



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA TECNOLÓGICA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE
ENERGIA A PARTIR DO BIOGÁS PRODUZIDO
PELO ATERRO SANITÁRIO DE BELO
HORIZONTE**

Fernando Suarez de Oliveira

**Belo Horizonte-MG
2010**



**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE
MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA
CURSO DE QUÍMICA TECNOLÓGICA**

**ESTUDO DA VIABILIDADE DA PRODUÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BIOGÁS
PRODUZIDO PELO ATERRO SANITÁRIO DE
BELO HORIZONTE**

Fernando Suarez de Oliveira

Monografia apresentada ao Curso de
Química Tecnológica do CEFET-MG como
parte das exigências da disciplina Trabalho
de Conclusão de Curso II.

Orientadora: Prof^a. Dra. Patrícia Procópio
Pontes

**Belo Horizonte-MG
2010**

Banca Examinadora:

Prof^a. Dra. Patrícia Procópio Pontes (orientadora)

Prof. Dr. Patterson Patrício

Prof^a. Msc. Andrea Carla Madeira Teixeira

Monografia aprovada em ____ de _____ de 2010

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, pela existência e pela capacidade que me foi concedida para a realização deste e de outros trabalhos.

Aos meus pais, por serem a razão da minha existência, por serem meu alicerce, com quem eu sempre pude contar a todo momento. Pelo incentivo ao longo do curso, pelas horas dedicadas à minha educação, à minha formação. Pelo carinho, pelo amor incondicional. Enfim, por existirem e fazerem parte da minha vida.

Aos familiares, por nunca se esquecerem de mim, mesmo quando, devido aos estudos, tantas vezes me esqueci deles. Em especial à Karen, minha prima que está sempre do meu lado, impedindo sempre que a tristeza e o desânimo cheguem perto.

Ao Gilberto, pelo companheirismo, por todo o apoio ao longo da produção deste trabalho, nas horas mais difíceis.

À Meriane, que não podia faltar neste Agradecimento, por me conceder a semente que se transformaria neste trabalho.

À Prof.^a Dr.^a Patrícia Procópio, por me dar acesso a todo o seu conhecimento e pelos conselhos certos, nas horas certas.

Aos queridos colegas de curso, que compartilharam comigo esta longa e árdua caminhada, pelas ajudas nas horas mais complicadas, pela diversão, por serem tão amigos.

Enfim, a todos que, cada um à sua maneira, contribuíram para que tudo desse certo até hoje.

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APWA	American Public Work Association
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
COV's	Compostos Orgânicos Voláteis
CTRS	Central de Tratamento de Resíduos Sólidos
GASMIG	Companhia de Gás de Minas Gerais
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	International Energy Agency
MTC	Ministério da Ciência e da Tecnologia
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
RCD	Resíduos de construção e deposição
RDO	Resíduos domiciliares
RPU	Resíduos públicos
RSS	Resíduos de serviço de saúde
RSU	Resíduo Sólido Urbano
SMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
USEPA	United States Environmental Protection Agency

LISTA DE FIGURAS E FLUXOGRAMAS

Figura 1	Composição geral dos resíduos sólidos urbanos de países industrializados, em desenvolvimento e de baixa renda	14
Figura 2	Evolução dos métodos de disposição do resíduo sólido por ano no Brasil	17
Figura 3	Lixão do bairro Santa Tereza, em Belo Horizonte	18
Figura 4	Estrutura de um aterro sanitário	21
Figura 5	Esquema do processo de degradação anaeróbia	22
Figura 6	Possíveis reações para a etapa metanogênica da degradação anaeróbia	23
Figura 7	Fases de estabilização dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários	24
Figura 8	Valores de pH em aterro fictício com e sem recirculação	30
Figura 9	Comportamento dos aterros com relação à produção de gás	31
Figura 10	Composição do gás produzido no aterro de passagem única do chorume	31
Figura 11	Composição do gás produzido no aterro com recirculação do chorume	31
Figura 12	Vista do Aterro Sanitário de Belo Horizonte	33
Figura 13	Porcentagem de destinação dos resíduos em Belo Horizonte	34
Figura 14	Composição mais recente do lixo de Belo Horizonte	35
Figura 15	Modelo matemático para cálculo da produção de biogás em aterro pelo Programa BIOGÁS – GERAÇÃO E USO ENERGÉTICO	37
Figura 16	Tela de definição dos parâmetros para o cálculo da estimativa de produção de metano no aterro do Programa BIOGÁS	38
Figura 17	Parâmetros para o cálculo da vazão de metano no aterro no Programa BIOGÁS	39
Figura 18	Gráficos da vazão de metano produzido ao longo dos anos na CTRS BR040 de Belo Horizonte (azul) e dessa mesma	39

	vazão, considerando 75% da taxa de coleta do metano (vermelho)	
Figura 19	Equação que determina a estimativa da potência gerada pelo biogás do aterro	
Figura 20	Gráfico da potência gerada pela utilização do biogás como fonte de energia ao longo dos anos na CTRS BR040 de Belo Horizonte	41
Figura 21	Gráficos da vazão de metano produzido ao longo dos anos na CTRS BR040 de Belo Horizonte (azul) e dessa mesma vazão, considerando 75% da taxa de coleta do metano (vermelho), com recirculação do chorume	44
Figura 22	Gráfico da potência gerada pela utilização do biogás como fonte de energia ao longo dos anos na CTRS BR040 de Belo Horizonte, considerando a recirculação do chorume	46

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1	Estimativa geral de resíduos sólidos no Brasil	14
Tabela 2	Resíduos destinados em Belo Horizonte – massa (t), acumulado até entre maio de outubro de 2009	33
Tabela 3	Serviços de aterragem - % da massa aterrada	34
Tabela 4	Composição detalhada do lixo de Belo Horizonte	35
Tabela 5	Dados para a vazão de metano ao longo do funcionamento da CTRS BR040 de Belo Horizonte	40
Tabela 6	Dados referentes à potência gerada pelo biogás ao longo do funcionamento da CTRS BR040 de Belo Horizonte	42
Tabela 7	Dados para a vazão de metano ao longo do funcionamento da CTRS BR040 de Belo Horizonte, considerando a recirculação do chorume	44
Tabela 8	Dados referentes à potência gerada pelo biogás ao longo do funcionamento da CTRS BR040 de Belo Horizonte, considerando a recirculação do chorume	46

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1	O Resíduo Sólido Urbano	12
2.1.1	Características gerais e produção de RSU nas grandes cidades	12
2.1.2	Impactos do RSU e importância do tratamento	15
2.1.3	Tipos de destino do RSU	17
2.1.3.1	O aterro sanitário	21
2.1.4	Formas de utilização do RSU e do lixiviado para a produção de energia	26
2.1.4.1	Aproveitamento do metano naturalmente produzido pelo aterro	27
2.1.4.2	Aumento da produção de metano por recirculação do chorume	28
2.2	O caso de Belo Horizonte	32
2.2.1	Características gerais e comportamento do RS da cidade	32
2.2.2	Produção e viabilidade do aproveitamento do biogás	36
3	CONCLUSÕES	47
4	REFERÊNCIAS	49

1 INTRODUÇÃO

O tratamento do lixo produzido pelo homem se tornou, nos dias de hoje, uma prática indispensável. A produção de lixo (tecnicamente chamado de resíduo sólido) no mundo vem tomando níveis muito altos, em função do desenvolvimento da indústria e do crescimento das cidades. O aumento populacional, aliado à busca cada vez mais intensa pelo lucro, exige a produção de uma maior quantidade de alimentos e bens de consumo. Isso leva ao uso maior de matérias-primas e também à produção cada vez maior de resíduos (Sperry, 2009). Esse aumento na produção de resíduos ocasiona dificuldades na sua disposição e maiores riscos para a saúde da população. Um bom exemplo é o caso do estado de Nova York, EUA, e da cidade de Quebec, Canadá, em que a população moradora de regiões próximas aos aterros sanitários demonstrou, de acordo com estudos, séria propensão à incidência de vários tipos de câncer, quando comparada às pessoas que vivem longe desses aterros (Heller e Catapreta, 2003).

A disposição de resíduos sólidos urbanos – RSU – pode ser realizada de várias formas, sendo o aterro sanitário a técnica de maior aplicação no Brasil. Os aterros apresentam como vantagem a minimização dos problemas ambientais, já que existem boas técnicas de captação do gás produzido pela degradação anaeróbia desse resíduo e de recolhimento do lixiviado (chorume), os quais podem ser muito prejudiciais ao ambiente, devido à sua composição. Além disso, os custos envolvidos na construção de um aterro são muito menores em comparação com outras formas, como a incineração e a compostagem (Baird, 2002).

Uma importante implicação da disposição do resíduo sólido urbano é a possibilidade de geração de energia. O problema das fontes de energia tem sido um tema constante em discussões a respeito da questão energética no mundo, em função da busca por fontes renováveis. Na década de 1970, a crise do petróleo foi o acontecimento responsável pelo início dos estudos com relação à geração de energia pelo tratamento do lixo, uma vez que o petróleo é um recurso não-renovável, e pode passar, como foi observado então, por sérias variações de preço (Lima, 1995; Baird, 2002). Em alguns países, como Suíça, Holanda, Reino Unido, Noruega e Dinamarca, a

produção de energia através da digestão anaeróbica já foi implantada, tendo os estudos sido iniciados em 1992, no Tratado de Bioenergia da Agência Internacional de Energia (IEA) (Tafdrup, 1995). Além disso, a geração de energia também consome o gás produzido no aterro pela ação microbiana, composto, em geral, por metano e gás carbônico, os quais são **gases estufa**, o que ajudaria a minimizar também esse problema (Desideri, Di Maria *et al.*, 2003).

O caso da cidade de Belo Horizonte mostra claramente como é importante a correta disposição do RSU, além do seu tratamento (tanto do próprio lixo, quanto do lixiviado produzido). Atualmente discute-se a respeito da implantação do tratamento do RSU da cidade como um fato já extremamente necessário, já que o Aterro Sanitário de Belo Horizonte, localizado na BR-040, não está mais comportando o RSU produzido, cuja quantidade gira em torno de 6 mil toneladas. Além disso, o convênio com o Aterro Sanitário de Macaúbas, em Sabará, para onde são levadas cerca de 3,2 mil toneladas de lixo urbano, tem duração de apenas 25 anos (Franco, 2009). Assim, é possível perceber a importância de se implementar uma disposição adequada do lixo, ou uma forma de tratamento do mesmo na cidade, e de aproveitar os gases e o chorume gerados nesse processo.

O presente trabalho tem, dessa forma, o objetivo de analisar a questão do resíduo sólido de Belo Horizonte, com relação às suas características, à sua disposição e à produção de gases. A partir desse estudo, pretende-se analisar o potencial de geração de energia a partir do biogás produzido pelo RSU de Belo Horizonte.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Resíduo Sólido Urbano

2.1.1 Características e produção de RSU nas grandes cidades

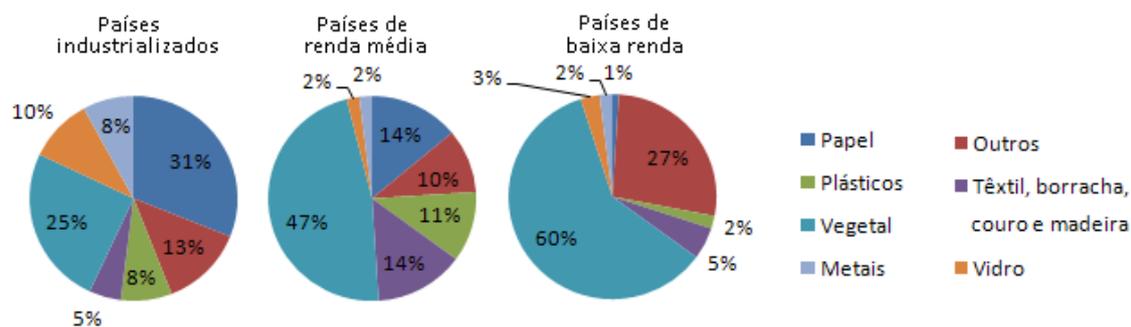
A produção de lixo é influenciada por inúmeros fatores, em geral, regionais e climáticos, o que afeta diretamente a sua composição e torna difícil a definição de um conceito exato para o lixo. Assim, considera-se como conceito geral, que o resíduo sólido urbano é *"todo resíduo sólido ou semi-sólido, gerado por residências, domicílios, estabelecimentos comerciais, prestadores de serviços e oriundos dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos"* (Silva, 2007).

Basicamente, a produção do RSU é influenciada por características locais e temporais, ligadas à região produtora. Dentre as características locais, incluem-se a questão econômica da região, o número de habitantes, a produção *per capita*, hábitos e costumes da população, nível educacional, entre outros. Por outro lado, as características temporais estão relacionadas às condições climáticas do local, como as variações sazonais, que implicam diretamente o comportamento da população. Por exemplo, no inverno e no verão, períodos de férias escolares, a produção de lixo sofre um aumento muito grande, o que exige uma preocupação maior com relação ao sistema de coleta por parte das autoridades competentes. Assim, nessas épocas, ocorrem variações no comportamento da população, em todos os sentidos, principalmente alimentação, o que reflete na composição do RSU.

O desenvolvimento e a expansão da indústria no mundo foram responsáveis pelo aumento mais que considerável da produção de resíduos sólidos. Isso porque o uso de matéria-prima por parte das indústrias é muito alto e a sua conversão em produtos, levando-se em conta as prováveis reações químicas que ocorrem nesse processo, levam à formação de subprodutos que, em geral, não são utilizados pela indústria e são, assim, descartados.

Nesse sentido, a questão econômica de um país reflete diretamente na produção de lixo: países com condições econômicas melhores (os países desenvolvidos) possuem um nível de industrialização mais elevado em relação aos outros países e, conseqüentemente, produzem mais resíduos (Lima, 1989). Por outro lado, o crescimento da população tem também um grande peso na produção de lixo urbano. De acordo com os estudos de Rita (1999), a população mundial era estimada em 6 bilhões de pessoas; para 2025, a previsão é de que se chegue a 9,3 bilhões. Com isso, como o que se observa é um crescimento acelerado e desordenado da população, as principais conseqüências são o aumento do uso das reservas mundiais e, obviamente, o aumento da produção de lixo (Rita, 2002).

Também as características do lixo são afetadas pela questão industrial, além de alguns outros fatores. Em geral, existem materiais que são inerentes à sua composição: sobras de alimentos, papeis, plásticos, embalagens, gases, vapores, poeira etc. (Sperry, 2009). Como dito anteriormente, o nível de industrialização de um país influencia diretamente na composição do seu RSU. O principal indicador dessa variação é a quantidade de matéria orgânica, como indica a Figura 1. Países em desenvolvimento e subdesenvolvidos normalmente apresentam a matéria orgânica como principal constituinte do lixo urbano, enquanto países industrializados apresentam papel como principal constituinte do RSU. Um bom exemplo é o caso do Brasil, um país em desenvolvimento, em que uma média de 52,5% do lixo urbano é composto por matéria orgânica. Além disso, a indústria é responsável pela inserção de novos materiais nos resíduos, como, por exemplo, novos tipos de embalagens e de acondicionamento de produtos (Baird, 2002; Freire e Cintra, 2009).



Fonte: Baird (2002), adaptada

Figura 1: Composição geral dos resíduos sólidos urbanos de países industrializados, em desenvolvimento e de baixa renda

A influência dos inúmeros fatores sobre a composição do lixo urbano faz com que suas quantificações sejam muito imprecisas. Por isso, essas determinações são feitas baseando-se em análises padronizadas por instituições como o Institute of Solid Waste da APWA (American Public Works Association). Tais análises levam em conta dados como as variações sazonais da região, as oscilações no número de habitantes, a expansão física da área urbana (fatores facilmente obtidos de entidades públicas), e a taxa de produção per capita (Lima, 1989).

No Brasil, a última pesquisa relacionada à geração de resíduos sólidos urbanos, a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), foi realizada no ano de 2000, pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). De acordo com essa pesquisa, a maior produção de RSU ocorre na região Sudeste (62%), em concordância com o seu maior desenvolvimento industrial em relação ao restante do país. Uma estimativa geral da geração de resíduos sólidos no Brasil é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Estimativa geral de resíduos sólidos no Brasil

Região	População Total		Geração de Resíduos (ton/dia)		Geração per capita (kg/hab/dia)
	Valor	Percentual (%)	Valor	Percentual (%)	
Brasil	169.799.170	100,0	228.413	100,00	1,35
Norte	12.900.704	7,6	11.067	4,8	0,86
Nordeste	47.741.711	28,1	41.558	18,2	0,87
Sudeste	72.412.411	42,6	141.617	62,0	1,96
Sul	25.107.616	14,8	19.875	8,7	0,79
Centro-Oeste	11.636.728	6,9	14.297	6,3	1,23

Fonte: PNSB (IBGE, 2000), adaptada

2.1.2 Impactos do RSU e importância do tratamento

Os dois maiores problemas do lixo urbano são a sua inesgotabilidade e a sua irreversibilidade. O principal fator que contribui para a inesgotabilidade é o aumento populacional, uma constante no mundo de hoje. Isso faz com que a produção industrial cresça, já que esse aumento leva a um consumo maior de todo tipo de produto, especialmente alimentos. A consequência direta disso é o aumento da produção de lixo, já que se trata de um processo inerente às atividades industriais. Além disso, a geração de lixo é irreversível, pois não existe possibilidade de retornar os produtos gerados ao seu estado original (matéria-prima e reagentes). Ou seja, as reações envolvidas são irreversíveis. É nesse sentido que um tratamento adequado desse resíduo se faz essencial, para reduzir impactos inevitáveis sobre o meio ambiente (Lima, 1989; Sperry, 2009).

O resíduo sólido urbano, ao ser disposto após a coleta, passa por uma série de processos químicos, físicos e biológicos, que correspondem à sua degradação, dos quais ocorre a geração de vários compostos, principalmente líquidos e gasosos. O problema desse material é a sua grande possibilidade de contato com o meio (água, ar, solo etc.), o qual pode produzir impactos talvez muito severos, tanto para a fauna e a flora, quanto para o ser humano.

A questão do lixo no solo está relacionada às alterações físicas, químicas e biológicas que ele promove. Existem muitos seres vivos que utilizam os resíduos encontrados no lixo como alimento, e até como abrigo, incluindo tanto microvetores (bactérias, fungos, vírus etc.) como macrovetores (ratos, baratas, moscas etc.). Dessa forma, a disposição inadequada do lixo pode levar ao desenvolvimento de seres patogênicos, principalmente pela presença dos microvetores, os quais são, muitas vezes, altamente resistentes a esse ambiente. Com relação aos macrovetores, os principais "representantes" seriam os ratos, os quais se reproduzem mais nas condições encontradas, por exemplo, nos lixões (Lima, 1989).

A poluição do ar devida à disposição do RSU é caracterizada pelo lançamento de gases responsáveis pelos mais variados problemas

ambientais no mundo de hoje. Um desses gases, o principal deles, é o metano (CH₄), produzido em larga escala por ação de microrganismos anaeróbios, sendo ele um dos chamados gases estufa (*greenhouse gases*), juntamente com o CO₂, inclusive, com um potencial poluidor cerca de 21 vezes maior que este. Outros gases também produzidos são os CFC's (clorofluorcarbonos), o ozônio e os óxidos de nitrogênio (Barros, 2009).

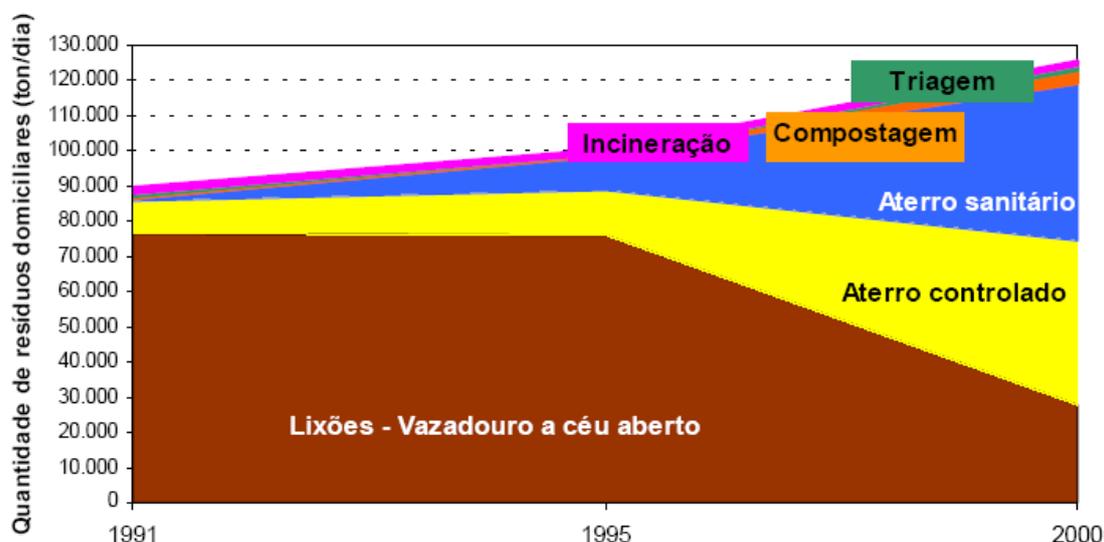
Um dos produtos mais característicos do processo de degradação do lixo urbano é o lixiviado, também conhecido como chorume. Trata-se de um líquido percolado, de coloração negra, produzido pela ação de microrganismos sobre o RSU. O impacto que pode ser gerado por esse líquido é a contaminação de solos e águas subterrâneas devido ao seu transporte, por exemplo, pela água da chuva. Como o lixiviado possui, em sua composição, compostos de alta toxicidade, como metais pesados, uma alta concentração de matéria orgânica e uma difícil biodegradabilidade, é de extrema importância que esse líquido seja coletado e devidamente tratado. (Sperry, 2009).

No Brasil, o problema se concentra no fato de que as administrações municipais, responsáveis por essa questão dos resíduos em grande parte do país, desconhecem as variáveis ambientais a eles relacionadas, o que leva a uma administração ineficiente e ineficaz do setor (Deus, 2004). De acordo com Ferreira e dos Anjos (2001), em toda América Latina, inclusive no Brasil, observa-se pouca preocupação com a atividade de limpeza urbana, o que é perceptível diante das poucas medidas tomadas para reverter a situação negativa em que se encontram os seus sistemas de gerenciamento de resíduos. Isso se reflete, como apontam vários estudos, em deficiências nos sistemas de disposição final e coleta de resíduos, aliadas à ausência de uma política de proteção à saúde dos trabalhadores envolvidos com esse setor. O principal fator ligado a esses problemas é a existência de poucas pesquisas a esse respeito e, quando existem, não tratam da saúde e do meio ambiente. Da mesma forma, não existe, ou existe pouca pressão da população na exigência de melhorias com relação à disposição e ao tratamento dos resíduos, limitando-se essa preocupação à coleta dos mesmos. Um bom exemplo é que, no Estado de São Paulo, no ano de 1998, foi verificado que 75% dos seus municípios dispõem os seus resíduos em

vazadouros. No ano seguinte, foi detectado que mais de cinco milhões de pessoas no mundo inteiro morrem devido a doenças ligadas aos RSU (Ferreira, 2001).

2.1.3 Tipos de destino do RSU

A Figura 2 mostra como as várias formas de disposição do lixo urbano foram utilizadas no Brasil ao longo dos anos.



Fonte: Jucá (2002)

Figura 2: Evolução dos métodos de disposição do resíduo sólido por ano no Brasil

A partir da análise da figura, é possível perceber o quão rapidamente a evolução da disposição de resíduos sólidos ocorreu no Brasil (um período de 10 anos), o que revela a intensidade dos estudos acerca dessa questão, e, assim, a sua importância. A preocupação com a destinação final dos resíduos teve início no ano de 1880, à época do Império, em que D. Pedro II aprovou o contrato de limpeza e irrigação, executado por Aleixo Gary e Luciano Francisco Gary (sobrenome do qual se originou a palavra "gari" do vocabulário atual) (Jucá, 2002).

Inicialmente, como se pode observar na figura acima, até a metade da década de 1990, a principal forma de disposição eram os vazadouros ou lixões (Jucá, 2002). Os vazadouros consistem basicamente em terrenos a

céu aberto onde o lixo urbano bruto é despejado e espalhado, sem a tomada de medidas de proteção ao meio ambiente e à saúde (Pinto, 1979; Bento, 2008). Entretanto, como se pode observar também na Figura 2, o uso dessa prática foi diminuindo ao longo da década de 1990. Isso se deve ao fato de que os vazadouros são destinos completamente inviáveis, em todos os sentidos. Em se tratando de uma disposição ao ar livre, diante da decomposição desse lixo, ocorre intensa contaminação de todos os meios (ar, águas subterrâneas, solo) em função do lançamento de gases poluentes, da infiltração (do chorume) por ação, por exemplo, da água da chuva, e também do solo. Além de um problema ambiental, os lixões são, também, um problema visual e social, como observado na Figura 3. A população que vive perto de um lixão presencia diariamente um forte mau cheiro, além da proliferação de animais transmissores de doenças (insetos, roedores), além da questão visual. Por isso, diante do aumento da preocupação com o meio ambiente, aliada ao desenvolvimento das pesquisas nesse meio, houve diminuição dos lixões, que deram lugar a outras formas de disposição (Pinto, 1979). Entretanto, apesar de todos esses problemas, trata-se ainda de uma forma muito utilizada, pois é a mais simples, que exige o mínimo de tecnologia ou de mão-de-obra.



Fonte: Estado de Minas (2009)

Figura 3: Lixão do bairro Santa Tereza, em Belo Horizonte

Um outro processo comumente utilizado é a incineração, que, na verdade, antes de uma forma de disposição, é uma técnica de redução do volume do lixo, que facilita a sua disposição/eliminação. O tratamento desse lixo por

incineração faz uso da combustão, em que o lixo é queimado, sendo transformado em produtos como gases (principalmente CO₂), partículas, escória e cinzas (Pinto, 1979). Apesar de não ser muito empregada no Brasil, a incineração é muito utilizada em vários países, como Japão e Dinamarca, que têm metade dos resíduos domésticos incinerados. Apesar de muito utilizada, a incineração possui muitos problemas ambientais. O principal deles é, obviamente, a poluição do ar. Esse processo produz os gases comuns da combustão, gás carbônico e vapor d'água, que não são, de todo, nocivos para o meio ambiente. Entretanto, como o lixo urbano não é composto apenas por matéria orgânica (fonte desses gases), ocorre a produção de outros gases, como aqueles derivados de enxofre e nitrogênio, que são responsáveis por vários problemas ambientais, bem como gases da combustão incompleta, como o monóxido de carbono, dentre outros. Para tentar resolver esse problema, as incineradoras utilizam filtros, que são responsáveis por reter grande parte dos poluentes. Entretanto, o uso desses filtros leva a um aumento excessivo dos custos de operação, o que torna a incineração uma técnica também inviável para o tratamento do lixo (Pinto, 1979; Baird, 2002; Rita, 2002).

Paul Connett defende, em sua palestra na 4ª Conferência Anual de Administração Internacional (Connett, 1998), que a incineração de resíduos urbanos é um processo cada vez mais inviável, principalmente diante da entrada do mundo no século XXI. Apesar da preocupação das indústrias com a poluição do ar, a contaminação alcançou também outros "meios", como, por exemplo, a presença de dioxinas e compostos relacionados a elas em alimentos e tecidos. Da mesma forma, ele menciona também a questão econômica, em que a preocupação com a não-poluição do meio pelas incineradoras levaria ao encarecimento desse processo no manuseio, no descarte e na contenção dos resíduos gerados (Connett, 1998). Apesar disso, a incineração ainda é vista como uma técnica promissora de tratamento dos resíduos sólidos urbanos quando seguida da co-recuperação de energia. Em seus estudos, Morgado e colaboradores (2006) propuseram a implantação desse sistema na região metropolitana de Goiânia, como uma complementação ao Aterro Sanitário de Goiânia, que já se encontra

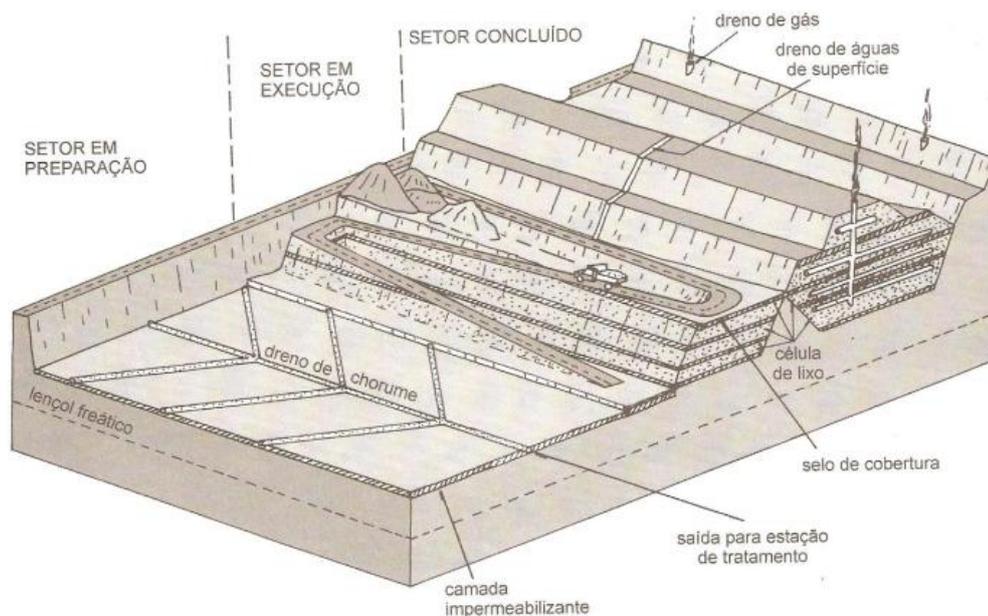
parcialmente saturado, sendo inviável projetar a construção de um novo aterro (Morgado, 2006).

A compostagem é um processo de tratamento para resíduos sólidos urbanos que envolve basicamente a parte orgânica do resíduo sólido, que corresponde a aproximadamente 47% do RSU nos países em desenvolvimento (Baird, 2002). A compostagem consiste na decomposição biológica e estabilização da matéria orgânica, sob condições termofílicas (temperatura elevada pela produção de calor – aproximadamente 45°C), levando à produção de um material estável, livre de patógenos, que pode ser utilizado como adubo. A compostagem pode ser dividida em aeróbia ou anaeróbia, em que, no primeiro caso, o processo ocorre na presença de oxigênio e, no outro, ocorre na sua ausência; das duas, a mais utilizada é a aeróbia, uma vez que o processo anaeróbio produz odores desagradáveis, devido à produção de gases como sulfeto de hidrogênio, além de produzir menos energia que o processo aeróbio. Por isso, os processos de compostagem são, em geral, acompanhados por uma aeração, que visa à redissolução de oxigênio no meio reacional, para promover o desenvolvimento dos microrganismos aeróbios (Haug, 1993).

Apesar disso, a compostagem também apresenta desvantagens que inviabilizam, em parte, o seu uso no tratamento de resíduos sólidos urbanos. Mesmo a matéria orgânica sendo o principal componente do lixo brasileiro, a restrição da compostagem ao tratamento apenas dessa parte do RSU é uma condição indesejável, uma vez que a parte inorgânica também exige algum tipo de controle, o qual é mais difícil de ser realizado. Além disso, esta e outras desvantagens levam ao aumento dos custos do processo, como a exigência de uma separação mais rigorosa do lixo, pois não pode haver matéria inorgânica na fração a ser tratada por compostagem, em que deve ocorrer principalmente a exclusão de metais pesados, os quais podem inibir o processo e contaminar o composto (Rita, 2002).

2.1.3.1 O aterro sanitário

A Figura 4 mostra a forma de disposição dos resíduos sólidos urbanos mais utilizada no Brasil, o aterro sanitário. Nele, os resíduos são dispostos em uma escavação no solo, onde técnicas de engenharia e normas específicas, como a NBR 8419, que classifica uma área de disposição como aterro sanitário (ABNT, 1984), permitem o confinamento seguro e a proteção à saúde pública. Esse confinamento é realizado alternando-se camadas de lixo e camadas de material inerte, de forma a minimizar os impactos ambientais e sociais (D'almeida, 2000). Por outro lado, o aterro sanitário pode ser considerado também um biodigestor, pois sua estrutura favorece o processo de digestão anaeróbia do material disposto, permitindo a estabilização do mesmo (De Castilhos Junior, 2006).



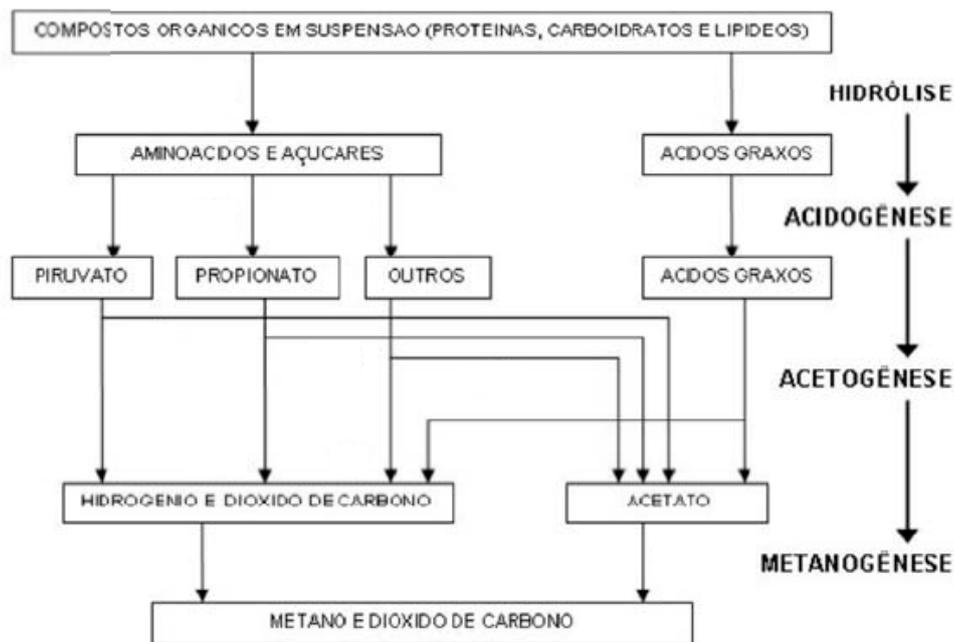
Fonte: D'Almeida (2000)

Figura 4: Estrutura de um aterro sanitário.

Segundo Castilhos Jr. (2006), o aterro sanitário é projetado para promover o aceleração do processo de digestão anaeróbia, que consiste na transformação de compostos orgânicos complexos, como lipídeos e carboidratos, em moléculas mais simples, pela ação de diferentes espécies de microrganismos, na ausência de oxigênio. Cineticamente, três etapas compõem esse processo: a hidrólise, a acidogênese/acetogênese e a

metanogênese. Essa divisão pode ainda sofrer variações, em que alguns autores consideram a acidogênese e a acetogênese como etapas separadas (Chernicharo, 1997; Castilhos Junior, 2006).

A Figura 5 mostra, de forma esquemática, o processo de degradação anaeróbia.



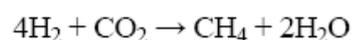
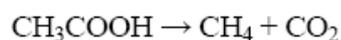
Fonte: Castilhos Junior (1997) – adaptado.

Figura 5: Esquema do processo de degradação anaeróbia.

Na primeira etapa da degradação, a hidrólise, as moléculas mais complexas – lipídeos, carboidratos e proteínas – são convertidas em moléculas mais simples – ácidos graxos (cadeia longa, de 15 a 17 carbonos) e glicerina, mono e dissacarídeos e aminoácidos. Isso acontece através da excreção de exoenzimas pelas bactérias envolvidas, para as quais a hidrólise é necessária devido à sua incapacidade de absorver as moléculas mais complexas, que são muito grandes para passar pelas suas paredes celulares. Essa etapa é considerada a etapa lenta do processo, cuja velocidade é determinante para a velocidade global da produção do biogás (Chernicharo, 1997; Castilhos Junior, 2006).

A segunda etapa, a acidogênese, corresponde ao processo de metabolização dos produtos da hidrólise no interior das respectivas bactérias. Assim, elas utilizam, naturalmente, endoenzimas, que serão responsáveis por produzir compostos como ácidos graxos voláteis (propiónico, butírico, valérico etc.), bem como ácido sulfídrico, hidrogênio, entre outros (Chernicharo, 1997). A acidogênese, segundo Castilhos Jr. (2006), pode levar também à produção de compostos da acetogênese. É nesse sentido, portanto, que alguns autores consideram-nas uma etapa única. Isso acontece devido à pressão parcial de hidrogênio. Quando esta é baixa, o trabalho das bactérias é direcionado para a formação de hidrogênio, dióxido de carbono e acetato, que são os produtos da acetogênese. Por outro lado, quando essa pressão aumenta, os principais produtos são os ácidos propiónico e butírico. Estes, portanto, numa terceira etapa, são convertidos em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono (Castilhos Junior, 2006).

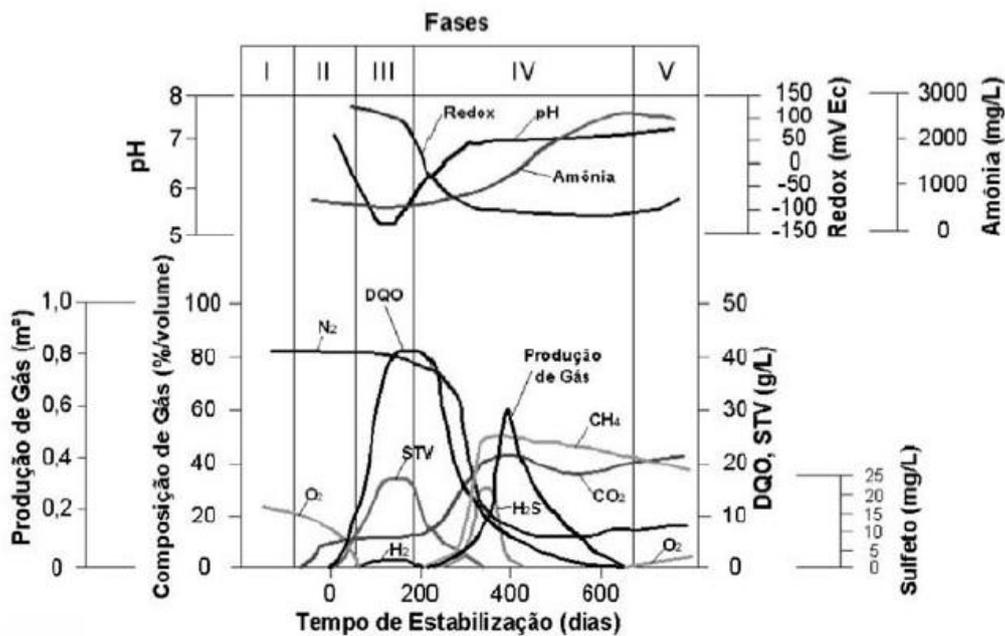
A quarta e última etapa da degradação do RSU é a metanogênese. Nessa etapa, o acetato e o dióxido de carbono formados na acetogênese, bem como outros compostos como metanol, são convertidos em metano e novamente dióxido de carbono pelas bactérias metanogênicas, conhecidas como arqueas metanogênicas, que são estritamente anaeróbias. Elas possuem uma taxa de crescimento mais baixa e são mais sensíveis às condições do meio (Chernicharo, 1997; Russo, 2005). Algumas das reações que podem ocorrer nessa etapa são apresentadas na Figura 6. O acetato pode ser produzido também por bactérias que degradam o sulfato, bem como pelas homoacetogênicas, que utilizam, para isso, hidrogênio e dióxido de carbono. Ele é então descarboxilado pelos microrganismos redutores do CO₂, produzindo o metano (Castilhos Junior, 2006).



Fonte: Russo (2005)

Figura 6: Possíveis reações para a etapa metanogênica da degradação anaeróbia.

Além das etapas de degradação anaeróbica, considera-se também, em um aterro, a presença de fases relacionadas com a estabilização dos resíduos em função do tempo. Segundo Castilhos Jr. (2006), elas são cinco, como mostra a Figura 7.



Fonte: Castilhos Junior (2006)

Figura 7: Fases de estabilização dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários.

Essas fases de estabilização ocorrem, na verdade, ao mesmo tempo, uma vez que a deposição de novas cargas de resíduos acontece constantemente. Assim, quando uma nova carga é adicionada, ela entra na primeira fase, enquanto a anterior já está, por exemplo, na segunda, e assim por diante. Portanto, é possível afirmar que os processos que acontecem em cada fase interferem uns nos outros, de modo que o sistema se torna complexo. Assim, a descrição das fases sofre simplificações, com o objetivo de permitir o seu entendimento (Castilhos Junior, 2006).

A primeira fase de um aterro sanitário é a chamada fase inicial ou fase de aclimação, que corresponde ao momento em que o lixo é primeiramente despejado no aterro. O ponto marcante dessa fase é a presença de oxigênio no meio, o que permite que se inicie um processo de degradação aeróbica, em que as bactérias consomem material advindo, por exemplo, do chorume recirculado ou do solo de recobrimento, utilizando, para isso o oxigênio

disponível. A fase seguinte é a fase de transição, em que o ambiente passa de aeróbio para anaeróbio. Assim, observa-se uma queda na concentração de oxigênio do meio. Devido ao processo de degradação ocorrido na primeira fase, observa-se também uma queda do pH pela produção de ácidos orgânicos, além da presença, com conseqüente aumento, da concentração de dióxido de carbono, produto também desse processo. O chorume passa também a ter concentrações significativas de matéria orgânica, representadas pelo aumento da DQO (demanda química de oxigênio), e de ácidos orgânicos. A terceira fase de estabilização dos resíduos sólidos no aterro é conhecida como fase ácida. Nesse ponto, tem-se o início do processo de degradação anaeróbia, com as etapas de hidrólise, acidogênese e acetogênese. Tendo em vista que os produtos da acetogênese são o ácido acético, o hidrogênio e o dióxido de carbono, a concentração desses dois gases aumenta, bem como o sistema sofre uma queda brusca do pH. Assim, os compostos orgânicos tóxicos, juntamente com os metais, principalmente os pesados, sofrem solubilização no chorume, o que faz com que sua DQO aumente também bruscamente. O que facilita todos esses processos é a queda do potencial redox, devido basicamente à mudança dos aceptores de elétrons, que passam a ser moléculas como os nitratos e os sulfatos. A quarta fase corresponde à fase metânica, a mais longa do processo, em que acontece, naturalmente, a metanogênese. Essa fase corresponde ao consumo dos ácidos produzidos na acetogênese pelas arqueias metanogênicas (bactérias responsáveis pelo processo). Portanto, observa-se, agora, um aumento brusco do pH, auxiliado pelo aumento da produção de amônia, fazendo com que a solubilização de materiais no chorume diminua, o que é perceptível pela queda na DQO. As concentrações de metano e dióxido de carbono aumentam, bem como a concentração de ácido sulfídrico, um outro possível produto da metanogênese, em menor quantidade. Por fim, a velocidade de produção do biogás sofre uma estabilização, com as concentrações de metano e dióxido de carbono mantendo-se nas faixas de 50 a 70% e 30 a 50%, respectivamente. A quinta e última fase é a fase de maturação. Trata-se da fase de estabilização final do aterro, em que a produção de biogás sofre uma diminuição, que vem desde a quarta fase. O que se tem nesse momento é uma supersaturação de matéria orgânica no sistema, o que

dificulta a atividade microbiana. Assim, as quantidades de gás se estabilizam e o aterro deixa de produzir o biogás (Russo, 2005; Castilhos Junior, 2006).

Alguns fatores são essenciais para se determinar o sucesso da degradação anaeróbia em um aterro sanitário. Segundo Cintra (2003), estes são a concentração de sólidos, a umidade, a alcalinidade, o pH e os nutrientes. Os sólidos orgânicos consistem basicamente no substrato que será utilizado pelos microrganismos ao longo do processo. Assim, quanto maior a concentração de sólidos no meio, maior será a taxa de conversão do material em biogás. A umidade, por sua vez, encontra sua importância no fato de a água ser essencial para a sobrevivência das bactérias, bem como é o principal meio onde ocorrem as reações, variando de acordo com as condições climáticas de cada região. A temperatura está relacionada à desnaturação de proteínas e enzimas dos microrganismos envolvidos. Dentre eles, as bactérias metanogênicas são as mais sensíveis às alterações de temperatura. Em um aterro, ela é determinada pela temperatura ambiente. O pH indicado para o processo de digestão anaeróbia está na faixa de 6,5 a 7,5, ideal para as bactérias, principalmente as metanogênicas, também mais sensíveis à variação desse parâmetro. Além disso, um pH acima de 8,0 favorece a formação de amônia, que pode ser tóxica para os microrganismos. Com relação aos nutrientes, é importante a composição química do substrato. Os nutrientes essenciais variam de microrganismo para microrganismo, não podendo ultrapassar, nem para menos nem para mais, a faixa adequada para eles. Os principais nutrientes são carbono, oxigênio, nitrogênio, fósforo e enxofre (Cintra, 2003).

2.1.4 Formas de utilização do RSU e do lixiviado para a produção de energia

Apesar de ser uma boa alternativa para a disposição de resíduos sólidos urbanos, um dos grandes problemas dos aterros sanitários é a geração de biogás, composto, em geral, por dióxido de carbono e metano. Esse processo e o tratamento anaeróbio de esgoto e águas residuárias são

grandes produtores de metano, cujo potencial poluidor é 23 vezes maior que o do gás carbônico. Tais gases podem ser utilizados para produção de energia, o que, segundo o Protocolo de Quioto, pode ser uma atividade negociada (Dias, 2009). Essa negociação se dá, segundo Sato e Azevedo (2008), através da instalação de ações ou projetos em países em desenvolvimento que permitam a não-emissão de dióxido de carbono na atmosfera. A partir desses projetos, a cada tonelada não emitida, o país recebe um certificado (crédito), que pode ser comercializado no mercado internacional, gerando o que se chama de "mercado de carbono" (Sato, 2008).

O uso do biogás para se obter energia elétrica envolve diretamente o seu poder calorífico inferior (energia liberada na forma de calor durante a combustão - PCI), que varia de 4.300 a 6.850 kcal/m³. Isso porque uma das formas de obter essa energia é através de motores de combustão interna (ciclo OTTO), acoplados a geradores, que poderiam ser utilizados, por exemplo, nas residências, para o aquecimento de água ou iluminação. Tais motores correspondem aos motores de quatro tempos de carros, que utilizam o combustível na forma gasosa mantido a alta pressão pelo pistão; uma faísca é acesa pela vela, causando a ignição do gás, que expande, empurrando o pistão. Esse movimento contínuo do pistão gera energia mecânica, a qual é transformada pelos geradores em energia elétrica. Com isso, observa-se que o biogás pode ser utilizado também como combustível de veículos. Considerando-se o PCI do biogás 5.000 kcal/Nm³, tem-se, por exemplo, que um motor ciclo OTTO a gás, com potência máxima de 30kW (devido às perdas de eficiência, essa potência pode cair para 25 a 28 kW) e rendimento de 35%, consome 0,49 m³ de biogás por kWh de potência (IENO, 1993).

2.1.4.1 Aproveitamento do biogás produzido naturalmente pelo aterro

A produção de biogás em um aterro está diretamente ligada à quantidade de matéria orgânica presente no mesmo. Dessa forma, quanto maior o teor de matéria orgânica na composição do lixo aterrado, maior é a produção de

biogás. Como mostrado na Figura 1, a quantidade de matéria orgânica no lixo varia com o nível de industrialização do país. No caso do Brasil, a proporção de matéria orgânica no lixo é relativamente elevada, por se tratar de um país em desenvolvimento. Dessa forma, é de se esperar que a sua produção de biogás seja elevada, o que torna promissor o seu uso para a produção de energia.

As pesquisas de Barros e Filho (2009) e Linard e Aquino (2009) apresentam avaliações da viabilidade do uso do biogás dos aterros sanitários de Paraisópolis (MG) e Caucaia (CE), respectivamente. No primeiro, os autores realizaram estudos em duas regiões diferentes do aterro de Paraisópolis, uma com reciclagem e compostagem dos resíduos, e a outra sem essas operações. Para isso, primeiramente foi determinada a composição gravimétrica dos resíduos no aterro, em que a quantidade de matéria orgânica foi predominante: 73,02%. Essa determinação se dá, em geral, através da separação mecânica direta dos componentes do lixo, com posterior pesagem de cada um, com a prévia pesagem da massa total do lixo. De posse desses dados, foram calculadas as demandas energéticas para cada cenário e a produção de biogás pelo aterro. Esta foi determinada através do *software Landfill Gas Emissions Model (LandGEM)*, que forneceu uma estimativa de produção de $3,64 \times 10^6$ m³/ano de biogás, que poderia ser evitada pelo uso desse composto para a geração de energia (Barros, 2009).

Por outro lado, Linard e Aquino (2009) estudaram a produção de biogás pelo aterro da cidade de Caucaia, no Ceará, e, conseqüentemente, a viabilidade da produção de energia por esse biogás. Para isso, foram coletados dados a respeito da disposição dos resíduos sólidos e foi levantado o histórico do aterro com a quantidade de resíduos produzidos desde sua abertura até o seu fechamento. Para efetuar os cálculos, o *software* utilizado foi o *BIOGÁS – GERAÇÃO E USO ENERGÉTICO*, Versão 1.0, cujos resultados indicaram um pico de produção de biogás em 2007 ($69.681,95 \times 10^3$ m³/ano), uma produção mínima de 487kW e máxima de 58.880kW, resultados que levaram à conclusão de que o aterro possui, de fato, vocação energética (Linard, 2009). Em termos energéticos, o volume obtido por Barros e Filho (2009) geraria aproximadamente 7,43 GWh/ano,

considerando-se o valor de 0,49 m³ de biogás consumidos para gerar 1 kWh de potência. Por sua vez, o valor de 58.880 kW encontrado por Linard e Aquino (2009) corresponderia à potência gerada por aproximadamente 1962 motores de combustão interna, que poderiam abastecer, por exemplo, 9810 chuveiros, com potência de 6 kW.

De acordo com os estudos de Dias e colaboradores (2009), o aterro de Içara, localizado no estado de Santa Catarina, com uma vida útil prevista para 20 anos (2005 – 2025) recebe resíduos de 24 municípios, totalizando cerca de 7 mil toneladas por mês. Os dados foram coletados utilizando equipamentos que mediam a velocidade de saída do gás, a sua composição e a temperatura em 12 drenos, responsáveis por captar o gás liberado pelo aterro. Com esses dados, foi possível calcular a vazão de saída do gás. A partir desses resultados, estimou-se que a taxa de geração anual de biogás no aterro foi entre 24,7 e 29,8 Nm³/t.ano (unidade de vazão em massa, com o "N" para transformar a unidade de volume em unidade de massa), levando-se em conta que estão depositados no aterro 219.418 t de resíduos e que a eficiência da coleta seja de 70%. Tais resultados estão acima dos obtidos nos EUA (1 a 14 Nm³/t.ano), e também de outros resultados obtidos no Brasil (5,6 Nm³/t.ano no aterro Delta, em Campinas). Além disso, a vazão de metano encontrada foi de 188 a 232 Nm³/h, numa concentração (no biogás) de aproximadamente 46,9% (Dias, 2009).

2.1.4.2 Aumento da produção de metano por recirculação do chorume

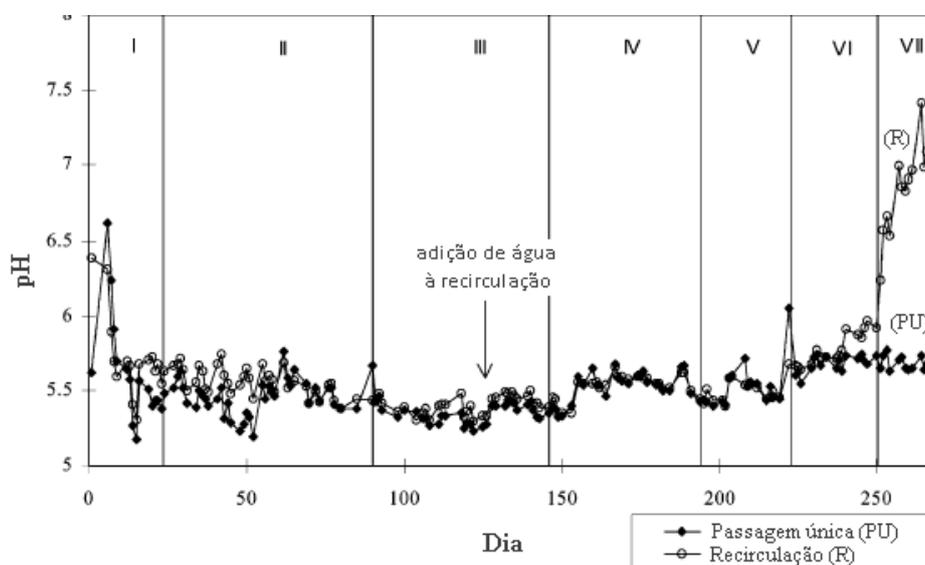
Os aterros sanitários, apesar de serem a forma ideal de disposição dos resíduos sólidos urbanos, apresentam, também, alguns problemas, como a formação do chorume (líquido lixiviado) e a falta de espaço para o seu desenvolvimento. Assim, estudos têm sido realizados na busca por formas de acelerar a digestão anaeróbia ocorrida nesses depósitos, dentre as quais se destaca a recirculação do chorume. O estudo realizado por Libânio e colaboradores (2003), em Belo Horizonte, mostrou que essa prática acelera o processo de degradação de compostos orgânicos, mas apenas nas suas

etapas iniciais. Além disso, observou-se uma breve sucessão entre as fases acidogênica e metanogênica após 120 dias, pelo aumento da concentração de CH₄ e queda da concentração da matéria orgânica solúvel (Libânio, 2003).

A recirculação do chorume, segundo De Moraes (2005), consiste no retorno do líquido ao aterro, em geral por aspersão, no qual a decomposição da matéria orgânica é acelerada e o volume do percolado é reduzido devido à sua evaporação. Nesse processo, é essencial que sejam controlados o volume e a frequência com que a recirculação é feita, de forma a maximizar a estabilização do aterro e evitar a geração de um ambiente ácido, o que influencia na atividade metanogênica, alterando a cinética de decomposição dos resíduos (De Moraes, 2005). Em seus estudos, Reinhart e Al-Yousif (1996) constataram que, no processo de recirculação, o próprio aterro funciona como um biorreator, em que o líquido é recirculado tantas vezes quantas sejam necessárias para que ocorra uma estabilização do mesmo. Uma das características dessa estabilização é a queda no teor de metais. Em aterros sanitários convencionais, a principal forma de remoção de metais do meio é a lixiviação, em que esses metais são "arrastados" pelo líquido em percolação, concentrando-se no chorume. Por outro lado, em aterros que utilizam a recirculação, os metais são principalmente removidos pela precipitação na forma de sulfetos e hidróxidos. Isso porque a recirculação confere uma característica redutora ao ambiente, que leva à transformação de sulfatos em sulfetos e, em condições anaeróbicas, eles de fato provocam uma diminuição na concentração de metais do chorume. Além disso, o ambiente neutro, e até básico, promovido pela recirculação, faz com que ocorra a formação dos hidróxidos (Reinhart, 1996).

Com relação à produção de gases, o que se observa nesse processo é o aumento da quantidade de gás produzido, tanto devido à aceleração da produção quanto pelo retorno da matéria orgânica ao aterro pelo chorume recirculado. Exemplos de estudos que comprovam esse fato são os realizados pela Delaware Solid Waste Authority, em que foi observado um aumento da produção de biogás em 12 vezes, e por Palumbo, no Alachua County (Florida), em que o dobro foi observado (Reinhart, 1996).

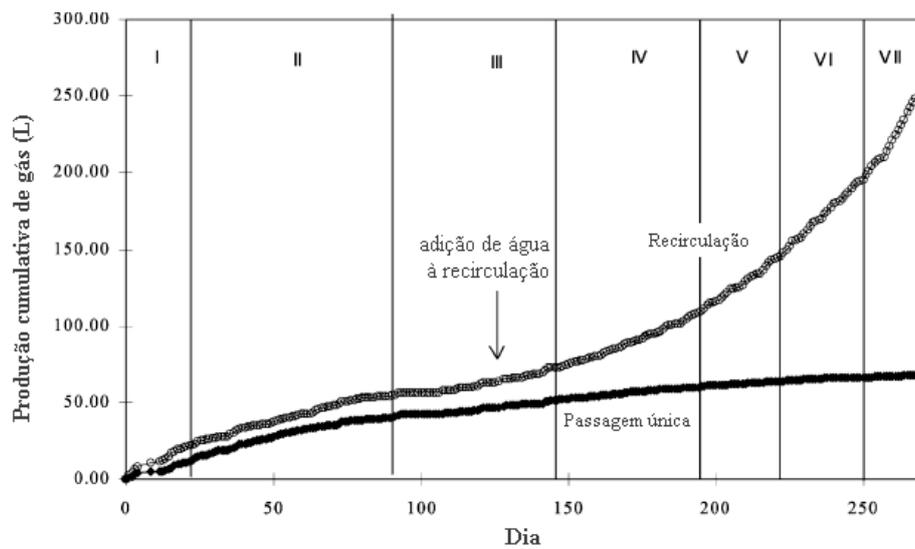
Šan e Onay (2001) realizaram um estudo em que foi observado o comportamento de um aterro sanitário, através do uso de biorreatores que funcionaram como aterros. O resíduo sólido empregado nesse experimento se assemelhava ao resíduo sólido urbano de Istambul, em sua composição: 76% de alimentos, 12% de papel, 4% de plásticos, 4% de tecidos, entre outros. A operação desses aterros fictícios seguiu uma sequência de sete fases, em que o resíduo possuía, inicialmente, por volta de 80% de umidade. Em cada fase, 1L de água era adicionado, de forma a manter essa umidade e a recirculação era feita em um número de vezes definido para cada uma. A duração total do experimento foi de aproximadamente 300 dias. Os resultados obtidos foram comparados entre si, de acordo com o regime empregado: passagem única do resíduo ou recirculação do chorume. Foram observados parâmetros como pH, produção de biogás e concentração do biogás. Como é possível observar na figura 8, ambos os gráficos tiveram configurações semelhantes, até o dia 222, quando a frequência de recirculação foi ampliada e os valores de pH aumentaram no reator de recirculação (San, 2001).



Fonte: Šan *et al.* (2001), adaptada

Figura 8: Valores de pH em aterro fictício com e sem recirculação

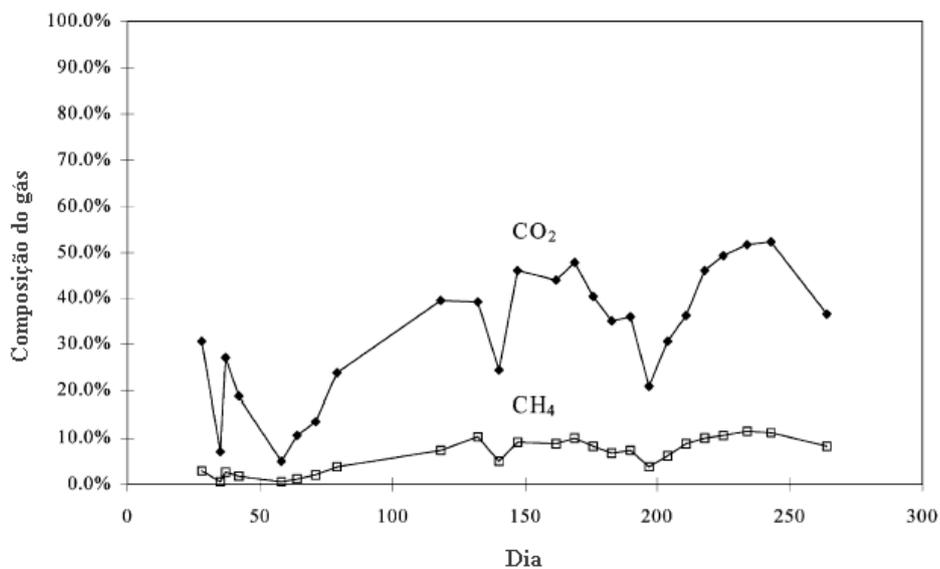
Na figura 9, observa-se o comportamento dos aterros em relação à produção de gás. O volume de gás produzido nos reatores de recirculação foi muito maior que nos de passagem única do resíduo: 269L contra 70L, o que indica o potencial de geração de biogás nesse tipo de operação.



Fonte: Šan *et al.* (2001), adaptada

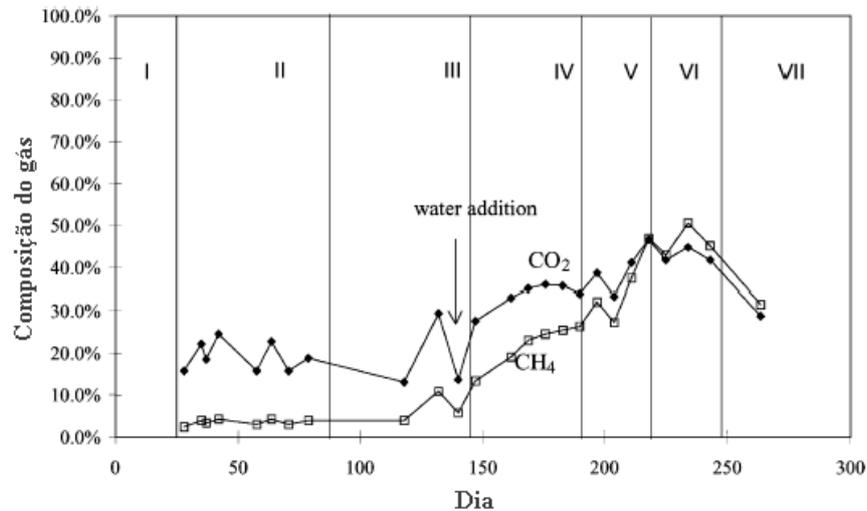
Figura 9: Comportamento dos aterros com relação à produção acumulada de gás, com passagem única de matéria orgânica e recirculação do chorume.

Com relação à composição do biogás, houve também uma pequena semelhança entre os gráficos, mas, a partir do dia 150, a concentração de metano sofreu um aumento considerável no aterro com recirculação, o que pode ser observado nas figuras 10 e 11 (San, 2001).



Fonte: Šan *et al.* (2001), adaptada

Figura 10: Composição do gás produzido no aterro de passagem única de matéria orgânica.



Fonte: Šan *et al.* (2001), adaptada

Figura 11: Composição do gás produzido no aterro com recirculação do chorume

2.2 O Caso de Belo Horizonte

2.2.1 Características gerais e comportamento do RS da cidade

O lixo de Belo Horizonte, devido ao seu volume, exige uma grande estrutura de planejamento e execução dos serviços de limpeza, desde a coleta, até a disposição final. Nesse sentido, o Aterro Sanitário de Belo Horizonte foi criado em 1975, para suprir uma demanda ligada ao crescimento da produção de lixo pela população. Com relação ao tratamento do biogás produzido pelo lixo, em 1989, foi firmado um convênio entre o Estado de Minas Gerais e a GASMIG (Companhia de Gás de Minas Gerais), cujo propósito era organizar a exploração do gás metano (um dos componentes do biogás). Posteriormente, devido ao aumento da preocupação ambiental, em 1994, gases e líquidos emitidos passaram a ser tratados para melhorar o controle ambiental nos aterros.

O aterro, como mostra a Figura 12, funciona numa área de 144,9 hectares, na região Noroeste da capital mineira, rodeado pelos bairros Pindorama, Dom Bosco, Glória, Filadélfia, Camargos e os Conjuntos Califórnia I e II. O grande problema provocado pela presença do aterro é o fato de a população ao redor da região ter crescido de forma exponencial. Com isso, os vários moradores localizados próximos ao aterro passam por situações de mau cheiro, de doenças etc. E, conseqüentemente, cresceu também o volume de lixo produzido pela população. Como observado na Tabela 2, a quantidade diária de RSU aterrada já passa das 6000 t, das quais 49,69% estão no Aterro da BR040 e o restante no Aterro de Macaúbas, como mostra a Tabela 3. Além disso, o aterro já está em processo de desativação, pois não mais comporta todo o lixo produzido por Belo Horizonte, tendo em vista, como mostra a Figura 13, que 95% dos resíduos produzidos vão para o aterro (Amaral, 2006).



Figura 12: Vista do Aterro Sanitário de Belo Horizonte

Tabela 2: Resíduos destinados em Belo Horizonte

<i>DESTINAÇÃO</i>	<i>CLASSE</i>	<i>t/dia</i>		<i>%</i>	<i>Kg/hab. x dia</i>
ATERRAGEM	RCD	559.188,77	3.039,07	44,46%	1,25
	RDO	293.040,77	1.592,61	23,30%	0,65
	RPU	222.616,25	1.209,87	17,70%	0,50
	RSS	5.571,52	30,28	0,44%	0,01
	RSU	114.924,41	624,59	9,14%	0,26
ATERRAGEM Resultado		1.195.341,72	6.496,42	95,03%	2,67

Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte (2009), adaptada

Tabela 3: Serviços de aterragem - % da massa aterrada

DESTINO	%
CTRS BR040	49,69%
CTRS MACAÚBAS	50,31%
Total Resultado	100,00%

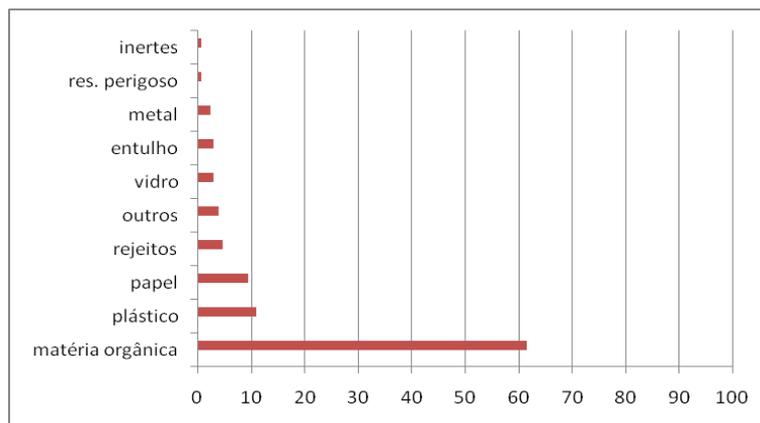
Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte (2009), adaptada



Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte (2009)

Figura 13: Porcentagem de destinação dos resíduos em Belo Horizonte

Belo Horizonte apresenta um contraste com relação ao seu resíduo sólido. Apesar de o Brasil ser um país de renda média, o RS da cidade apresenta o perfil de um país de renda baixa, de acordo com a "classificação" da Figura 1. A matéria orgânica é, naturalmente, o composto predominante no lixo da capital, com um teor de 61,6%, como indicam a Figura 14 e a Tabela 4. Outros compostos possuem concentrações bem menores, como os plásticos (10,9%), papel (9,5%) e rejeitos (4,6%).



Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte (2009)

Figura 14: Composição mais recente do resíduo sólido de Belo Horizonte

Tabela 4: Composição detalhada do resíduo sólido de Belo Horizonte

Componentes	Porcentagem
Resíduos alimentares	40,55%
Podas	9,05%
Resíduos de banheiro	7,77%
Fezes	4,22%
Total	61,59%
Papelão	1,13%
Papel fino	4,99%
Embalagem Longa Vida	1,10%
Papel misto	2,31%
Total	9,53%
Plástico filme	2,35%
Plástico rígido	2,46%
PET	1,14%
Plástico filme (sujo)	4,93%
Total	10,88%
Metal ferroso	1,75%
Metal não ferroso	0,54%
Total	2,29%
Vidro reciclável	2,63%
Vidro não reciclável	0,22%
Total	2,85%
Entulho	2,85%
Espuma, isopor, cerâmica	0,65%
Madeira, tecido, borracha, couro	4,04%
Total	7,54%
Resíduo perigoso doméstico	0,18%

Resíduo de Serviço de Saúde	0,27%
Automotivos	0,26%
Total	0,71%
Rejeitos	4,60%
Total	100,0%

Fonte: Prefeitura de Belo Horizonte (2004)

Tais dados, em si, já são, de certa forma, reveladores do potencial de produção de energia pelo lixo de Belo Horizonte, uma vez que, uma das condições para que isso ocorra satisfatoriamente é uma grande quantidade de matéria orgânica. A partir dessas informações, portanto, é possível, utilizando-se modelos matemáticos específicos, estimar a capacidade de produção energética do resíduo sólido da cidade.

2.2.2 Produção e viabilidade do aproveitamento do biogás

No presente trabalho, foi avaliado o potencial de produção de biogás pelo Aterro de Belo Horizonte (CTRS BR040), bem como o potencial de geração de energia desse biogás. Para isso, foi utilizado o *software* BIOGÁS – GERAÇÃO E USO ENERGÉTICO.

O Programa BIOGÁS – GERAÇÃO E USO ENERGÉTICO, Versão 1.0, é um *software* desenvolvido através de convênios entre o Governo Federal e o Governo do Estado de São Paulo, por meio do Ministério da Ciência e Tecnologia (MTC), a Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA) e a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB) (Linard, 2009). Ele utiliza um modelo da United States Environmental Protection Agency (USEPA), que se baseia na seguinte equação:

$$Q_x = k.R_x.L_0.e^{-k(x-t)}$$

Fonte: Linard (2009)

Figura 15: Modelo matemático para cálculo da produção de biogás em aterro pelo Programa BIOGÁS – GERAÇÃO E USO ENERGÉTICO

Onde:

Q_x = vazão de metano gerado no ano x pelos RDS depositados no ano T (m^3CH_4/ano);

k = constante de decaimento (1/ano);

R_x = fluxo de resíduos no ano x (kgRSD);

L_0 = potencial de geração de metano ($m^3biogas/kgRSD$);

T = ano de deposição do resíduo no aterro;

x = ano atual.

Primeiramente, é feita a identificação do aterro, constando o seu nome, a sua localização e sua área. A tela seguinte, apresentada na Figura 13, exige a entrada dos dados para o cálculo da estimativa de produção de biogás no aterro, em que são atribuídos os devidos valores aos parâmetros do modelo equacionado na Figura 16.

Dados para estimativa de geração de metano no aterro sanitário

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

Dados para geração de metano

Q = Vazão de metano (m^3/ano)

k = Constante de decaimento (1/ano)

L_0 = Potencial de geração de biogás (m^3/kg)

R_x = Fluxo de resíduo (t/ano)

x = Ano atual (ano)

T = ano de deposição do resíduo (ano)

Confirmação de dados

k (1/ano): 0,08

L_0 [$m^3 CH_4/kg$]: 0,195

Fluxo de resíduo [t/ano]: 847,220

Ok

Precipitação (k)

Seco Úmido

Valor sugerido

k (1/ano) 0,08 Ok

Voltar

Figura 16: Tela de definição dos parâmetros para o cálculo da estimativa de produção de metano no aterro do Programa BIOGÁS.

A constante de decaimento foi expressa de acordo o valor mais utilizado, uma vez que ela está relacionada à precipitação (chuva), que é uma

condição climática muito instável na região de Belo Horizonte, onde o clima, tropical de altitude, possui como característica um clima seco em determinada época do ano e úmido em outra. Por sua vez, o potencial de geração de biogás também é um dado de difícil acesso; entretanto lhe foi atribuído um valor associado aos 61,50% de matéria orgânica presentes no lixo de Belo Horizonte. Por fim, o fluxo de resíduo foi definido pelos dados populacionais da cidade, obtidos no *website* do IBGE, bem como dados do próprio aterro, nesse caso, a taxa de geração de resíduo, calculada a partir de dados da Tabela 3, e a taxa de coleta de resíduo, em que foi utilizado o valor sugerido pelo programa BIOGÁS.

Para a determinação da vazão de biogás, são exigidos dados técnicos encontrados apenas na empresa que promove a captação do biogás, aos quais, portanto, não há acesso. Por isso, foram utilizados os valores mais utilizados para um aterro em países em desenvolvimento, como mostra a Figura 17.

Parâmetro	Valor	Valor sugerido
Linha de base de queima (%)	20	<input checked="" type="checkbox"/>
Energia elétrica evitada (tCO2/MWhevit)	0,2782	<input checked="" type="checkbox"/>
Eficiência de coleta de biogás (%)	75	<input checked="" type="checkbox"/>
Eficiência da queima de biogás (%)	95	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 17: Parâmetros para o cálculo da vazão de metano no aterro no Programa BIOGÁS

Assim, a partir dessas determinações, foi obtida uma curva com metano produzido ao longo do funcionamento do aterro, mostrada na Figura 18.

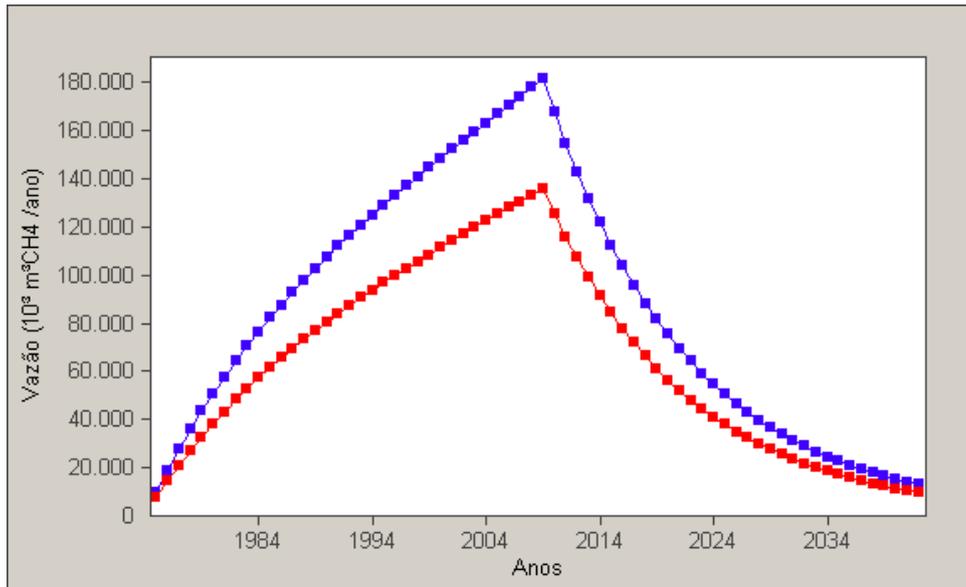


Figura 18: Gráfico da vazão de metano produzido ao longo dos anos na CTRS BR040 de Belo Horizonte (azul) e dessa mesma vazão, considerando 75% da taxa de coleta do metano (vermelho)

O gráfico encontrado na Figura 14 segue os dados da Tabela 5. Fazendo-se uma análise desses dados, é possível perceber que a captação máxima de metano acontece exatamente no ano de 2009, com uma vazão de 181.610.000 m³/ano de biogás, dos quais 75% são efetivamente coletados; o mínimo produzido, por outro lado, foi de 9.781 m³/ano.

Tabela 5: Dados para a vazão de metano ao longo do funcionamento da CTRS BR040 de Belo Horizonte

Ano	Vazão (10 ³ m ³ /ano)	Metano coletado (10 ³ m ³ /ano)	Ano	Vazão (10 ³ m ³ /ano)	Metano coletado (10 ³ m ³ /ano)
1975	9.781	7.336	1993	120.729	90.547
1976	18.977	14.232	1994	124.920	93.690
1977	27.634	20.726	1995	129.019	96.764
1978	35.798	26.848	1996	133.035	99.776
1979	43.509	32.632	1997	136.980	102.735
1980	50.805	38.104	1998	140.862	105.646
1981	57.721	43.291	1999	144.690	108.518
1982	64.290	48.217	2000	148.474	111.355
1983	70.540	52.905	2001	152.220	114.165
1984	76.500	57.375	2002	155.935	116.952
1985	82.196	61.647	2003	159.628	119.721
1986	87.650	65.738	2004	163.303	122.477
1987	92.885	69.664	2005	166.966	125.224
1988	97.921	73.441	2006	170.624	127.968
1989	102.778	77.083	2007	174.280	130.710

1990	107.471	80.603	2008	177.941	133.456
1991	112.017	84.013	2009	181.610	136.208
1992	116.432	87.324			

Foi possível determinar ainda a potência que pode ser gerada a partir do metano coletado, já considerando a coleta efetiva de 75% do total, que pode ser observada na Figura 15, cujos dados constam na Tabela 6. Para o cálculo dessa potência, é utilizada a seguinte equação:

$$P_x = \frac{Q_x P_{c(\text{metano})}}{31.536.000} E_c \frac{k}{1000}$$

Figura 19: Equação que determina a estimativa da potência gerada pelo biogás do aterro

Onde:

P_x = potência disponível a cada ano (kW)

Q_x = vazão de metano a cada ano ($\text{m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$)

$P_{c(\text{metano})}$ = poder calorífico do metano ($\text{J}/\text{m}^3\text{CH}_4$)

E_c = eficiência da coleta de gases

k = valor adimensional (= 1,000)

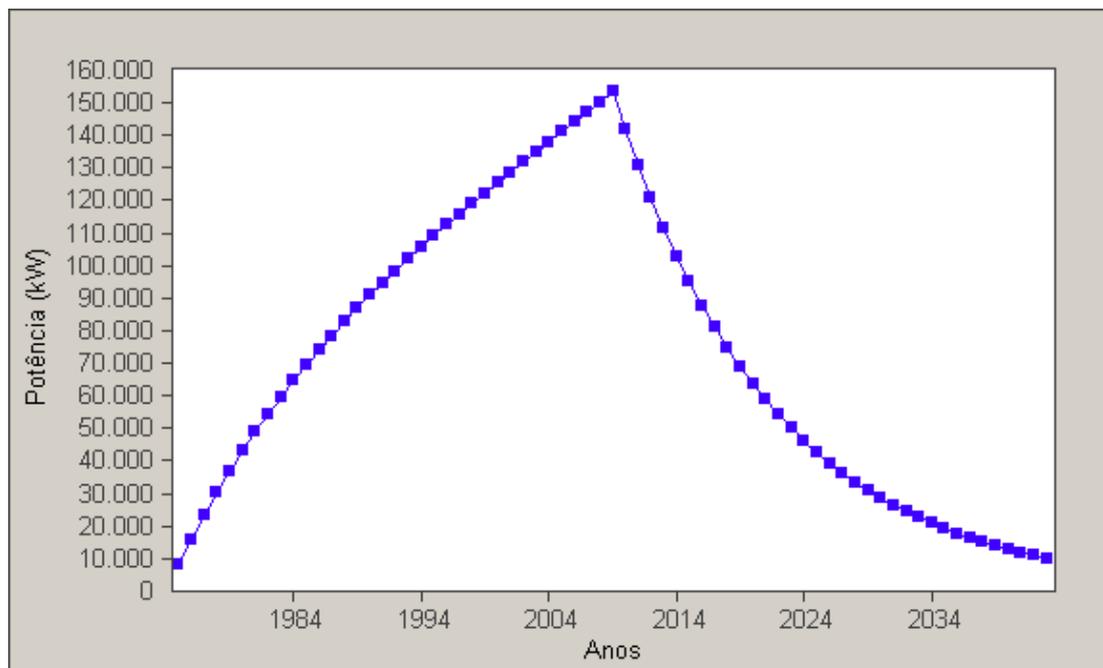


Figura 20: Gráfico da potência gerada pela utilização do biogás como fonte de energia ao longo dos anos na CTRS BR040 de Belo Horizonte

Tabela 6: Dados referentes à potência gerada pelo biogás ao longo do funcionamento da CTRS BR040 de Belo Horizonte

Ano	Potência (kW)	Ano	Potência (kW)
1975	8.265	1993	102.014
1976	16.035	1994	105.556
1977	23.350	1995	109.019
1978	30.249	1996	112.413
1979	36.765	1997	115.746
1980	42.930	1998	119.026
1981	48.774	1999	122.261
1982	54.324	2000	125.458
1983	59.605	2001	128.624
1984	64.642	2002	131.763
1985	69.454	2003	134.883
1986	74.063	2004	137.988
1987	78.487	2005	141.084
1988	82.742	2006	144.175
1989	86.846	2007	147.264
1990	90.811	2008	150.358
1991	94.653	2009	153.458
1992	98.384		

De forma análoga à produção de biogás, é possível perceber, pela Tabela 6, que a potência máxima gerada pelo aterro acontece no ano de 2009, num valor de 153.458 kW, enquanto o mínimo se deu no início do funcionamento do aterro, em 1975, com 8.265 kW. Portanto, o aterro estaria, neste momento, saindo do seu limite máximo de produção de biogás, ponto em que a produção de energia elétrica seria mais bem aproveitada.

A partir dos resultados obtidos pelos estudos de Šan e Onay (2001), é possível estimar também a produção de biogás em um aterro com recirculação de chorume. Nesse experimento, a recirculação do chorume nos biorreatores utilizados permitiu um aumento de 284% na produção de biogás (269L com recirculação contra 70L com passagem única). Da mesma forma, a concentração de metano também aumentou, chegando a aproximadamente 50,0% (San, 2001). Além desse valor, os estudos realizados por Reinhart e colaboradores (1996) chegaram a um resultado de

12 vezes no aumento da quantidade de biogás produzido (Reinhart, 1996). Entretanto, comparando os dois resultados, este último consiste em uma superestimação desse aumento em relação ao primeiro. Dessa forma, o valor a ser aplicado na recirculação do chorume será o de 284%, já que ele está diretamente relacionado com a produção de biogás.

Esse aumento foi aplicado ao valor de L_0 no Programa BIOGÁS, cujo valor passou de 0,195 para 0,554. Assim, foi obtido um aumento na produção de biogás, mostrado na Figura 16, cujos valores constam na Tabela 7.

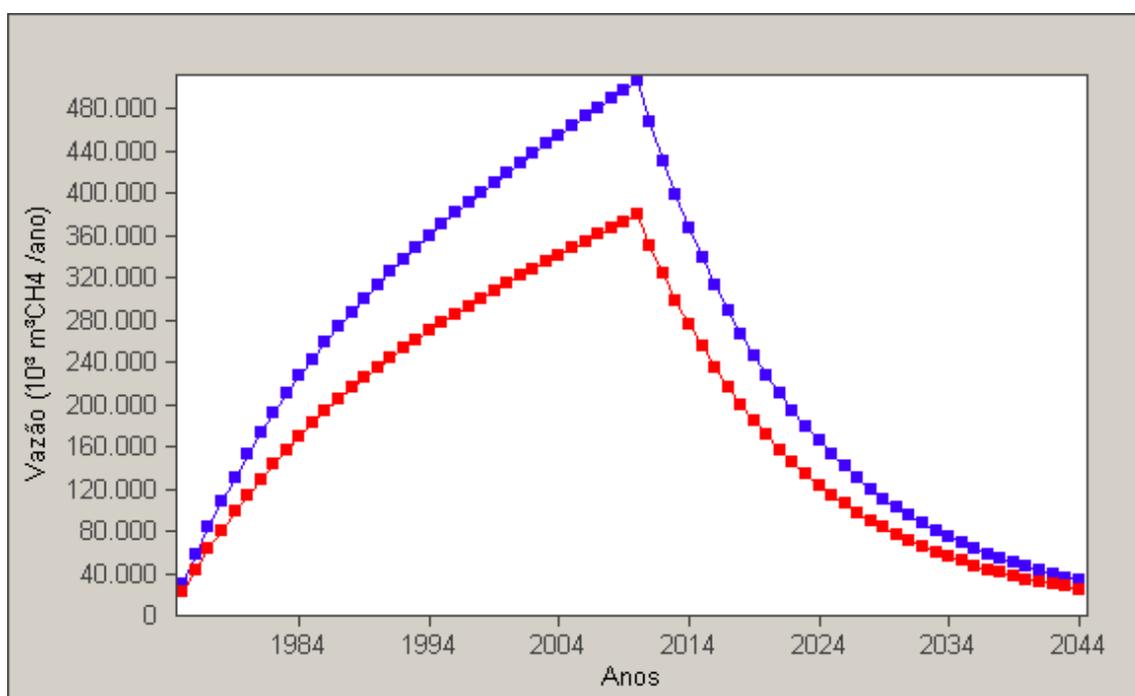


Figura 21: Gráficos da vazão de metano produzido ao longo dos anos na CTRS BR040 de Belo Horizonte (azul) e dessa mesma vazão, considerando 75% da taxa de coleta do metano (vermelho), com recirculação do chorume

Tabela 7: Dados para a vazão de metano ao longo do funcionamento da CTRS BR040 de Belo Horizonte, considerando a recirculação do chorume

Ano	Vazão ($10^3 m^3/ano$)	Metano coletado ($10^3 m^3/ano$)	Ano	Vazão ($10^3 m^3/ano$)	Metano coletado ($10^3 m^3/ano$)
1975	29.581	22.186	1993	348.666	261.500
1976	57.273	42.955	1994	359.669	269.751
1977	83.225	62.419	1995	370.317	277.738
1978	107.576	80.682	1996	380.644	285.483
1979	130.455	97.842	1997	390.682	293.011

1980	151.980	113.985	1998	400.459	300.344
1981	172.260	129.195	1999	410.001	307.501
1982	191.397	143.548	2000	419.335	314.501
1983	209.483	157.112	2001	428.482	321.361
1984	226.605	169.954	2002	437.464	328.098
1985	242.843	182.132	2003	446.300	334.725
1986	258.270	193.702	2004	455.009	341.257
1987	272.954	204.715	2005	463.607	347.706
1988	286.958	215.218	2006	472.111	354.084
1989	300.340	225.255	2007	480.536	360.402
1990	313.154	234.866	2008	488.894	366.670
1991	325.450	244.087	2009	497.198	372.898
1992	337.273	252.955			

Como a CTRS BR040 já foi fechada, os dados foram analisados considerando-se a aplicação de um sistema de recirculação no aterro. Os resultados indicam que ocorre um aumento considerável na produção de biogás; a produção máxima de biogás foi, novamente, em 2009, em que seriam produzidos 497.198.000 m³ de gás por ano, enquanto o mínimo seria de 29.581.000 m³/ano. Analisando-se, por outro lado, a potência gerada, foi observado também um aumento, observado na Figura 22 e na Tabela 8.

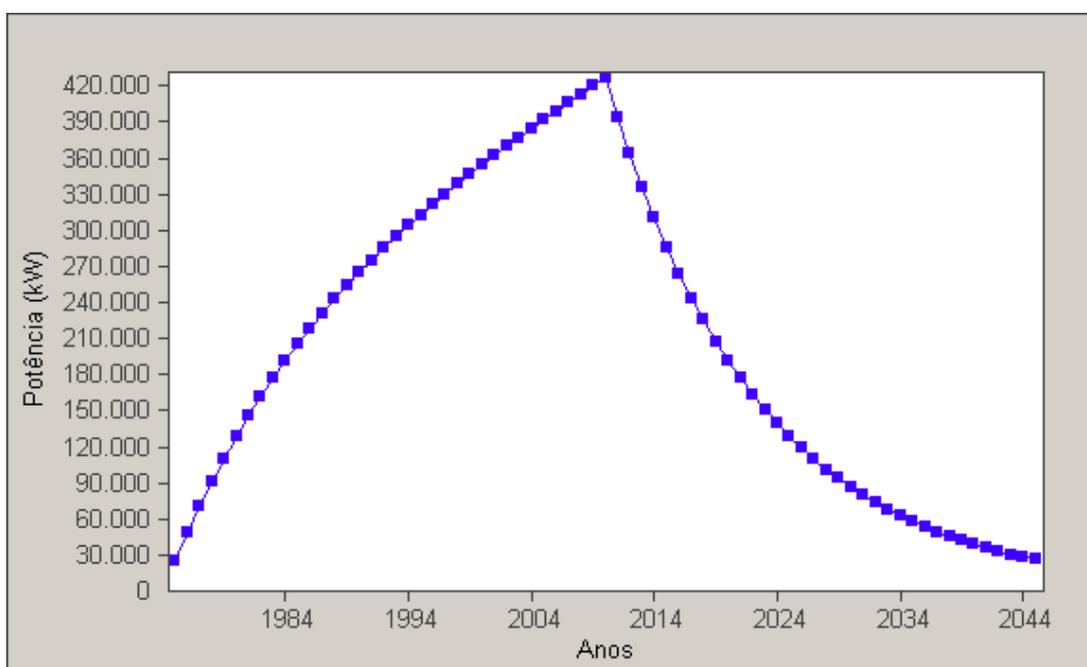


Figura 22: Gráfico da potência gerada pela utilização do biogás como fonte de energia ao longo dos anos na CTRS BR040 de Belo Horizonte, considerando a recirculação do chorume

Tabela 8: Dados referentes à potência gerada pelo biogás ao longo do funcionamento da CTRS BR040 de Belo Horizonte, considerando a recirculação do chorume.

Ano	Potência (kW)	Ano	Potência (kW)
1975	24.996	1993	294.618
1976	48.395	1994	303.915
1977	70.324	1995	312.913
1978	90.901	1996	321.639
1979	110.233	1997	330.121
1980	128.421	1998	338.382
1981	145.558	1999	346.446
1982	161.728	2000	354.332
1983	177.010	2001	362.061
1984	191.478	2002	369.651
1985	205.199	2003	377.117
1986	218.234	2004	384.476
1987	230.642	2005	391.742
1988	242.475	2006	398.928
1989	253.783	2007	406.046
1990	264.611	2008	413.109
1991	275.001	2009	420.126
1992	284.991		

Ao se comparar os dados obtidos com a passagem única e com a recirculação do chorume, observa-se, conseqüentemente ao observado com o biogás, um aumento da potência gerada, com um mínimo de 24.996 kW e um máximo de 420.126 kW.

Em geral, o biogás é utilizado em residências para aquecimento e iluminação. Com relação ao aquecimento, trabalha-se basicamente com o aquecimento da água do chuveiro, enquanto a iluminação, por sua vez, envolve as lâmpadas da casa. Dessa forma, foram consideradas algumas

especificações desses aparelhos, de forma a demonstrar a viabilidade do uso do biogás como fonte de energia para os mesmos.

Sabe-se que o chuveiro utilizado em residências varia de local para local, bem como o tempo de uso do mesmo. Por isso, a referência utilizada será a potência média de um chuveiro, considerada 5,4 kWh. Utilizando-se os valores de Esperancini e colaboradores (2007) de uso do chuveiro (243,33 horas em um ano), sabe-se que o consumo total é de 1314 kWh de potência por ano. Por outro lado, uma lâmpada incandescente, muito utilizada atualmente, consome 100 Watts de potência por hora, ou seja, 0,1 kWh. Tomando-se, novamente, o período de um ano, o consumo total será de 146 kWh (Esperancini *et. al.*, 2007). Somando-se esses valores, tem-se um consumo total de 1460 kWh de potência, numa residência com essas condições, em um ano.

Utilizando-se os valores de potência encontrados pelo programa BIOGÁS para o aterro, conclui-se que, em um ano, a quantidade de biogás produzida pelo aterro sem recirculação no ano de 2009 (valor máximo – 153.458 kW) seria capaz de abastecer aproximadamente 105 residências. Por sua vez, um aterro com recirculação, com a produção de 420.126 kW, seria capaz de abastecer aproximadamente 287 residências.

Além do uso para geração de energia elétrica, o biogás pode ser utilizado também na substituição dos combustíveis derivados de petróleo. Nesse caso, os motores mais utilizados, do tipo ciclo Otto, sofrem, em geral, pequenas adaptações nos sistemas de alimentação e ignição, bem como na taxa de compressão. Apesar de sua eficiência volumétrica ser menor que a de um motor a combustível de petróleo, os motores a gás funcionam a taxas de compressão elevadas, o que compensa a baixa eficiência (Souza *et. al.*, 2004).

3 CONCLUSÕES

A análise dos dados obtidos da Prefeitura de Belo Horizonte mostrou uma composição do lixo de Belo Horizonte muito semelhante à de um país de baixa renda. Este é um fato muito importante para a questão da produção

de energia a partir do biogás devido ao fato de esse processo ser diretamente proporcional à quantidade de matéria orgânica presente no RSU. Dessa forma, o fato de aproximadamente 61,0% do lixo de Belo Horizonte corresponder à fração orgânica favorece a produção desse biogás.

Foi possível observar, ainda, um aumento da potência gerada, quando se compara os dados obtidos nas situações sem recirculação de chorume e com recirculação do chorume. Assim, foi possível perceber que, de fato, a recirculação de chorume promove um grande aumento da produção de metano, o que é um fator favorável para a produção de energia.

Comparando-se com o consumo de uma residência, com relação ao aquecimento (água do chuveiro) e à iluminação, foi possível perceber que um número considerável de residências pode ser abastecido por esse biogás, sendo que esse número aumenta quando é utilizada a recirculação do chorume.

4 REFERÊNCIAS

AMARAL, V. G. Política e resolução de conflitos urbanos: o caso do aterro sanitário de Belo Horizonte/MG. Belo Horizonte: Faculdade de Filosofia e Ciências Humanas, UFMG. 2006.

BAIRD, C. *Resíduos, Solos e Sedimentos*. In: Química Ambiental. Porto Alegre: Bookman Ed. 2002. p.527-579.

BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T. Estudo de práticas alternativas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos, visando à geração de energia por fontes renováveis e minimização da demanda energética. Recife: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2009.

BENTO, L. C. M.; FARIA, S. M. O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos do município de Bambuí/MG e seus possíveis reflexos no desenvolvimento da atividade turística. Bambuí: Revista Geográfica Acadêmica, v.2, n.3, p.42-49. 2008.

CASTILHOS JUNIOR, A. B. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Rio de Janeiro: ABES. 2006

CHERNICHARO, C. A. L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias - Volume 5: Reatores anaeróbios. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UFMG. 1997. 246 p.

CINTRA, I. S.; FREIRE, G. J. M. Análise de municípios mineiros quanto à situação dos seus lixões. Belo Horizonte: Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. 2009. 104 p.

CINTRA, I. S. Estudo da influência da recirculação de chorume cru e chorume inoculado na aceleração do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia - Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, UFMG, 2003. 352 p.

CONNETT, P. Incineração do lixo municipal - uma solução pobre para o século XXI. 4ª Conferência Anual de Administração Internacional - Lixo-para-Energia. Amsterdã, 1998.

D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. São Paulo: IPT/CEMPRE, 2000

DESIDERI, U.; DI MARIA, F.; LEONARDI, D.; PROIETTI, S. Sanitary landfill energetic potential analysis: a real case study. Perugia: Energy Conversion and Management v.44, n.12, Jul, p.1969-1981. 2003.

DEUS, A. B. S.; LUCA, S. J.; CLARKE, R. T. Índice de impacto dos resíduos sólidos urbanos na saúde pública (IIRSP): metodologia e aplicação. Engenharia Sanitária Ambiental, v.9, n.4, p.329-334. 2004.

DIAS, V. C. F.; PASSOS, R. V.; OLIVEIRA, D. M.; BELLI FILHO, P.; CASTILHOS JUNIOR, A. B. Diagnóstico da geração e do potencial energético de biogás no aterro sanitário de Içara/SC. Recife: 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2009.

ESPERANCINI, M. S. T.; COLEN, F.; BUENO, O. C.; PIMENTEL, A. E. B.; SIMON, E. J. Viabilidade técnica e econômica da substituição de fontes convencionais de energia por biogás em assentamento rural do estado de São Paulo. Jaboticabal: Revista Engenharia Agrícola, v. 27, n. 1, 207. p. 110-118.

FERREIRA, J. A.; ANJOS, L. A. Aspectos de saúde coletiva e ocupacional associados à gestão dos resíduos sólidos municipais. Rio de Janeiro: Caderno de Saúde Pública, v.17, n.3, 2001. p.689-696.

FRANCO, L. Lixo Urbano. Belo Horizonte: Câmara Municipal de Belo Horizonte. 2009.

HAUG, R. T. The practical handbook of compost engineering. Florida: Lewis Publisher. 1993.

HELLER, L.; CATAPRETRA, C. A. A. Solid waste disposal in urban areas and health - the case of Belo Horizonte, Brazil. Belo Horizonte: Waste Management & Research, v.21, n.6. 2003. p.549-556

IENO, G. (1993, apud ROMERO, 2004) Estudo preliminar da viabilidade técnica e econômica da usina termoeétrica de Piratininga em Ciclo Combinado. Dissertação de Mestrado. São Paulo: Programa Interunidades de Pós-graduação em Energia/Universidade de São Paulo. 1993

JUCÁ, J. F. T. Destinação final dos resíduos sólidos no Brasil: situação atual e perspectivas. Braga, Portugal: 10º Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2002.

LIBÂNIO, P. A. C.; COSTA, B. M. P.; CINTRA, I. S.; CHERNICHARO, C. A. L.; SPERLING, M. V. Estudo da influência da recirculação e da inoculação na digestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos. Santa Catarina: 22º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2003.

LIMA, L. M. Q. Tratamento de Lixo. São Paulo: Hemus Editora. 1989

_____. Conversão Biológica do Lixo com Recuperação de Energia. In: Lixo - Tratamento e Biorremediação. São Paulo: Hemus Editora LTDA. 1995. p.183-226

LINARD, A. F. G.; AQUINO, M. D. Estudo da viabilidade do aproveitamento de biogás de aterro sanitário para fins energéticos com vistas ao desenvolvimento sustentável: aplicação no aterro sanitário metropolitano

oeste em Caucaia, Ceará. Recife: 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2009.

MORAIS, J. L. Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados, isolados e integrados com processos biológicos tradicionais, para tratamento de chorume de aterro sanitário. Curitiba: Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná. 2005.

MORGADO, T. C.; FERREIRA, O. M. Incineração de resíduos sólidos urbanos, aproveitamento na co-geração de energia. Estudo para a região metropolitana de Goiânia. Goiânia: Universidade Católica de Goiânia. 2006.

PINTO, M. S. A coleta e disposição do lixo no Brasil. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas. 1979

REINHART, D. R.; AL-YOUSIF, B. A. The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics. Waste and Management Research, v.14, n.4. 1996. p.337-346.

RITA, F. Desempenho de um reator UASB em escala piloto para o tratamento anaeróbio de líquidos percolados de resíduos sólidos urbanos. Florianópolis: Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. 2002.

RUSSO, M. A. T. Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário. Braga: Escola de Engenharia, Universidade do Minho. 2005. 320 p.

SAN, I. ONAY, T. T. Impact of various leachate recirculation regimes on municipal solid waste degradation. Istanbul: Journal of Hazardous Materials, v.B87. 2001. p.259-271.

SATO, C. E.; AZEVEDO, E. M. Créditos de carbono no contexto da comercialização de energia elétrica. Itajubá: Revista Brasileira de Energia, v.14, n.2. 2008. p.9 - 25.

SILVA, M. Projeto de Lei 1991/2007. Brasília: Congresso Nacional. 2007.

SOUZA, J.; SOUZA, S. N. M.; MACHADO, P. R. M. Desempenho de um motor ciclo Otto utilizando biogás como combustível. Campinas: Universidade de Campinas, 2004.

SPERRY, G.; FRANÇA, R. G.; RUARO, E. C. R.; MIBIELLI, G. M. Avaliação do sistema de tratamento de chorume do aterro sanitário de Xanxerê (SC). Recife: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2009.

TAFDRUP, S. Viable energy production and waste recycling from anaerobic digestion of manure and other biomass materials. Copenhagen: Pergamon-Elsevier Science Ltd, 1995. 303-314 p.