

# Recuperação Energética de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil: abordagem econômica e ambiental.

Marcio M. V. Leme, Osvaldo J. Venturini, Bruno M. Lopes, Electo E. S. Lora, Cláudio H. F. da Silva, Mateus H. Rocha.

**Resumo** – Este trabalho é resultado do P&D 194 desenvolvido pela CEMIG em conjunto com a UNFEL, concluído em 2010. Aqui são apresentados os resultados obtidos em uma etapa do projeto. Nela, analisaram-se, do ponto de vista técnico e econômico, diferentes opções de geração de energia a partir dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Para isto, foi desenvolvido um software com objetivo auxiliar a tomada de decisão para empreendimentos focados na recuperação energética dos RSU. Com informações básicas, como a composição e quantidade do lixo gerado, o software é capaz de estimar o potencial energético de diferentes empreendimentos, realizando balanços de acordo com as informações fornecidas pelo usuário. Neste trabalho, com o auxílio do software, foi realizada uma avaliação técnico-econômica de uma cidade de 1 milhão de habitantes com uma produção de lixo anual de 365.000 toneladas de resíduos, onde duas alternativas foram analisadas. A primeira, um aterro sanitário onde utiliza-se o gás de aterro para geração de eletricidade através de módulos geradores, a segunda, uma planta de incineração também com geração de eletricidade. Os resultados mostraram que os projetos de geração de energia com gás de aterro dependem fortemente da existência de um mercado de emissões para que sejam atingidos retornos econômicos satisfatórios. Já os projetos de incineração, em razão de seu alto custo de instalação, mostraram-se dependentes das tarifas de tratamento e dos custos de instalação. Segundo o estudo, este valor deve ser o dobro do valor pago atualmente pelos municípios que despejam o RSU em aterros particulares em Minas Gerais, para se possa atingir uma viabilidade aceitável.

Na etapa seguinte, foram realizados estudos de casos que simularam plantas com recuperação do biogás de aterros sanitários para geração de eletricidade, onde os resultados são aqui apresentados resumidamente. Foram escolhidos três aterros de diferentes cidades de Minas Gerais, são elas: Betim, Sabará e Uberlândia. O aterro de Betim mostrou viabilidade positiva apenas com a inclusão de um projeto nos moldes do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), entretanto esta viabilidade pode ser revertida facilmente em cenários mais pessimistas. Igualmente, o aterro de Uberlândia mostrou boa viabilidade apenas com o projeto MDL. Porém, desta vez, o resultados foram mais robustos, em razão da junção dos potenciais do aterro novo e do antigo que estão localizados lado a lado. O aterro de Sabará mostrou uma alta atratividade econômica, principalmente com a inclusão de um projeto MDL. Os resultados mostram que o projeto é viável com ou sem a obtenção de créditos

de carbono, e que são necessários preços de comercialização de energia e carbono impraticáveis, e altas taxas de juros para que o projeto se torne inviável.

Ao final do trabalho é apresentado resumidamente os resultados da avaliação ambiental dos sistemas propostos, realizada através de uma Análise do Ciclo de Vida (ACV). O objetivo da etapa foi o de comparar diferentes alternativas de disposição e tratamento dos RSU com e sem recuperação de energia no contexto brasileiro. O estudo foi conduzido no aterro municipal de Betim (MG). Foram propostos três cenários. O aterro sanitário sem a utilização do biogás (Cenário base); o uso do biogás gerado pelo aterro em Motores de Combustão Interna (MCI) para geração de eletricidade; e um sistema de incineração com geração de eletricidade. O comportamento ambiental destes cenários foi comparado utilizando a metodologia de ACV, com base na série de normas ISO 14040, recentemente contemplada como uma das ferramentas da Política Nacional dos Resíduos Sólidos. A unidade funcional selecionada foi 1 t de RSU. Os resultados indicam que os aterros sanitários são a pior opção para o gerenciamento do lixo em 5 das 6 categorias de impacto selecionadas, são elas: aquecimento global, acidificação, eutrofização, depleção da camada de ozônio e depleção de recursos abióticos. Significantes ganhos ambientais podem ser obtidos com a recuperação energética dos resíduos. A incineração mostrou-se a melhor opção entre as estudadas, porém, é dependente de um moderno sistema de controle de efluentes atmosféricos capaz de cumprir com os padrões de emissão estabelecidos pela legislação.

**Palavras-chave** – Avaliação Econômica, ACV, Incineração, Recuperação de Energia, RSU.

## I. INTRODUÇÃO

Os resultados aqui apresentados são resultado do P&D-194, de título: Avaliação das opções tecnológicas para geração de energia a partir dos RSU e poda de árvores.

Na primeira parte deste trabalho analisaram-se algumas tecnologias de conversão energética dos resíduos de um ponto de vista ambiental, através de uma ACV, onde os principais resultados são apresentados ao final deste artigo.

Na segunda parte, a análise teve como foco a viabilidade econômica, com ênfase no desenvolvimento de um software para auxiliar este tipo de diagnóstico. Através do software, compararam-se as opções de incineração e biogás de aterro para a geração de eletricidade, cujos resultados são mostrados aqui detalhadamente.

Adicionalmente, se avaliou a possibilidade de se gerar eletricidade nos aterros de Betim (MG), Sabará (MG) e Uberlândia (MG). Este estudo foi efetuado na última parte do

---

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica regulado pela ANEEL. Agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

P&D 194 e os resultados são resumidamente apresentados neste trabalho.

Os resíduos gerados nas cidades levam a uma série de problemas ambientais e sociais. No Brasil, a inexistência de uma política adequada para o setor, fez com que os lixões se tornassem a solução preferencial das prefeituras. Entretanto, nos últimos anos, os municípios brasileiros tentam implantar aterros sanitários em seus territórios, considerados pelo poder público como uma alternativa ambientalmente adequada e acessível.

Porém, em países onde a esfera ambiental se encontra em maiores patamares de importância, esta alternativa é considerada apenas como última opção. Estes países têm procurado soluções sustentáveis para o tratamento do lixo urbano, buscando soluções que satisfaçam às esferas social, ambiental e econômica. Por exemplo, a diretiva do conselho europeu 2008/98/EC [1], estabeleceu uma hierarquia nos métodos de gerenciamento dos resíduos, a qual prevê a seguinte ordem de prioridade: prevenção (uso de processos produtivos que gerem menos resíduos), preparação para reuso, reciclagem, recuperação (incluindo a recuperação de energia), e finalmente, como último recurso, a disposição final em aterros. A diretiva recomenda que os estados membros da UE tomem medidas para promover as opções com melhor desempenho ambiental, recomendando o uso da ACV como ferramenta de avaliação.

Existem vários métodos para se produzir energia através dos RSU. Mundialmente, a tecnologia mais comum é a incineração direta dos resíduos com subsequente uso do calor gerado em um ciclo Rankine a vapor. Quando a opção é o uso de aterros sanitários, o biogás rico em metano, produzido pela decomposição anaeróbica da fração orgânica do RSU, é comumente usado em Motores a Combustão Interna – MCI ou, mais raramente, em turbinas a gás – TG para gerar eletricidade [2].

## II. DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

### A. Metodologia

Para avaliar estas alternativas, foi desenvolvido no âmbito do projeto um software capaz de realizar diagnósticos técnico-econômicos dessas. O objetivo do programa é auxiliar a tomada de decisão para a construção de empreendimentos focados na recuperação energética dos RSU, baseando-se em indicadores econômicos habitualmente utilizados em análises de investimento como o Fluxo de Caixa, o Valor Presente Líquido e a Taxa Interna de Retorno.

Com informações sobre o resíduo gerado na cidade, o software é apto a estimar o potencial energético do RSU, realizando balanços de acordo com as informações fornecidas pelo usuário. Como qualquer análise econômica, os resultados são influenciados por inúmeras variáveis. Portanto, o programa foi desenvolvido para dar liberdade ao usuário para estabelecer todos os parâmetros envolvidos no diagnóstico.

Foram desenvolvidas duas metodologias para empreendimentos distintos. A primeira criada para estimar a viabilidade

de econômica de projetos de geração de energia com biogás de aterros sanitários. Nela, parte-se da premissa que o aterro já está construído e o empreendedor pretende aproveitar o potencial para produzir e vender energia elétrica e gerar créditos de redução de emissões de Gases do Efeito Estufa (GHG). O usuário tem liberdade para escolher qual grupo gerador pretende aplicar no aterro, sejam Turbinas a Gás, Motores a Combustão Interna, Motores Stirling ou qualquer outro tipo tecnologia que utilize o biogás para gerar eletricidade.

A segunda metodologia tem por objetivo estimar a viabilidade econômica de projetos de incineração de lixo com recuperação de energia. Diferentemente da anterior, nela são considerados os custos de implantação do zero, portanto, são considerados os custos da compra de terra, terraplanagem, e outros, bem como as receitas provenientes do tratamento do lixo. Esta distinção foi necessária para adaptar os empreendimentos à realidade brasileira, pois, em sua totalidade, os projetos de aterros com geração de energia são desenvolvidos em aterros pré-existentes.

Para o cálculo da produção de metano no aterro o programa utiliza a metodologia do IPCC [3] e para calcular a geração a de créditos de carbono baseia-se nas metodologias aprovadas pela UNFCCC (*United Nations Framework Convention on Climate Change*) ACM0001 [5] e ACM0002 [6]. O poder calorífico do lixo é determinado com as informações de Kathiravale [4], e do IPCC [3].

Após realizar o balanço de energia das alternativas, o software calcula o fluxo de caixa do empreendimento, com base nos custos informados pelo usuário, nos preços de venda da energia e créditos de carbono e nas taxas consideradas.

Os custos de capital e operação e manutenção dos projetos de biogás foram obtidos de [7] e [8]. Em razão da inexistência deste tipo de empreendimento, não foram encontrados estudos contundentes sobre os custos de plantas de incineração para energia no Brasil. Neste caso, utilizaram-se os custos médios de instalação e operação de outros países.

Segundo Citizens [9] incineradores economicamente viáveis no Canadá devem queimar no mínimo 1.000 toneladas diárias e o custo aproximado de uma instalação deste porte e de cerca de US\$100 milhões. De acordo com McLanaghan [10] a plantas de incineração na Europa com capacidades de queimar 400 mil toneladas por ano tem um custo de capital variando de US\$109 a US\$150 milhões e custos operacionais da ordem de US\$53 a US\$83 por tonelada incinerada. Estes custos incluem a recuperação de energia, algo inerente a qualquer planta de incineração de RSU, pois a venda de eletricidade e calor é essencial para abater seus altos custos da instalação.

Segundo Reimann [11], a eficiência elétrica média das plantas de incineração é de 18%, e de 63% para produção de calor. Estas plantas são menos eficientes que plantas convencionais de energia. Isto acontece, principalmente, devido à redução dos limites de pressão e temperatura do vapor, estabelecidos para se evitar problemas de corrosão.

A eficiência de um ciclo Rankine é função dos parâmetros de temperatura e pressão do vapor. Nas turbinas, a eficiência de conversão da energia do vapor em trabalho aumenta

com a ampliação destes parâmetros. Entretanto, com temperaturas mais altas, as superfícies de troca de calor na caldeira ficam sujeitas à corrosão de alta temperatura, causada pelas concentrações de compostos de cloro. A concentração destes compostos depende unicamente da composição dos RSU o que varia de região para região [12].

Existe um grande número de metodologias aprovadas na UNFCCC que podem ser aplicadas para a determinação da quantidade de créditos de carbono de projetos de incineração. Cabe ao empreendedor definir a melhor maneira de utilizá-las. Diferente do gás de aterro, não há um método consolidado de cálculo para as condições brasileiras.

Uma planta de incineração não apenas substitui outras formas não renováveis de geração de energia, mas também evita a formação de metano em aterros sanitários, os quais são a linha de base dos RSU no Brasil. Em outras palavras, se o lixo não for incinerado terá como destino mais provável um aterro. Neste trabalho a linha de base foi definida da seguinte maneira:

1 – Emissões de GHG geradas pelo consumo de combustíveis fósseis usados na geração de energia no SIN. Este valor é definido diariamente pela ONS. Nesta análise utilizou-se o valor médio de 0,25 tCO<sub>2</sub> eq/MWh.

2 – Emissões de metano geradas pela disposição dos resíduos em um aterro sanitário, determinadas neste caso pela metodologia do IPCC (2006).

A linha de base define as emissões que ocorreriam na ausência do projeto. Porém, para estimar as reduções de emissão, é preciso determinar as emissões que ocorreriam caso o projeto seja executado.

Plantas de incineração emitem basicamente GHG na forma de CO<sub>2</sub> fóssil, em razão da queima de resíduos de origem fóssil (i.e. plásticos, certos tecidos, solventes líquidos, óleos e borrachas), e N<sub>2</sub>O formado na combustão do resíduo. Geralmente as emissões de CO<sub>2</sub> são significativamente maiores que as de N<sub>2</sub>O. Entretanto, o último possui um potencial de aquecimento global (GWP) 296 vezes maior que o CO<sub>2</sub> [13]. Com a informação da composição gravimétrica do lixo o programa estima automaticamente a porcentagem de carbono fóssil no lixo e conseqüentemente as emissões de CO<sub>2</sub> fóssil através das informações do IPCC [3].

## B. Estudo de Caso

Foram analisadas duas alternativas de geração de energia com os RSU em uma cidade hipotética. A primeira opção consiste no uso de um aterro sanitário pré-existente com subsequente uso do biogás gerado em motores a combustão interna. A segunda opção se refere à queima do resíduo urbano em um incinerador de queima em massa com geração de eletricidade.

A cidade produz 1000 toneladas diárias de RSU, o que equivale a uma população de 1 a 1,5 milhões de habitantes, com a composição gravimétrica apresentada na tabela I abaixo, semelhante a capital do estado de Minas Gerais, Belo Horizonte.

Tabela I. Composição gravimétrica do RSU.

Componente	% <sub>m/m</sub>
Restos de alimentos	61
Plásticos	10
Papel	11
Vidro	2
Metais	3
Inertes	13

Na opção 1, o lixo é depositado em um aterro sanitário com vida útil estimada de 20 anos, com início de operação em 2008 e fim previsto em 2028. O aterro pertence ao município, e a empresa responsável pelo empreendimento ganhou o direito de explorar o biogás gerado no local. Na opção 2, incineração, consideramos que uma empresa privada é responsável pelo empreendimento e, portanto, recebe receitas do município para tratar o lixo. A incineração não inibe a existência de um aterro sanitário, pois a escória e as cinzas volantes devem ser enviadas a um aterro de inertes adequado, neste caso, consideramos que estes resíduos são enviados a um aterro de inertes privado.

Os seguintes valores de preços e taxas foram considerados no estudo:

Tabela II. Valores de referência de preços e taxas.

Parâmetro	Referência		
Venda de Eletricidade	65	US\$/MWh	[13]
Créditos de Carbono	10	US\$/ton CO <sub>2</sub>	[14]
Taxa de Desconto Anual	10,25	%a.a	[15]

## C. Resultados – Biogás de aterro

Após informar os dados necessários ao software, é gerada a curva de produção de metano no aterro, mostrada na figura 1. A seguir, determinam-se quais módulos de geração serão utilizados e seu cronograma de instalação e desinstalação.

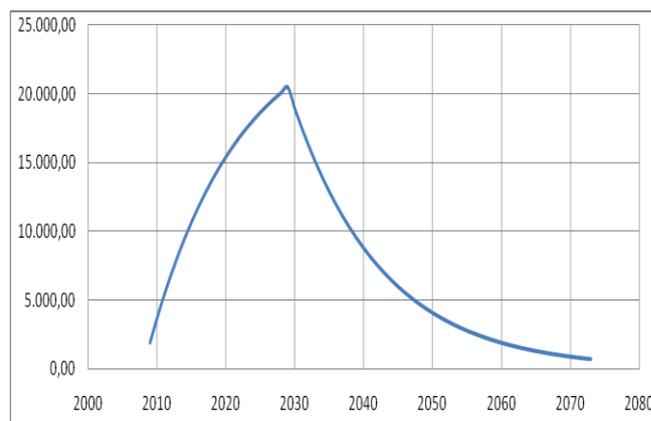


Figura 1. Curva de geração de metano no aterro [Mg de CH<sub>4</sub>/ano]

Neste caso, consideramos o uso do módulo gerador, o qual utiliza o Motor a Combustão Interna (MCI) Caterpillar G3520C (1966 kW / 2458 kVA) com vida útil estimada de 8 anos e eficiência de 38%. Os MCI são a alternativa mais comum no aproveitamento de gases de aterro para geração de energia devido a seu baixo custo de investimento e facilidade

dade de operação e manutenção. A principal desvantagem destes sistemas é representada pelas altas quantidades de NO<sub>x</sub> e CO gerados que, de fato, comparando-se com outras tecnologias, são altas [16].

A configuração utilizada encontra-se na Tabela III abaixo, e logo após, a curva de potência disponível e instalada na Figura 2. Segundo a USEPA [7] a instalação de uma planta de biogás tem um custo estimado de US\$ 1.400.000 por MW, o que inclui engenharia, conexão com a rede, outros custos de serviços profissionais, bem como os custos de compra, entrega e instalação do equipamento.

Esta configuração é uma das possíveis formas de se aproveitar o biogás produzido. Ela só é viável, pois consideramos que o aterro foi concebido para a geração de energia e a operação da planta está integrada com o manejo dos RSU. Normalmente, em aterros antigos, a geração de energia ocorre apenas após o fechamento do aterro, caso do Aterro Bandeirantes e do Aterro São João, em São Paulo.

Tabela III. Características dos módulos de geração instalados no aterro.

	Potencia [kWe]	Início da Operação	Fim da Operação
Módulo 1	1966	2012	2019
Módulo 2	1966	2015	2022
Módulo 3	1966	2018	2025
Módulo 4	1966	2020	2027
Módulo 5	1966	2023	2030
Módulo 6	1966	2023	2030
Módulo 7	1966	2026	2033
Módulo 8	1966	2028	2035
Módulo 9	1966	2031	2038
Módulo 10	1966	2036	2043

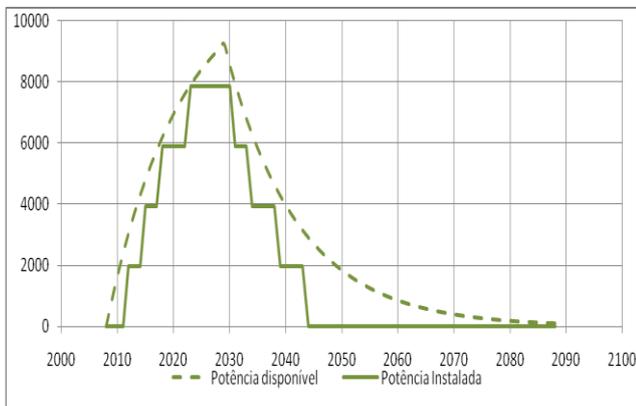


Figura 2. Curvas de potência disponível e instalada no aterro [kW/ano].

Os resultados do software mostram que no período de funcionamento do empreendimento (2012 a 2043) produziu-se 1,2 GWh de eletricidade a um custo específico de 28 \$/MWh e evitou-se a geração de 1.6 milhões de t de CO<sub>2</sub> eq. A existência de um mercado de emissões de gases do efeito estufa até o fim do projeto (2043) é algo em discussão, portanto, foram analisados dois cenários distintos, um incluindo o projeto de MDL e outro não. As tabelas IV e V a seguir apresentam os resultados obtidos na análise em distintos cenários de juros básicos.

Tabela IV. Resultados da Análise no aterro, excluindo-se o projeto MDL.

Taxa de Juros (% <sub>a,a</sub> )	5,00%	10,25%	15,00%
VPL:	4.558.863	-4.474	-1.640.531
TIR:	10%		
Custos de Capital:	17.686.417	12.225.965	9.480.482
Custos com O&M:	17.625.994	9.932.576	6.606.676
Venda de Eletricidade:	39.871.274	22.154.067	14.446.627
Créditos de Carbono:	0	0	0

Tabela V. Resultados da Análise no aterro, com o projeto MDL.

Taxa de Juros (% <sub>a,a</sub> )	5,00%	10,25%	15,00%
VPL:	34.946.912	17.044.223	9.679.783
TIR:	47%		
Custos de Capital:	17.781.655	12.316.668	9.567.439
Custos com O&M:	18.100.074	10.212.368	6.804.391
Venda de Eletricidade:	39.871.274	22.154.067	14.446.627
Créditos de Carbono:	30.957.367	17.419.192	11.604.987

Nota-se nos resultados, que a existência de um mercado de emissões nos parâmetros atuais aumenta significativamente o valor da TIR e é fundamental em um cenário de juros altos para que se atinja um VPL positivo. Isto ocorre, pois o custo de se implementar um projeto MDL é pequeno em relação as receitas obtidas pelos créditos de carbono. Afinal, todas as estruturas para a destruição do metano estarão de qualquer forma construídas (Sistema de captação, Flares e Motores).

#### D. Análise de Sensibilidade – Biogás de aterro

A análise de sensibilidade tem como objetivo principal determinar a confiança sobre o modelo, estudando as incertezas associadas a seus resultados. Muitos dos parâmetros envolvidos nos cálculos representam valores que são frequentemente de pouca certeza. Portanto, se torna importante determinar como as variações nestes parâmetros podem influir nos resultados. A análise foi realizada sobre os principais parâmetros econômicos do modelo, a uma taxa de juros de 10,25% ao ano. São eles: o preço de venda da eletricidade, o preço dos créditos de carbono, o custo total de investimento, e os custos anuais de operação e manutenção. Iremos considerar uma variação nos parâmetros de ±50%. Os resultados são mostrados na Figura 3 abaixo.

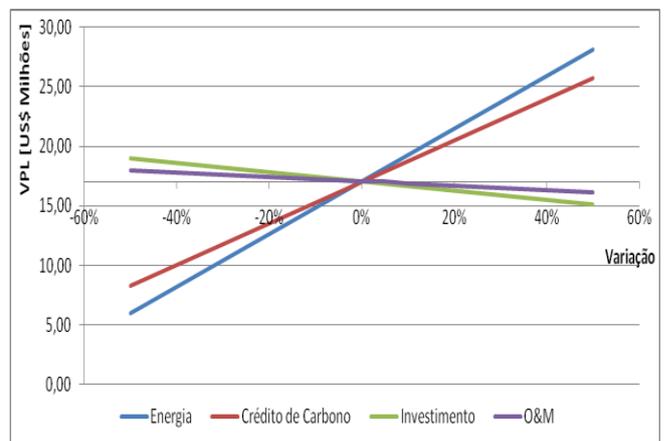


Figura 3. Resultados da Análise de Sensibilidade para biogás de aterro. Na figura, o eixo das abscissas mostra a variação em porcentagem.

tos percentuais dos parâmetros estudados em relação aos valores base, já o eixo das ordenadas mostra o VPL do investimento. Observa-se que todas as curvas interceptam-se no mesmo ponto, o qual é o valor determinístico, ao serem substituídas todas as variáveis por seus valores base.

É importante notar como a curva se comporta com a variação no eixo horizontal. As curvas que apresentam maiores declividades, seja positiva ou negativa, merecem especial atenção porque uma pequena variação no valor esperado tem maiores reflexos no resultado final. Nota-se que as curvas com maior declividade são as de eletricidade e créditos de carbono. Portanto, estes são os parâmetros de maior risco no projeto, pois suas variações têm maior peso sobre a rentabilidade do investimento.

### E. Resultados – Incineração

Considerou-se a instalação de uma planta de incineração de queima em massa (*Mass Burn System*) com uma vida útil de 20 anos e uma eficiência elétrica de 18%. O programa, com base na composição do RSU, estima sua composição elementar e depois seu Poder Calorífico Inferior (PCI) onde se obteve o valor de 4037 kJ/kg. Deste modo, com o tratamento de 365.000 toneladas de RSU temos uma potência disponível de 8.411 kW ao longo dos 20 anos.

O objetivo primordial de uma planta de incineração é tratar o lixo. Deste modo, não é aceitável que o lixo se acumule em razão de problemas operacionais. Portanto, deve-se assegurar que a planta consiga tratar todo o volume de lixo produzido pela cidade. Para isso, iremos considerar o uso de 5 módulos de 2 MW com capacidade de queimar 91.250 toneladas por ano cada, o suficiente para suprir a demanda de 365 000 toneladas, sendo que um dos módulos pode permanecer parado para manutenção e situações de emergência. Os 4 módulos produzem uma capacidade instalada de 8.000 kW.

Além das receitas com créditos de carbono e eletricidade, uma planta de incineração obtém receitas do próprio tratamento de lixo. Na etapa de coleta de dados deste trabalho, em visitas técnicas a aterros da região metropolitana de Belo Horizonte, informou-se que empresas gestoras dos aterros cobram das prefeituras um valor médio de R\$ 45,00 por tonelada de lixo enviada aos locais. A seguir, nas tabelas VI e VII, apresentam-se os resultados da avaliação econômica para o caso da incineração com recuperação de energia. Do mesmo modo que no caso dos aterros foram analisados dois cenários distintos, um com o projeto MDL e outro sem.

Tabela VI. Resultados da análise na incineração, sem o projeto MDL.

Taxa de Juros (% <sub>aa</sub> )	5,00%	10,25%	15,00%
VPL:	-14.854.551	-50.743.952	-67.541.711
TIR:	4%		
Custos de Capital:	148.571.429	141.496.599	135.652.174
Custos com O&M:	55.718.218	34.823.635	25.157.428
Venda de Eletricidade	58.402.915	38.715.217	28.754.528
Créditos de Carbono:	0	0	0
Tarifa de tratamento:	131.032.181	86.861.064	64.513.363

Tabela VII. Resultados da análise na incineração, com o projeto MDL

Taxa de Juros (% <sub>aa</sub> )	5,00%	10,25%	15,00%
VPL:	5.201.497	-37.476.393	-57.707.232
TIR:	5%		
Custos de Capital:	148.666.667	141.587.302	135.739.130
Custos com O&M:	56.102.853	35.078.608	25.346.802
Venda de Eletricidade	58.402.915	38.715.217	28.754.528
Créditos de Carbono:	20.535.921	13.613.236	10.110.809
Tarifa de tratamento:	131.032.181	86.861.064	64.513.363

Observa-se que o único cenário com VPL positivo é o com créditos de carbono e a taxa de juros de 5% ao ano. Mesmo a obtenção de reduções de emissões de GHG não se mostrou promissora, pois aumentou a TIR do investimento em apenas 1%. A obtenção de créditos de carbono de projetos deste tipo é comum na Índia e na China. Esses países possuem um taxa de emissão no sistema elétrico da ordem de 1 tCO<sub>2</sub>/MWh, cerca de quatro vezes maior que a brasileira em razão de sua dependência do carvão mineral para geração de eletricidade [17].

Assim como ocorre em outros países, a incineração se torna atraente com o pagamento de altas taxas de tratamento. Em nosso caso, é preciso dobrar esta taxa para que se atinjam TIRs maiores que 15%.

### F. Análise de Sensibilidade - Incineração

Do mesmo modo, realizou-se uma análise de sensibilidade do modelo desenvolvido para incineração, os resultados encontram-se na Figura 4 a seguir.

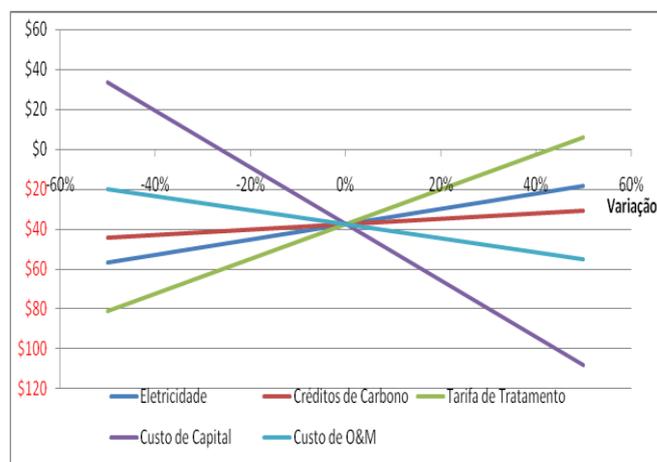


Figura 4. Resultados Análise de Sensibilidade para incineração.

Observa-se que as curvas com maior inclinação em relação ao eixo das abscissas são as de custo de capital e tarifa de tratamento, além disso, estas foram as únicas capazes de gerar um resultado positivo no VPL na faixa de variação estudada (±50%). O empreendimento passa a ser viável (VPL positivo) com custos de capital 25% abaixo do estipulado, ou então com uma tarifa de tratamento 45% maior que a usada. Atingir este valor pode ser difícil no Brasil, já que os municípios não estão habituados a pagar por este serviço. Porém, acredita-se que os custos de uma planta de incineração podem abatidos até os 25% necessários ou até mais, caso parte dos equipamentos da planta sejam produzidos em

território nacional, o que abateria os custos de importação.

### G. Conclusões

O modelo desenvolvido permitiu estabelecer os principais parâmetros envolvidos na análise de viabilidade econômica dos projetos. No caso dos aterros sanitários, os principais fatores são o preço de venda da eletricidade e dos créditos de carbono, já na incineração são os custos de capital e a tarifa de tratamento dos RSU.

Os projetos de geração de energia com gás de aterro mostraram-se dependentes da existência de um mercado de emissões, sem ele, a viabilidade do investimento fica subordinada a bons preços de venda de eletricidade, os quais possuem alta volatilidade. Já na incineração os créditos não se mostraram tão importantes, em razão da baixa emissão de GHGs do sistema interligado nacional.

Os custos de instalação de uma planta de incineração são conhecidamente altos, principalmente em razão dos equipamentos necessários para o tratamento dos efluentes gasosos, essenciais para cumprir os limites de emissão estabelecidos pelas legislações. Para resultados mais concisos, é necessário conhecer com maior precisão os custos de capital e de O&M destas plantas no contexto brasileiro. Porém, fica claro que estes empreendimentos são dependentes das tarifas de tratamento, do mesmo modo que os países europeus. Segundo o estudo, este valor deve ser o dobro do valor pago pelos municípios que despejam o RSU em aterros particulares, cerca de R\$ 45,00, os quais já são altos, considerando-se que a maioria dos municípios despeja seu lixo em lixões a custos muito baixos.

### III. ESTUDO DE CASO EM ATERROS DE MG.

Nesta etapa do projeto foram realizados estudos de casos que simularam plantas com recuperação do biogás de aterros sanitários para geração de eletricidade. Foram escolhidos três aterros de diferentes cidades de Minas Gerais, são elas: Betim, Sabará e Uberlândia. Aqui são apresentados resumidamente os resultados da análise

O estudo foi conduzido com o auxílio do software desenvolvido neste trabalho. Para aumentar a confiança sobre os resultados foram estudados diferentes cenários, onde ocorre a variação dos parâmetros técnicos e econômicos envolvidos na análise. A seguir são mostradas as curvas de potência instalada e disponível nos aterros analisados.

Nas figuras, as curvas (k-) representam uma taxa de degradação do RSU aterrado 12,5% inferior à taxa de degradação recomendada pelo IPCC [3] e as curvas (k+) uma taxa 12,5% maior, isto foi realizado para aumentar a confiança do modelo, encontrando-se deste modo, taxas de variação na produção de metano. A constante de decaimento k define a taxa com que os microorganismos consomem os resíduos para produção de metano, portanto, depende da atividade bacteriana no interior da massa de resíduos, que por sua vez, é função de fatores como a disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e principalmente umidade [18].

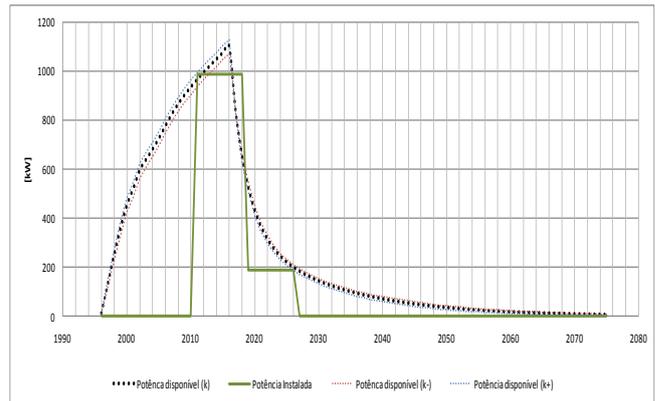


Figura 5. Curvas de potência instalada e disponível no aterro de Betim.

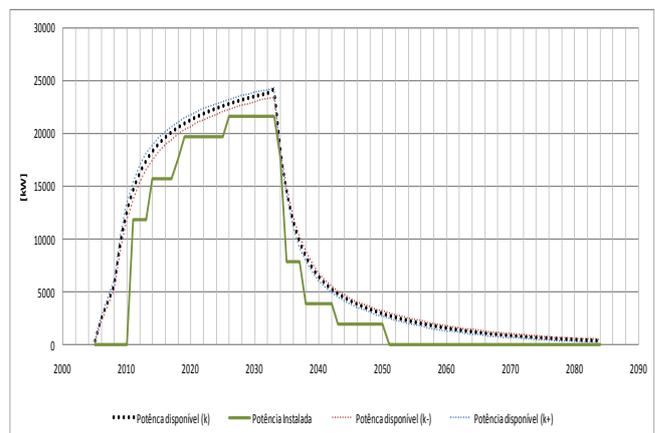


Figura 6. Curvas de potência disponível e instalada no aterro de Sabará.

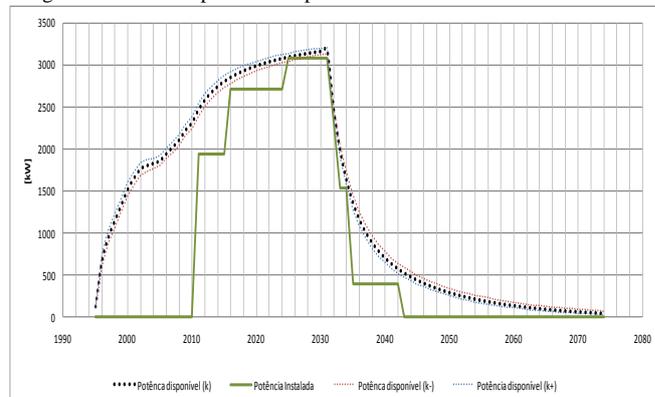


Figura 7. Curvas de potência disponível e instalada no aterro de Uberlândia.

Nas tabelas abaixo são apresentados os resultados da avaliação econômica executada com auxílio do programa para os aterros das três cidades analisadas. Do mesmo modo que no item apresentado anteriormente, analisaram-se para cada cidade dois cenários distintos, um com a existência do projeto MDL e outro sem.

Tabela VIII. Resultados da Análise para o aterro de Betim (Sem MDL).

Taxa de Juros (% <sub>a.a.</sub> )	5,00%	10,25%	15,00%
VPL [US\$]:	-1.475.119	-1.312.628	-1.233.323
TIR:		----	
Custos de Capital:	2.155.255	2.007.629	1.898.828
Custos com O&M:	3.382.245	2.525.491	2.019.454
Venda de Eletricidade	4.062.381	3.220.491	2.684.960
Créditos de Carbono:	0	0	0
Custo Específico [US\$/MWh]:	79,8	65,4	56,5

Tabela IX. Resultados da para o aterro de Betim (com MDL).

Taxa de Juros (% <sub>a,a</sub> )	5,00%	10,25%	15,00%
VPL [US\$]:	933.812	548.863	291.594
TIR:		23%	
Custos de Capital:	2.250.494	2.098.332	1.985.785
Custos com O&M:	4.691.451	3.537.585	2.843.565
Venda de Eletricidade	4.062.381	3.220.491	2.684.960
Créditos de Carbono:	3.813.375	2.964.289	2.435.984
Custo Específico [US\$/MMWh]:	100,1	81,3	69,6

Tabela X. Resultados para o aterro de Uberlândia (Sem MDL).

Taxa de Juros (% <sub>a,a</sub> )	5,00%	10,25%	15,00%
VPL [US\$]:	1.285.562	-340.481	-1.049.767
TIR:		9%	
Custos de Capital:	8.038.990	6.125.613	5.135.734
Custos com O&M:	11.485.918	6.896.437	4.827.447
Venda de Eletricidade	20.810.469	12.681.570	8.913.413
Créditos de Carbono:	0	0	0
Custo Específico [US\$/MMWh]:	38,9	26,0	19,9

Tabela XI. Resultados para o aterro de Uberlândia (Com MDL).

Taxa de Juros (% <sub>a,a</sub> )	5,00%	10,25%	15,00%
VPL [US\$]:	16.411.168	9.072.837	5.725.803
TIR:		58%	
Custos de Capital:	8.134.228	6.216.316	5.222.690
Custos com O&M:	19.444.878	11.685.614	8.165.609
Venda de Eletricidade	20.810.469	12.681.570	8.913.413
Créditos de Carbono:	23.179.805	14.293.198	10.200.689
Custo Específico [US\$/MMWh]:	55,0	35,7	26,7

Tabela XII. Resultados para o aterro de Sabará (Sem MDL).

Taxa de Juros (% <sub>a,a</sub> )	5,00%	10,25%	15,00%
VPL [US\$]:	35.338.187	14.361.497	5.637.959
TIR:		21%	
Custos de Capital:	47.097.206	34.483.606	28.212.159
Custos com O&M:	70.242.937	40.267.061	27.326.804
Venda de Eletricidade	152.678.330	89.112.164	61.176.922
Créditos de Carbono:	0	0	0
Custo Específico [US\$/MMWh]:	29,7	18,9	14,1

Tabela XIII. Resultados para o aterro de Sabará (com MDL).

Taxa de Juros (% <sub>a,a</sub> )	5,00%	10,25%	15,00%
VPL [US\$]:	132.367.898	72.081.004	46.198.928
TIR:		99%	
Custos de Capital:	47.192.444	34.574.309	28.299.115
Custos com O&M:	120.830.947	69.210.608	46.930.940
Venda de Eletricidade	152.678.330	89.112.164	61.176.922
Créditos de Carbono:	147.712.958	86.753.757	60.252.062
Custo Específico [US\$/MMWh]:	42,5	26,3	19,0

Os aterros de Betim e Uberlândia servem a cidades de médio porte (500 mil e 600 mil hab. respectivamente), já o aterro de Sabará recebe o lixo 6 cidades da região metropolitana de Belo Horizonte, atendendo atualmente uma população de mais de 2,7 milhões de habitantes.

Os aterros se distinguem de forma significativa, principalmente em razão do potencial de geração de eletricidade, fato que permitiu concluir que a viabilidade econômica destes projetos depende fortemente do potencial energético do local onde se pretende aplica-lo.

O aterro de Betim mostrou viabilidade positiva apenas com a inclusão de um projeto MDL, entretanto esta viabilidade pode ser revertida facilmente em cenários mais pessimistas de preços de eletricidade e créditos de carbono. O

principal empecilho para melhores resultados no projeto ocorre, pois, boa parte do potencial do aterro já foi desperdiçada nos anos que se passaram sem aproveitamento do biogás.

O antigo aterro de Uberlândia foi fechado em 2010, o que incorreria em uma situação pior que a do a do aterro de Betim. Entretanto, o novo aterro foi construído ao lado do atual, e o potencial dos dois locais somados se mostrou atrativo. Os resultados mostraram novamente que o projeto MDL é essencial em um aterro deste porte, porém desta vez, o resultados foram mais robustos e possíveis variações negativas de preços e taxas não tornariam o investimento inviável facilmente.

O aterro de Sabará mostrou uma alta atratividade econômica, principalmente com a inclusão de um projeto MDL. Os resultados mostram que o projeto é viável com ou sem a obtenção de créditos de carbono A análise mostrou que são necessários preços de comercialização de energia e carbono impraticáveis, e altas taxas de juros para que o projeto se torne inviável.

Com os resultados, conclui-se que o porte do aterro é fator chave nestes projetos. Outro fator importante é a importância de se instalar o empreendimento de geração de eletricidade nos anos iniciais de operação do aterro, para que seu potencial de geração seja devidamente aproveitado, e assim se obtenham melhores resultados econômicos.

#### IV. AVALIAÇÃO AMBIENTAL

Outro objetivo do P&D 194 foi o de comparar estas alternativas do ponto de vista ambiental, através de uma ACV. Neste item, apresentam-se estes resultados resumidamente. Mais detalhes podem ser encontrados em [19].

O estudo foi conduzido no aterro municipal de Betim (Minas Gerais), situado na região sudeste do país. A cidade possui 441.748 habitantes e produz cerca de 200 toneladas diárias de resíduos urbanos. Os principais dados do RSU gerado no município são mostrados na Tabela XIV a seguir.

O aterro iniciou suas operações em outubro de 1996, e tem fechamento previsto para 2016. Os sistemas de disposição e tratamento do lixo compreendem o aterro sanitário, lagoas de tratamento de chorume (lagoa anaeróbia, reator anaeróbio de fluxo ascendente e lagoa facultativa), e um pátio de compostagem. Ele recebe lixo domiciliar e comercial do município e também os restos de poda e capina. Sendo que os resíduos orgânicos da capina e poda de árvores na cidade, dos restaurantes e das empresas que fazem coleta seletiva são transformados em material orgânico no pátio.

Tabela XIV. Características, composição e histórico de disposição dos RSU no aterro de Betim.

Características	Componentes	Ano t RSU	Ano t RSU	Ano t RSU	Ano t RSU
Umidade [%]	Restos de Alimentos	1996	2003	2010	58219
Combustíveis [%]	Tecidos	1997	2004	2011	59069
Cinzas [%]	Plásticos Diversos	1998	2005	2012	59932
PCS (Base seca) [kJ/kg]	Borracha	1999	2006	2013	60807
PCI (Base Unida) [kJ/kg]	Papel e papelão	2000	2007	2014	61695
C <sub>fixo</sub> (Base seca) [%]	Papelão	2001	2008	2015	62595
C <sub>biogénico</sub> (Base seca) [%]	Rejeitos Vidro e Metais	2002	2009*	2016	63509

No trabalho analisaram-se três cenários distintos:

- Cenário 1: Queima direta dos RSU em plantas de incineração de queima em massa com recuperação de energia e seu envio, na forma de eletricidade, para o SIN;
- Cenário 2: O aterro sanitário sem a utilização do biogás, exemplificando o atual estado do aterro de Betim (Cenário Base);
- Cenário 3: Uso do gás de aterro para geração de eletricidade no SIN, utilizando-se como tecnologia os Motores de Combustão Interna (MCI);

As Figuras 8 e 9 abaixo mostram as fronteiras dos cenários considerados na análise.

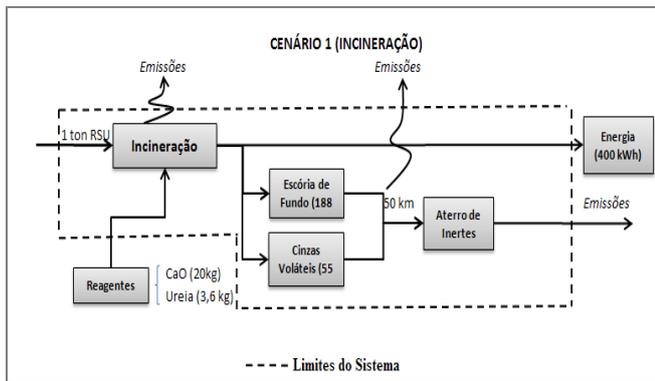


Figura 8. Limites do Cenário 1 (Incineração).

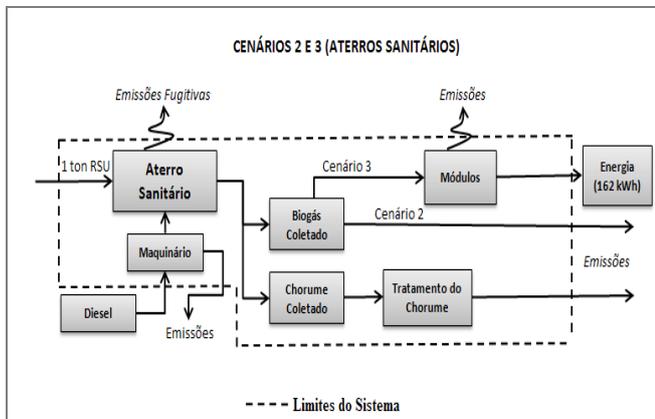


Figura 9. Limites dos Sistemas nos Cenários 2, 3 e 4, Aterro Sanitário.

O comportamento ambiental destes cenários foi comparado com o uso da ferramenta de ACV, com base na série de normas ISO 14040 [20], prevista como um dos instrumentos de gestão no projeto de lei que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos, recentemente sancionada pelo presidente da república.

Foram analisadas as seguintes categorias de impacto ambiental: depleção de recursos abióticos, aquecimento global, toxicidade humana, acidificação, eutrofização e depleção da camada de ozônio. O que tornou possível a identificação de fatores chave envolvidos nos sistemas considerados e indicar aquele que oferece o melhor desempenho ambiental. Os resultados da pesquisa são resumidamente na Figura 10 adiante.

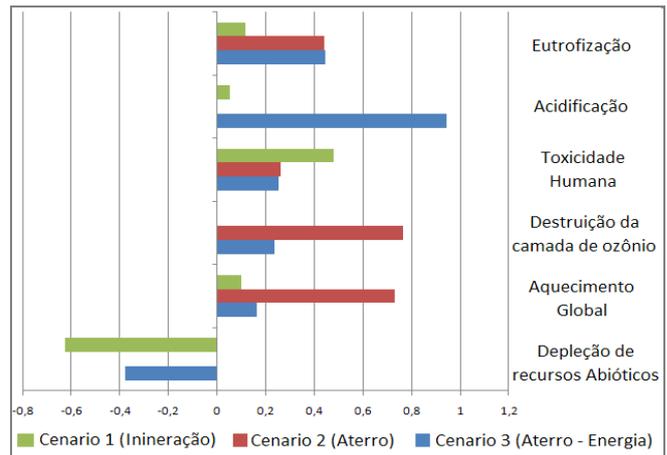


Figura 10. Resultados da Avaliação Ambiental.

Na figura acima, quanto maior o resultado da categoria maior é seu potencial de impacto ambiental.

Os resultados, que podem ser estendidos às grades cidades brasileiras, mostram que os aterros sanitários são a pior opção para o gerenciamento do lixo urbano e ganhos ambientais significativos podem ser obtidos com a recuperação energética dos RSU. Apesar das duras críticas contra seu emprego, a incineração mostrou-se a melhor opção entre as estudadas, porém, só obteve este resultado, pois, considerou-se a utilização de um eficiente sistema de controle de efluentes atmosféricos capaz de cumprir com os padrões de emissão estabelecidos pela legislação. O uso do gás de aterro para geração de eletricidade diminuiu significativamente os impactos ambientais em relação ao cenário base e, portanto, é uma ótima opção para se reduzir impactos no curto prazo, considerando-se que os aterros são predominantes no país.

## V. CONCLUSÕES DO P&D 194

A principal dificuldade para se atingir os objetivos do projeto foi a resistência dos gestores dos aterros sanitários em ceder informações ao estudo. O que ocorre em razão dos problemas sociais, políticos e ambientais envolvidos nestes locais. Outra dificuldade, em relação à incineração, se deve ao fato de inexistir tal tecnologia no país, portanto teve-se de obter grande parte de informações em outros países, o que não é o ideal para abordagens econômicas e ambientais, pois, por maior cuidado que se tenha, acaba-se diminuindo o peso do contexto brasileiro nos resultados.

A incineração dos RSU ainda é mal vista no país. Do pouco encontrado nas referências nacionais sobre o assunto, muito está fundado nos antigos dogmas da incineração com foco na falta de controle da poluição atmosférica, problema há anos superado nos países que utilizam a tecnologia. Este estudo mostrou que esta opção pode ser levada em conta como alternativa aos aterros desde que tecnologias de recuperação energética e de controle de efluentes atmosféricos sejam incluídas.

Esta análise não levou em conta a separação e a reciclagem do lixo, opções de enorme importância ambiental e social. Deste modo, é importante ressaltar, que a gestão dos RSU deve sempre levar em conta a “hierarquia do lixo” on-

de a seguinte ordem de prioridade deve ser respeitada: a diminuição dos resíduos, sua reutilização, e finalmente na reciclagem dos materiais e da energia nele contido.

O fato é que os aterros recuperam nada ou pouca energia se comparados aos incineradores, e ainda dispersam grande parte do RSU em pequenos locais de despejo onde a recuperação energética do biogás e o controle ambiental é inviável. Esta opção gera um fardo incalculável as futuras gerações e os resultados de ACVs no mundo tem mostrado que ela deve ser considerada como ultima opção, apenas para dispor o que resta dos resíduos após este se submetido à hierarquia apresentada acima.

Para se atingir resultados mais sólidos, neste estudo, avaliaram-se apenas as opções mais comuns para se gerar energia com o lixo e as quais podem ser facilmente aplicadas no país, pois, delas pode-se obter informações com maior qualidade, o que influenciou diretamente na confiança dos resultados. Além delas existem diversas opções, como a utilização de combustível derivado de resíduos e a gaseificação, as quais podem ser objeto de futuros estudos na área.

## VI. AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a todas as pessoas envolvidas direta e indiretamente neste projeto e, principalmente, aos funcionários dos aterros visitados, os quais nos receberam de forma digna e cederam informações fundamentais para o sucesso deste projeto.

## VII. REFERÊNCIAS

- [1] Waste Framework Directive. Council of the EU, 2008, Council Directive, 2008/98/EC.
- [2] MURPHY, M. L. Waste-to-Energy Technology. Encyclopedia of Energy, Volume 6. r 2004 Elsevier Inc. All rights reserved.
- [3] IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T. and Tanabe K. (eds). Published: IGES, Japan. 2006
- [4] Kathiravale S., Yunus M. N. M., K. Sopian, A. H. Samsuddin and R. A. Rahman. Modeling the heating value of Municipal Solid Waste. Fuel Volume 82, Issue 9, June 2003, Pages 1119-1125
- [5] ACM0002: Consolidated baseline methodology for grid-connected electricity generation from renewable sources --- Version 12.1.0. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/C505BVV9P8VSNNV3LTK1BP3OR24Y5L/view.html> (Acesso em 29/03/11)
- [6] ACM0002: Consolidated baseline methodology for grid-connected electricity generation from renewable sources --- Version 12.1.0. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/C505BVV9P8VSNNV3LTK1BP3OR24Y5L/view.html> (Acesso em 29/03/11)
- [7] USEPA - U.S. Environmental Protection Agency, Landfill Methane Outreach Program. Landfill Biogas Recovery and Utilization at the Solid Waste Treatment Center BR-040 Belo Horizonte, Brazil: Final Assessment Report. Methane to Markets Contract: EP-W-06-22 TO 008 and 021. 2008.
- [8] Alves, J. W. S. Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás. Dissertação de Mestrado, Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da USP, 2000.
- [9] CITIZENS, Clearinghouse on Waste Management Citizens, (2003). Disponível em: <http://CitizensWasteInfo.org/A559CA/ccwm.nsf/Issues/incineration> (Acesso em 22/09/10)
- [10] MCLANAGHAN, S. R. B. Delivering the Landfill Directive: The role of new & emerging technologies Report for the Strategy. Unit: 0008/2002. Associates in Industrial Ecology, Red Lion Cottage & Barn. Gablesby Penrith, Cumbria. CA10 1HR. November 2002
- [11] REIMANN D. O. Result of specific data for energy, efficiency rates and coefficients, plant efficiency factors and NCV of 97 European W-T-E plants and determination of the main energy results; CEWEP energy report (status 2001–2004) Updated July 2006. Bamberg, Germany.
- [12] Lee, S. HighTemperature Corrosion Phenomena in Waste to Energy Boilers. Work submitted in partial fulfilment of the Requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Graduate School of Arts and Sciences Columbia University, 2009
- [13] CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Site: <http://www.ccee.org.br> (Acesso em 06/05/2010)
- [14] ECX - European Climate Exchange. Emissions Prices. Disponível em: [www.ecx.eu](http://www.ecx.eu) (acesso em 20/11/2010)
- [15] BCB – Banco Central do Brasil. Taxa Selic (ano). Disponível em: <http://www.bcb.gov.br> (acesso em 18/10/2010).
- [16] Bove R., Lunghi, P. Electric power generation from landfill gas using traditional and innovative technologies. Energy Conversion and Management 47 (2006) 1391–1401
- [17] WANG, L.; Hu, G.; Gong, X.; Bao, L. Emission reductions potential for energy from municipal solid waste incineration in Chongqing. Renewable Energy 34 (2009) 2074–2079.
- [18] Mendes L. G. G., Sobrinho P. M. Métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário. Universidade Estadual Paulista – UNESP. Faculdade de Engenharia, Campus Guaratinguetá – FEG. Departamento de Energia – DEN. Rev. ciênc. exatas, Taubaté, v. 11, n. 2, p. 71-76, 2005.
- [19] Leme, M. M. V. Avaliação Ambiental opções tecnológicas para geração de energia a partir dos resíduos sólidos urbanos: Estudo de caso. 2º Congresso Brasileiro em Gestão de Ciclo de Vida de Produtos e Serviços. Florianópolis (SC), 2010.
- [20] ISO 14040:2006 – Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Genebra, 2006. 20p.