelo Banco Mundial

Conhecido como Scholl-Canyon, é recomendado pelo Banco Mundial por ser simples, de fácil aplicação e o mais empregado pelas agências reguladoras e instituições financeiras que apóiam os projetos de aproveitamento do biogás de aterros na América do Sul. Esse modelo baseia-se na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro sanitário por unidade de tempo, o que se expressa a partir da seguinte equação de primeira ordem:

$$Q_{CH_4} = k \cdot L_0 \cdot m_i \cdot e^{-kt} \quad (1)$$

Em que:

Q_{CH_4} = quantidade de gás gerado durante um ano (m^3 /ano)

k = taxa de geração de metano por ano (1/ano)

L_0 = potencial de geração de metano em peso de lixo (m^3 /t)

m = massa de resíduos depositados no ano “i”, (t/ano)

t = anos após o encerramento do aterro (anos)

3.3.2 Modelo desenvolvido pela EPA

Também chamado de Landfill Gas Emission Model (Landgem), foi desenvolvido pela EPA e consta na legislação federal dos EUA sobre diretrizes e regras finais para aterros sanitários ativos e encerrados. É bastante empregado no mundo, tendo sido utilizado inclusive no estudo do potencial de geração de energia nos municípios brasileiros realizado pelo Ministério do Meio Ambiente. Esse método contabiliza quantidades e variações de gases na vida de um aterro e é expresso pela seguinte equação cinética de primeira ordem:

$$Q_{CH_4} = L_0 R (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (2)$$

Em que:

Q_{CH_4} = quantidade de gás gerado durante um ano (m^3 /ano)

L_0 = potencial de geração de metano em peso de lixo (m^3 /t)

R = quantidade anual de resíduos depositados no aterro (t/ano)

k = taxa de geração de metano por ano (1/ano)

t = tempo desde o início da disposição do aterro (anos)

c = tempo desde o encerramento do aterro (anos), $c = 0$ para aterros ativos

3.3.3 Modelo adotado pelo IPCC

O modelo de cálculo mais simplificado, recomendado pelo IPCC, permite o cálculo da quantidade anual de metano gerada em um aterro sanitário e é expresso pela seguinte equação:

$$Q_{CH_4} = (RSU_D \cdot FCM \cdot COD \cdot COD_R \cdot FEM \cdot 16/12 - R) \cdot (1 - OX) \quad (3)$$

Em que:

RSU_D = total anual de resíduos sólidos depositados no aterro

FCM = fator de correção de metano (%)

COD = carbono orgânico degradável no resíduo sólido urbano (%)

COD_R = fração de COD que realmente degrada (%)

FEM = fração de CH_4 no gás de aterro (%)

$16/12$ = taxa de conversão de carbono em metano (adimensional)

R = quantidade de metano recuperado (t/ano)

OX = fator de oxidação (adimensional)

A equação (3) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$Q_{CH_4} = (RSU_D \cdot L_0) (1 - OX) \quad (4)$$

Sendo $L_0 = FCM \cdot COD \cdot COD_R \cdot F \cdot 16/12 - R$ (5)

Quando se considera a variável “tempo” o método de cálculo é expresso pela equação:

$$Q_{CH_{4x}} = k \cdot R_x \cdot L_0 \cdot e^{-k(T-x)} \quad (6)$$

Em que:

$Q_{CH_{4x}}$ = vazão de biogás (m^3 /ano)

K = constante de geração de metano (1/ano)

R_x = quantidade de resíduo aterrado no ano (t)

X = ano de aterramento do resíduo (ano)

L_0 = potencial de geração de metano (m^3 /t de resíduo)

T = ano de realização do inventário (ano)

Para a estimativa das emissões de metano em um determinado período, somam-se as emissões anuais:

$$Q_{CH_4} = \sum Q_{CH_{4x}} \quad (7)$$

Os parâmetros L_0 e k são comuns a todos os modelos e considerados os mais importantes, pois refletem variações de acordo com o local, o clima e a composição dos resíduos, entre outros. A constante, taxa de geração de metano (k), representa a velocidade de decomposição biológica dos resíduos após a disposição no aterro sanitário e é influenciada pelo teor de umidade, pela disponibilidade de nutrientes, pelo pH e pela temperatura. Os valores de k variam de 0,003, para aterros secos, a 0,21, para aterros úmidos. Estima-se que essa margem reflita as diferentes características geográficas do país e certas condições do aterro. O parâmetro L_0 , que é o

potencial de geração de metano, está associado à quantidade de matéria orgânica presente na massa de resíduos. O L_0 pode variar de 1m^3 , para aterros com resíduos com baixa quantidade de matéria orgânica, a 312m^3 , para aterros com grande quantidade de matéria orgânica por tonelada de resíduos.

Os modelos matemáticos são uma ferramenta útil e econômica para avaliar o potencial de geração de gás nos aterros. O êxito de qualquer modelo depende, na maior parte, do grau de certeza necessário, na confiabilidade dos dados de insumo, na experiência do indivíduo que analisa os dados, e no grau de semelhança entre o local em questão e outros locais que possam ter sido modelados com sucesso (Zison, 1990, apud Banco Mundial).

A eficiência de captação do biogás do aterro dependerá de vários fatores, como o projeto do aterro, a forma de operação e o clima da região. Na estimativa teórica da quantidade de gás produzido em um aterro devem ser computadas algumas perdas, como, por exemplo, o escape do gás pela camada de cobertura do aterro, as perdas no trajeto do biogás ao longo da rede de drenagem, e as perdas devido a interfaces operacionais e ao nível de chorume. De acordo com o relatório do Banco Mundial, um sistema de recuperação do biogás bem projetado, construído e operado pode coletar 75% ou mais do biogás produzido em um aterro.

O valor da quantidade de metano calculado através dos modelos teóricos, depois de descontados as perdas pela eficiência do sistema de captação, devem ser multiplicados por 21 vezes, que é o valor do carbono equivalente.

3.4 Aproveitamento energético do biogás

O biogás gerado a partir da decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos é rico em metano, o qual, por ser um excelente combustível, em certas concentrações representa risco de explosões em aterros sanitários. Esse gás é identificado como um contribuinte significativo às emissões de gás efeito estufa que contribuem para o aquecimento global: como já apontado, em um horizonte de 100 anos, é 21 vezes mais ativo na retenção de calor da estratosfera do que o dióxido de carbono.

A captura do biogás em aterros sanitários traz grandes vantagens, pois além de reduzir as emissões dos gases efeito estufa à atmosfera, pode ser aproveitado para a geração de energia, principalmente por se tratar de um gás de grande poder calorífico. De acordo com estudos realizados por Zulauf (2004), um aterro com cerca de 1 milhão de toneladas, típico de uma cidade com cerca de 300 mil habitantes, pode ter uma potência de aproximadamente 1MW de energia elétrica por uma década.

A alternativa de energia elétrica oriunda do biogás de aterros sanitários ganha novas políticas de geração de energia com a biomassa e outras fontes de energia renovável, dentro do contexto de desenvolvimento sustentável, incentivada pelo governo federal.

Projetos com aproveitamento do biogás para simples queima no *flare* ou produção de energia geram receita com a venda de créditos de carbono no mercado internacional, o que propicia um incentivo para melhorar o projeto e a operação dos aterros sanitários e avançar na implementação de uma correta gestão dos resíduos sólidos urbanos nos municípios brasileiros.

De acordo com o relatório do Banco Mundial, para que seja possível a recuperação energética do biogás um aterro sanitário deverá contar com os seguintes sistemas:

- sistema de impermeabilização superior: destinado a evitar a fuga do biogás para atmosfera. A cobertura superior dos aterros sanitários normalmente é feita apenas com argila compactada;
- poços de drenagem de biogás: sistema obrigatório em aterros sanitários. No caso de aproveitamento do biogás, deverá ser dada atenção especial para otimizar a coleta e o tratamento dos gases;

- rede de coleta e bombas de vácuo: a rede de coleta leva o biogás drenado dos poços para a unidade de geração de energia elétrica. Normalmente é constituída por tubos de polietileno de alta densidade e deve ser aterrada para evitar acidentes. As bombas de vácuo são importantes para compensar as perdas de carga nas tubulações e garantir uma vazão regular de biogás para a unidade de geração de energia elétrica;
- grupos geradores: esses equipamentos utilizam normalmente motores de combustão interna desenvolvidos especialmente para funcionar utilizando o biogás como combustível. A geração de energia elétrica também pode ser feita através da utilização de turbinas.

A implantação de unidades de geração de energia elétrica em aterros sanitários deverá ser precedida de estudo de viabilidade técnica e econômica, o qual deverá, obrigatoriamente, indicar o potencial de geração de biogás no aterro sanitário, em função da quantidade e da composição dos resíduos aterrados, e avaliar o custo de geração de energia elétrica, comparando-o com o valor cobrado pela concessionária local.

GLOSSÁRIO DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
COMAR	Comando Aéreo Regional da Força Aérea Brasileira
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CQNUMC	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i> (Agência de Proteção Ambiental dos EUA)
ETE	Estações de Tratamento de Esgoto
GEE	Gases de Efeito Estufa
IBAM	Instituto Brasileiro de Administração Municipal
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas)
Landgem	<i>Landfill Gas Emission Model</i>
LI	Licença de Instalação
LO	Licença de Operação
LP	Licença Prévia
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

MMA	Ministério do Meio Ambiente
NBR	Norma Brasileira da ABNT
PAC	Plano de Aceleração do Crescimento
PEAD	Polietileno de alta densidade
PMSS	Programa de Modernização do Setor Saneamento
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
RCEs	Reduções Certificadas de Emissões
RIMA	Relatório de Impacto Ambiental
SNSA	Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
SRHU	Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention On Climate Change</i>

BIBLIOGRAFIA

BANCO MUNDIAL. **Manual para a preparação de gás de aterro sanitário para projetos de energia na América Latina e Caribe.** Disponível em: <<http://www.worldbank.org>>

_____. **Guidance note on recuperation of landfill gas from municipal solid waste landfills (World Bank).** Disponível em: <<http://www.worldbank.org>>

BARLAZ, M. A.; HAN, R. K. **Leachate and gas generation: geotechnical practice for waste disposal.** London: Chapman & Hall, 1993.

BORBA, S. P. **Análise de modelos de geração de gases em aterro sanitário: estudo de caso.** Rio de Janeiro: COPPE-UFRJ, 2006. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2006.

BRASIL. Ministério de Ciência e Tecnologia. **Comunicação Nacional Inicial do Brasil a CQNUCC/CGMGC.** Brasília, 2004.

_____. **Primeiro inventário brasileiro das emissões antrópicas de gases de efeito estufa: relatório de referência: emissões de metano no tratamento e na disposição final de resíduos.** São Paulo: CETESB, 2003. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/clima>>

CASTILHOS JUNIOR, A. B. de (Coord.). **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte: projeto PROSAB.** Rio de Janeiro: ABES, 2003.

-
- CHRISTENSEN, T. H.; KJELDSSEN, P.; LINDHART, B. **Landfilling of waste: biogas**. London: E & FN Spon, 1992.
- ENCINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP**. Campinas, 2003. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, 2003.
- ITURRI, E. A. Z. **Uma proposta para a base de apoio dos drenos de gás**. Trabalho apresentado no Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamentos de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, 2006.
- KAIMOTO, L. S. **Estudo de viabilidade para recuperação biogás no âmbito do MDL: metodologia**. Brasília: Ministério das Cidades, 2006.
- KAIMOTO, L. S.; LEITE, E. F.; COELHO, M. G. **Considerações sobre aproveitamento do biogás em aterros sanitários**. Trabalho apresentado no Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamentos de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, 2006.
- LIXO municipal: manual de gerenciamento integrado. São Paulo: IPT; CEMPRE, 1995.
- MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca, PE**. Recife: UFPE, 2003. Dissertação (Mestrado)- Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Primeiro inventário brasileiro das emissões antrópicas de gases de efeito estufa: relatório de referência: emissões de metano no tratamento e na disposição final de resíduos**. São Paulo: CETESB, 2003. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/clima>>
- _____. **Estudos do potencial de geração de energia renovável proveniente dos aterros sanitários nas regiões metropolitanas e grandes cidades do Brasil: relatório final**. Brasília:MMA; Piracicaba: CEPEA, 2004.
- _____. **idem sumário executivo – versão final**. Brasília:MMA; Piracicaba:CEPEA, 2004.
- MONTEIRO, José Henrique Penido et al. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Coordenação técnica Victor Zular Zveibil. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.
- _____. **Manual de gestion integrada de resíduos sólidos municipales en ciudades de America Latina**

-
- y el Caribe. Actualizado y adaptado por Gilson Leite Mansur y Jose Henrique Penido Monteiro. Coordinacion tecnica de Karin Segala. Traduccion de Hernan Baeza. Rio de Janeiro : IBAM, 2006.
- MONTEIRO, J. H. R. P.; SENA, R. D.; AMARAL E SILVA, D. **Sistemas de monitoramento para os aterros de resíduos sólidos urbanos da cidade do Rio de Janeiro.** Trabalho apresentado no Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamentos de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, 2006.
- PEREIRA, A. G. H. **Compresibilidad de los residuos sólidos urbanos.** Tesis (Doctoral)- Universidad de Oviedo, Espanha, 2001.
- SEGALA, Karin (Coord.). **Capacitação em gestão integrada de resíduos sólidos:** programa de desenvolvimento visando a capacitação técnico-gerencial em gestão integrada de resíduos sólidos para os municípios de: Alagoinha, Arcoverde, Belo Jardim, Caruaru e Pesqueira. Rio de Janeiro : IBAM/ ENSUR/DUMA; SECTMA, 2005. Módulo 1: Procedimentos para operação de aterro sanitário.
- SIMÕES, G. F.; CATAPRETA, C. A. A.; MARTINS, H. L. **Monitoramento geotécnico de aterros sanitários – trabalhos realizados na central de tratamento de resíduos sólidos da BR-040 em Belo Horizonte, MG.** Trabalho apresentado no Simpósio Internacional de Tecnologias e Tratamentos de Resíduos Sólidos, Rio de Janeiro, 2006.
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. A. **Gestión integral de residuos sólidos.** São Paulo: McGraw-Hill, 1994.
- USEPA. **Turning a liability into an asset:** a landfill methane outreach program. 1996. Disponível em: <<http://www.epa.gov>>
- VAN ELK, A. G. H. P.; RITTER, E. **Gestão de resíduos sólidos.** Rio de Janeiro: UERJ, 2006. Apostila.
- ZULAUF, M. **Geração com biogás de aterros sanitários:** dossiê energia positiva para o Brasil. [S.l.: s.n.], 2004. Estudo promovido pelo Greenpeace.

Ministério das Cidades
Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental
Esplanada dos Ministérios, Bloco A
70050-901 – Brasília – DF
Telefone: +55 (61) 2108-1114
www.cidades.gov.br

Ministério do Meio Ambiente
Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano
SGAN 601, Conj. I Ed. Codevasf, 4º andar
70830-901 – Brasília – DF
Telefone: +55 (61) 3419-2116
www.mma.gov.br

**IBAM – Instituto Brasileiro de Administração
Municipal**
Largo IBAM nº 1 – Humaitá
22271-070 – Rio de Janeiro – RJ
Telefone: +55 (21) 2536-9797
www.ibam.org.br



Ministério do
Meio Ambiente

Ministério das
Cidades

