

### III-003 - ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA DE UM PROJETO DE ATERRO SANITÁRIO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS PARA O MUNICÍPIO DE CAXIAS DO SUL

**Letícia Moratelli<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental pela Universidade de Caxias do Sul (UCS). Mestranda em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

**Geraldo Antônio Reichert<sup>(2)</sup>**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. Engenheiro do Departamento de Limpeza Urbana (DMLU) de Porto Alegre. Professor do Curso de Engenharia Ambiental da UCS.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Procópio Manoel Pires, 84, apto 301 - Trindade - Florianópolis - Santa Catarina - CEP: 88036-090 - Brasil - Tel: +55 (48) 9602-7590 - e-mail: [le\\_moratelli@yahoo.com.br](mailto:le_moratelli@yahoo.com.br), [leticia.moratelli@ens.ufsc.br](mailto:leticia.moratelli@ens.ufsc.br)

#### RESUMO

Este artigo foi desenvolvido a partir de um Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental, onde se projetou um aterro sanitário energético de resíduos sólidos urbanos para o município de Caxias do Sul, no estado do Rio Grande do Sul. O aterro sanitário energético foi projetado para receber, em média, 475 t/d de resíduos sólidos urbanos. Atualmente, os resíduos sólidos urbanos (RSU) são um dos maiores problemas enfrentados pela sociedade e pelo poder público. A disposição inadequada dos resíduos ou a falta de tratamento podem ocasionar inúmeros problemas, tanto ambientais, quanto de saúde pública. Este estudo tem como objetivo apresentar a análise econômica do projeto supracitado, através da elaboração de alguns cenários que consideram os custos decorrentes da implantação, operação, monitoramento e encerramento do sítio de disposição de resíduos e os benefícios financeiros, advindos da consideração do aterro sanitário ser privado e da comercialização dos créditos de carbono. Para a consecução da análise econômica foram utilizadas as seguintes metodologias: valor presente líquido (VPL), análise benefício/custo (BC) e taxa interna de retorno (TIR). O custo total de investimento calculado para o aterro sanitário foi de R\$ 123.442.927,97, considerando um período de 40 anos, referentes às etapas de monitoramento prévio, serviços técnicos, implantação, operação, manutenção e encerramento. O custo estimado calculado para dispor, aproximadamente, 2.931.274 toneladas de RSU (20 anos de operação do aterro) foi de R\$ 42,00 por tonelada de resíduos aterrados. Os resultados obtidos revelaram que alguns dos cenários construídos são economicamente inviáveis, quando se consideram somente os custos ou quando os benefícios não conseguem superar o capital investido no projeto; por outro lado, outros cenários mostraram-se viáveis do ponto de vista econômico, um deles superando em aproximadamente 150 % o capital de investimento inicial. A expectativa deste artigo é mostrar que o investimento em projetos, neste caso, em um aterro sanitário energético, pode ser muito vantajoso do ponto de vista econômico-financeiro, sem esquecer, também, que é muito importante do ponto de vista ambiental e de saúde pública.

**PALAVRAS-CHAVE:** análise econômica, resíduos sólidos urbanos, aterro sanitário energético, Caxias do Sul.

#### INTRODUÇÃO

Atualmente, os resíduos sólidos urbanos – RSU – são um dos maiores problemas enfrentados pela sociedade e pelo poder público. O tratamento e a disposição adequada dos resíduos representam um grande desafio para os gestores do mundo todo e, em especial, no Brasil (REICHERT, 2007).

A disposição inadequada dos resíduos ou a falta de tratamento podem ocasionar inúmeros problemas, tanto ambientais, quanto de saúde pública. A poluição do solo, da água e do ar, além da possibilidade de contaminação de catadores ou moradores próximos às áreas de disposição dos resíduos, são alguns exemplos dos problemas decorrentes da falta de gerenciamento de subprodutos.

Outro problema vivenciado, nos dias atuais, pela população do mundo todo, é o aquecimento global: elevação da temperatura média do globo terrestre causada pela emissão de gases, denominados de Gases de Efeito Estufa – GEE. O metano e o dióxido de carbono, constituintes do biogás, são dois dos principais gases que contribuem para este efeito na Terra (MORATELLI, 2009).

Os aterros sanitários são uma das formas de tratamento e disposição de resíduos existentes, que protegem o meio natural e a saúde pública, pois permitem uma confinamento segura dos resíduos, através de critérios de engenharia e normas operacionais específicas. Segundo Reichert (2007) o tratamento e a disposição de resíduos no solo é um componente inevitável, pois, mesmo em sistemas mais complexos de gerenciamento de resíduos que contenham unidades de compostagem, processos de reciclagem ou até mesmo sistemas de incineração, sempre haverá a necessidade de disposição final, ou seja, da fração residual ou rejeito, compostos obtidos a partir das transformações da matéria original.

Conforme Lima (2004), as vantagens do aterro sanitário são inúmeras, podendo ser destacadas:

- disposição dos resíduos de forma adequada;
- capacidade de absorção diária de grande quantidade de resíduos e;
- condições especiais para a decomposição biológica da matéria orgânica presente nos subprodutos.

A concepção tradicional dos aterros sanitários permite um confinamento seguro dos RSU em termos de controle da poluição ambiental e proteção à saúde pública. Contudo, além da promoção de um adequado confinamento, há, atualmente, um crescente interesse em se estabelecer a aceleração e o controle da biodegradação dos resíduos sólidos urbanos, uma vez que isso traz vantagens econômicas, operacionais e ambientais (CASTILHOS JR., 2006). As principais vantagens de se promover a aceleração da biodegradação são:

- ✕ aumento da taxa de produção e da qualidade do biogás, visando seu reaproveitamento;
- ✕ facilidade no manejo e tratamento do lixiviado;
- ✕ diminuição do risco e do tempo de monitoramento após o fechamento e;
- ✕ aceleração dos recalques, possibilitando o reuso do volume desocupado e, consequentemente, o aumento da vida útil do aterro.

Segundo Van Elk (2007) a partir da criação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), pelo Protocolo de Kyoto, em 1997, configurou-se uma oportunidade real para a geração de recursos a partir do correto manejo dos sistemas de disposição de RSU, por meio do tratamento do biogás dos aterros sanitários. A legislação brasileira para aterros sanitários trata apenas da captação e drenagem dos gases gerados, mas não exige a sua queima, aumentando as possibilidades de implantação de sistemas de aproveitamento ou queima do biogás que possam vir a se beneficiar com a venda de créditos de carbono (CC). Os CC são receitas obtidas pelos países em desenvolvimento, que ajudam a reduzir as concentrações de poluentes na atmosfera, metas que os países em desenvolvimento precisam atingir, conforme estabelece o protocolo de Kyoto.

Inúmeros são os estudos e as pesquisas que estão sendo desenvolvidos para promover o aproveitamento do biogás gerado pela decomposição dos resíduos domiciliares nos aterros sanitários. A conversão biológica dos resíduos, com fins energéticos, vem se tornando a cada dia mais interessante, pois os resíduos domiciliares podem ser considerados como uma fonte quase que inesgotável de energia alternativa (MORATELLI, 2009).

Os primeiros projetos de aproveitamento de biogás em aterros foram implantados ainda na década de 70, nos Estados Unidos, como medidas de controle das emissões de metano e também como uma nova fonte de energia em meio às crises do petróleo daquela época. Posteriormente, novos projetos surgiram em outros países, principalmente na Europa, sendo que, atualmente, mais de 500 aterros no mundo possuem plantas de aproveitamento de biogás. Os tipos de aproveitamentos energéticos e as finalidades dos projetos são diversas, sendo as mais comuns a geração de energia elétrica e o uso direto como combustível para veículos e indústrias (ENSINAS, 2003).

Deste modo, a adoção da tecnologia de aterro sanitário energético (ASE) para o tratamento e a disposição final dos resíduos urbanos, aliada à maximização e ao aproveitamento do biogás gerado, apresenta-se como uma vantajosa solução para os dois grandes problemas anteriormente apontados, em nível municipal e, quiçá, no futuro, as demais cidades poderiam, desta forma, minimizar expressivamente os problemas decorrentes dos RSU e da intensificação do efeito estufa (MORATELLI, 2009).

Este artigo foi desenvolvido a partir de um Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental, onde se projetou um aterro sanitário energético de resíduos sólidos urbanos para o município de Caxias do Sul, no estado do Rio Grande do Sul. Tem-se, aqui, como objetivo, apresentar a análise econômica deste projeto, através da elaboração de alguns cenários que consideram os custos e os benefícios financeiros decorrentes da implantação, operação, monitoramento e encerramento do sítio de disposição de resíduos. O aterro sanitário energético em questão foi projetado para uma vida útil de 20 anos. O horizonte total de planejamento do aterro é de 40 anos, sendo que 20 anos são referentes ao período de monitoramento e de encerramento.

## ATERRO SANITÁRIO ENERGÉTICO – CONCEPÇÃO DE PROJETO

O aterro sanitário energético projetado possui sistemas de impermeabilização inferior e superior, sistemas de drenagem de águas superficiais, de lixiviado e de biogás, entre outros sistemas. Cabe aqui descrever algumas das principais características do aterro sanitário em questão, para um posterior melhor entendimento da análise econômica do sítio de disposição de resíduos projetado.

O sistema de impermeabilização inferior e das laterais do aterro foi concebido levando em conta sua função primordial – impedir que o lixiviado formado se infiltre no solo, contaminando o lençol freático e, que o biogás migre por fendas do terreno, podendo acumular-se, já que seu peso específico é menor que o do ar. Assim, um bom sistema de impermeabilização inferior será aquele que evite totalmente a passagem de líquidos e de gases para o subsolo e para as águas subterrâneas. Desta forma, o sistema projetado é constituído pelos seguintes materiais e suas respectivas dimensões (de baixo para cima):

- acima das camadas de rocha ou de solo natural (base do aterro) deverá ser implantada uma camada de argila de 60 cm de espessura, apresentando coeficiente de permeabilidade de  $10^{-7}$  cm/s;
- acima da camada de argila, deverá ser instalado um dreno de segurança, também conhecido como dreno testemunho, construído com material drenante – areia, e espessura de 20 cm;
- sobre o dreno de segurança, deverá ser disposta novamente uma camada de argila compactada, com a mesma espessura que a camada anterior (60 cm) e o mesmo coeficiente de permeabilidade;
- acima da segunda camada de argila, deverá ser disposta uma geomembrana de Polietileno de Alta Densidade (PEAD), de 2 mm de espessura;
- sobre a geomembrana de PEAD, uma camada de proteção mecânica deverá ser executada. Esta camada tem por objetivo proteger a geomembrana dos danos que possam ser causados pela colocação do sistema de drenagem de lixiviados ou mesmo dos resíduos sólidos a serem ali dispostos. O material a ser utilizado é o solo do próprio local (proveniente das etapas preliminares de preparação da área), e tem espessura de 30 cm;
- após a construção do sistema de impermeabilização inferior, deverão ser dispostos os drenos de brita, que coletam e esgotam o lixiviado gerado no aterro sanitário.

O sistema de impermeabilização inferior adotado apresenta-se bastante eficiente em termos de proteção do subsolo e das águas subsuperficiais, e para evitar a fuga do biogás tanto pelo fundo do aterro quanto pelas laterais, pois a argila compactada e a geomembrana sintética apresentam coeficientes de permeabilidade bastante baixos (em ensaios de transmissão ao vapor de água, os valores típicos de permeabilidade das geomembranas situam-se na faixa de  $0,5 \times 10^{-10}$  a  $0,5 \times 10^{-13}$  cm/s, segundo Costa *et al.* (2008)).

O sistema de impermeabilização superior tem as seguintes características (de baixo para cima):

- acima das últimas camadas de resíduos dispostas no aterro sanitário, deverão ser implantadas camadas de brita nº 3, com 15 cm de espessura, que servem como drenos horizontais de biogás, conduzindo o gás de aterro para os drenos verticais de biogás existentes na área;
- sobre a camada de brita nº 3 deverá ser disposta uma camada de argila compactada, de 60 cm de espessura, a fim de evitar a perda de biogás para a atmosfera. A compactação deve conferir um coeficiente de permeabilidade à argila de  $10^{-5}$  cm/s;
- e, após a camada de argila, uma camada de solo para cobertura deverá ser colocada, com espessura igual a 20 cm. Esta camada evita danos e ressecamento à camada de argila, além de favorecer um maior escoamento superficial e proteger o solo contra a erosão. Esta camada deverá apresentar uma declividade de 4 %.

Esta cobertura adequada dos resíduos impede o ingresso de água proveniente do escoamento superficial e da água da chuva, evitando a saturação da massa de resíduos e diminuindo a produção de lixiviado. Além disso, a cobertura do topo dificulta a entrada de oxigênio, provocando a redução da fase aeróbia e acelerando o início dos processos anaeróbios, com a geração de metano. A cobertura também tem a importante função de evitar a fuga de biogás para a atmosfera.

O sistema de drenagem superficial deverá ser constituído por drenos e gabiões, sendo: um dreno externo à área de disposição de resíduos, que coleta as águas provenientes da bacia de contribuição do aterro; quatro drenos de base, que coletam as águas que escoam do aterro sanitário, ou seja, que provêm de todos os patamares de resíduos e chegam à base do sítio de disposição de resíduos; sete drenos que encaminham as águas das células de resíduos e que se localizam em cada uma das bermas do aterro sanitário e; seis gabiões, que coletam as águas dos drenos localizados nas bermas do aterro e que serão construídos nas descidas dos patamares de resíduos. Os drenos serão de concreto (exceto os externos, que serão construídos com cascalho) e possuirão diferentes áreas transversais e declividades, conforme a sua disposição.

O objetivo deste sistema é impedir entradas de água na massa de resíduos e, conseqüentemente, evitar que os processos biológicos de decomposição dos RSU sejam prejudicados pelo excesso de umidade. Desta forma, haverá uma diminuição do volume do lixiviado a ser tratado e, assim, um menor custo de projeto.

O sistema de drenagem de lixiviado deverá ser composto por drenos construídos nos pés dos taludes do aterro sanitário (em cada berma do sítio de disposição de resíduos), assim como um sistema de drenos interligados formando uma espinha de peixe (na base do aterro). Os mesmos deverão ser construídos com brita de rocha basáltica n° 5, com coeficiente de permeabilidade  $K = 1 \text{ m/s}$  e porosidade  $p = 0,5$ . As três linhas principais de drenos do fundo do aterro terão, no seu interior, uma tubulação de PEAD perfurada, de 90 mm de diâmetro externo, para maximizar a coleta do lixiviado. Assim, este sistema possibilitará uma melhor utilização do biogás. A drenagem de lixiviado também é importante, pois se esta não for eficaz, pode haver um aumento da umidade na massa de resíduos, reduzindo a degradação da matéria orgânica e, conseqüentemente, a geração de biogás. Os poços de drenagem constituem um importante elemento que possibilita a captação e a recuperação dos gases.

E, por fim, o sistema de drenagem de biogás que, considerando o tamanho e a vida útil do aterro sanitário, foi adotado para os drenos de brita um diâmetro de  $D = 100 \text{ cm}$ , para evitar que o lixiviado suba juntamente com o biogás gerado. Para a construção destes drenos deverá ser utilizada pedra britada n° 5, com coeficiente de permeabilidade  $K = 1 \text{ m/s}$  e porosidade  $p = 0,5$ . Também deverá ser utilizada, no interior dos drenos de brita, uma tubulação de PEAD perfurada de 110 mm de diâmetro externo, para maximizar a captação do biogás gerado. Em cada um dos drenos verticais que sobem até a superfície, deverá ser disposta uma geomembrana em torno dos mesmos, para evitar que o biogás tome caminhos preferenciais (fuga pelas laterais dos drenos de brita), diminuindo a eficiência de coleta e a recuperação energética dos gases. A geomembrana de PEAD terá espessura de 1,0 mm e circundará o dreno de brita.

O aterro sanitário energético foi projetado com o intuito de minimizar a possibilidade de infiltração de lixiviado e de gases no solo e, de evitar emissões fugitivas de biogás, acelerando, assim, os processos de digestão anaeróbia dos RSU e possibilitando o máximo aproveitamento dos gases gerados.

Na figura 1 apresentam-se, respectivamente, as plantas baixas de concepção geral e do aterro sanitário concluído. Na figura 2 são mostrados alguns perfis longitudinais e transversais do aterro sanitário projetado.



**concluído. Fonte: Moratelli (2009).**

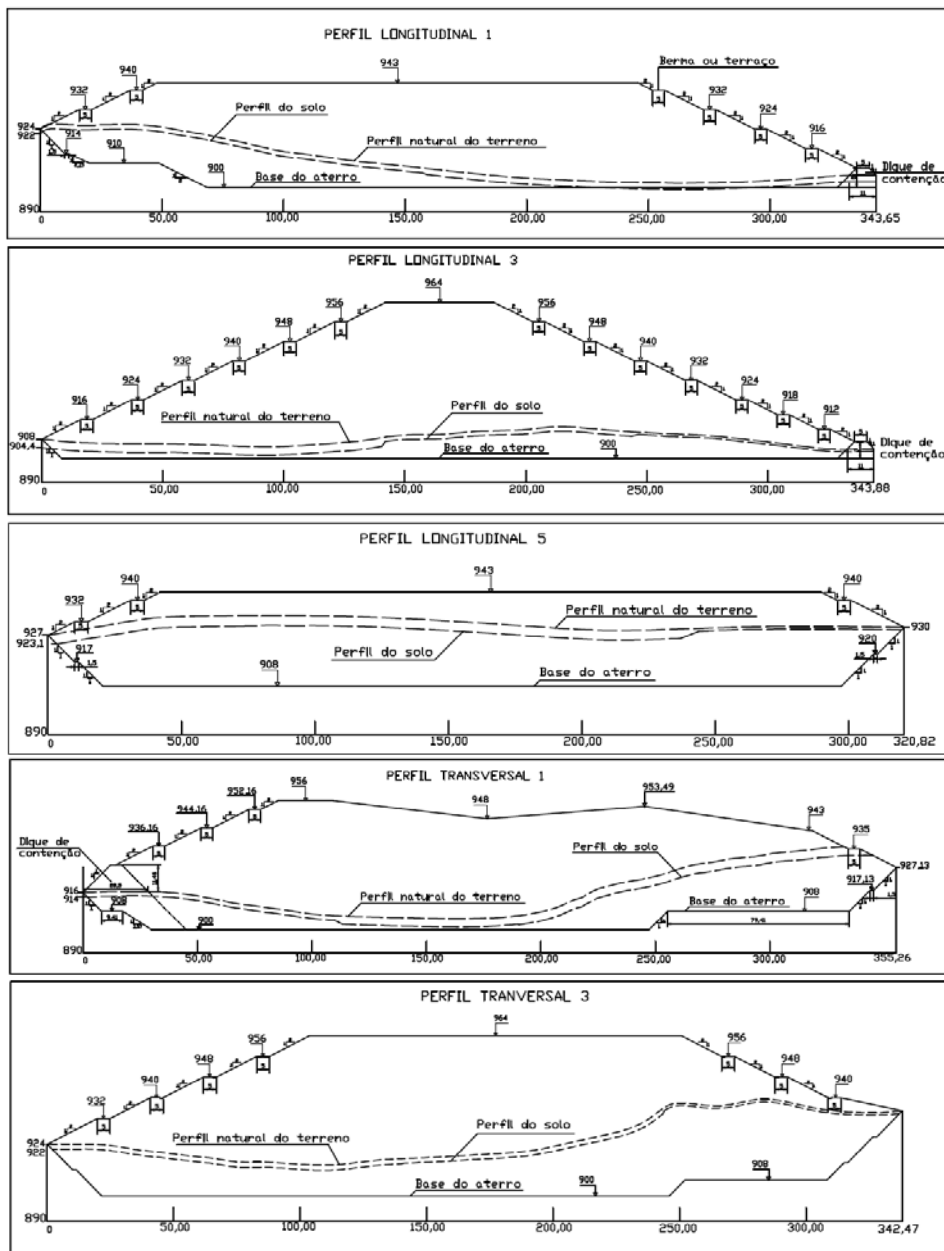


Figura 2: Perfis longitudinais e transversais do aterro sanitário. Fonte: Moratelli (2009).

## POTENCIAL DE GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

Conforme estabelecido pelo Protocolo de Kyoto e pelo Acordo de Marraqueche, todo projeto MDL tem que ser adicional. Para verificar essa adicionalidade é necessária a construção de uma linha de base confiável, uma vez que isso é uma condição necessária à aprovação do projeto pelo Conselho Executivo do MDL (LA ROVERE *et al.*, 2005).

No que diz respeito aos projetos de aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos para geração de eletricidade, deve ser considerada na linha de base a liberação do metano pelos aterros sanitários. Muitas vezes, esses projetos comprovam a adicionalidade somente considerando a redução da emissão de metano através da captura e queima desse gás. Pode-se dizer que, no cenário atual, raramente o metano gerado a partir dos resíduos é recuperado e queimado no Brasil e, assim sendo, somente a captura e a destruição do metano já se configurariam num projeto MDL (LA ROVERE *et al.*, 2005).

A linha de base (*baseline*) de uma atividade de projeto do MDL é o cenário que representa as emissões antrópicas de gases de efeito estufa por fontes que ocorreriam na ausência da atividade de projeto proposta. Esse cenário de linha de base serve de referência para: verificação da adicionalidade e quantificação das Receitas Certificáveis de Emissões (RCEs) decorrentes das atividades de projeto do MDL.

As RCEs são calculadas pela diferença entre as emissões da linha de base e as emissões verificadas em decorrência das atividades de projeto do MDL, incluindo as fugas (FELIPETTO, 2007).

Deste modo, para compor o cenário de linha de base para o projeto de ASE foi considerado que os resíduos sólidos urbanos da cidade seriam dispostos em aterro sanitário comum, sem o aproveitamento do biogás gerado, realizando apenas a sua queima. De acordo com USEPA (1998), dados documentados de aterros sanitários energéticos mostram que a eficiência percentual de coleta de gás metano varia de 60 a 85 %, com um valor médio de 75 % geralmente assumido. Em aterros convencionais, este percentual varia entre 10–20 % (captura e destruição de  $\text{CH}_4$ ), conforme o Ministério da Ciência e Tecnologia (2008). A perda de biogás para a atmosfera (emissões voláteis), em aterros energéticos, varia de 15 a 40 %, enquanto que nos aterros convencionais essa perda pode chegar até 90 % de todo o biogás que é produzido no interior da massa de resíduos.

Assim, foi admitido para o cenário da linha de base que apenas 20 % do biogás seria coletado e destruído, caso fosse implantado um aterro sanitário no município. Já, para o aterro sanitário energético, foi considerada uma eficiência de coleta de 80 %. O período de análise de geração de biogás para os dois cenários foi de 40 anos, considerando que os aterros sanitários tenham uma vida útil de 20 anos e que os RSU lá dispostos gerem metano por mais 20 anos.

O cálculo das emissões de  $\text{CH}_4$ , resultantes da decomposição dos resíduos sólidos destinados aos aterros, foi realizado através da equação do modelo de decaimento de primeira ordem, da Agência de Proteção Norte-Americana (EPA). Este método é muito aplicado no mundo, tendo sido utilizado, inclusive, no estudo do potencial de geração de energia nos municípios brasileiros realizado pelo Ministério do Meio Ambiente (VAN ELK, 2007).

O cenário da linha de base (aterro sanitário comum) relevou que as emissões seriam de, aproximadamente, 4.522.886,14 toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalentes. Já, para o projeto realizado – aterro sanitário energético, seriam emitidas 1.130.721,53 toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalentes. Essa diferença entre as emissões representa as RCEs.

Na figura 3 tem-se a quantidade de emissões em toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalente no decorrer do período analisado, para o cenário de linha de base e para o do projeto em questão. Nota-se que as emissões de gases pela instalação de um aterro sanitário comum (sem aproveitamento do biogás) é muito superior do que seria considerando a implementação de um ASE, que pode captar até 85 % do gases gerados pela decomposição dos RSU. Assim, a diferença entre as emissões, que equivale a 3.392.164,60 toneladas de  $\text{CO}_2$  equivalentes, pode ser creditada no mercado do MDL.

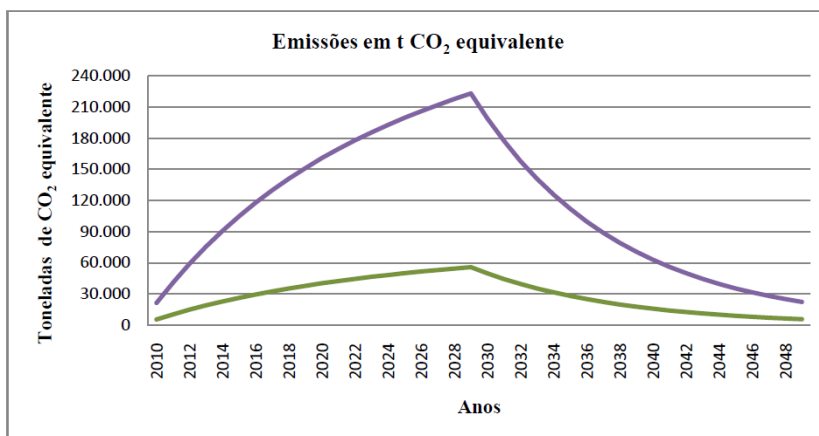


Figura 3: Emissões de  $\text{CO}_2$  equivalente para o cenário da linha de base e para o projeto de ASE. Fonte: Moratelli (2009).

## METODOLOGIA DE ANÁLISE

A análise de viabilidade econômica foi realizada considerando os custos precedentes à implantação do aterro sanitário (serviços técnicos e monitoramento prévio); aqueles referentes à implantação do sítio de disposição de resíduos (sistemas de proteção) e à operação do mesmo; assim como os custos de encerramento e pós-encerramento do aterro sanitário energético.

Na tabela 1 apresentam-se os custos totais do aterro sanitário energético e a percentagem de cada item sobre o custo total do projeto.

**Tabela 1: Resumo dos custos do aterro sanitário energético. Fonte: Moratelli (2009).**

RESUMO DA TABELA DE ORÇAMENTO			
ITEM	DESCRIÇÃO	CUSTO TOTAL (R\$)	%
E-1	Serviços técnicos	188.578,62	0,15
E-2	Atividades iniciais	202.963,00	0,16
E-3	Serviços preliminares	36.203.025,90	29,33
E-4	Instalações de apoio	291.350,00	0,24
E-5	Sistema de impermeabilização inferior	8.161.624,16	6,61
E-6	Sistema de impermeabilização superior	2.819.844,00	2,28
E-7	Drenagem superficial	314.416,00	0,25
E-8	Drenagem de lixiviado	482.843,90	0,39
E-9	Drenagem de biogás	798.836,19	0,65
E-10	Operação do aterro sanitário	49.409.554,00	40,03
E-11	Monitoramento prévio, geomecânico e ambiental	401.748,50	0,33
E-12	Mão-de-obra	14.490.000,00	11,74
E-13	Encerramento e pós-encerramento	10.740.882,00	8,70
<b>CUSTO TOTAL</b>		<b>R\$ 123.442.927,97</b>	<b>100%</b>

Observação: Todos os custos apresentados são referentes ao ano de 2010 e não levam em consideração a inflação, as taxas e os juros existentes.

Sabendo que serão dispostas em torno de 2.931.274 toneladas de RSU no aterro (de acordo com a estimativa feita no trabalho de conclusão de curso), em um período de 20 anos, tem-se um custo de R\$ 42,00 por toneladas de resíduos aterrados (sem atualização dos custos para o período).

Para contrapor os custos, os benefícios considerados no projeto foram aqueles que são provenientes quando o aterro é privado (cobrança pela disposição dos resíduos) e aqueles advindos através da comercialização das RCEs. O valor pago, no ano de 2009, pela venda de créditos de carbono, era de € 9,00/RCE, ou seja, equivalente a nove euros por tonelada de CO<sub>2</sub> não emitida, capturada ou destruída.

Assim, para se determinar a atratividade de um projeto aplicam-se métodos determinísticos para a análise de investimentos. Estes métodos têm por objetivo analisar a viabilidade econômica e financeira de projetos industriais e comerciais. Os métodos determinísticos para análise de projetos mais utilizados são o do VPL – Valor Presente Líquido, do VAUE – Valor Anual Uniforme Equivalente e da TIR – Taxa Interna de Retorno, por levarem em conta o valor do dinheiro no tempo. Outros métodos também usados na engenharia econômica são os do custo-benefício (ou benefício-custo) e do *payback-time* (simples e descontado).

Deste modo, os métodos determinísticos utilizados para realizar a análise econômica do projeto de aterro sanitário energético foram o do VPL, a da TIR e do benefício-custo (BC).

A técnica do VPL desconta os fluxos de caixa gerados pelo projeto a uma taxa especificada, a fim de analisar o resultado do investimento no tempo presente. Esta taxa de desconto ( $k$ ) representa a taxa mínima de rentabilidade exigida pelo investimento, ou seja, a taxa mínima de atratividade (TMA) ou custo de oportunidade de capital. A TMA é o retorno mínimo que deve ser obtido por um projeto, de forma a manter inalterado o valor de mercado do empreendimento (VALENTE, 2008). Assim, para a obtenção do VPL de um projeto de investimento, basta subtrair o valor investido do valor presente de seus fluxos de caixa conforme a equação 1:

$$VPL = \sum_{j=1}^T \frac{FC_j}{(1+k)^j} - I \quad \text{equação (1)}$$

em que:  $T$  = tempo de duração do projeto,  $FC_j$  = fluxo de caixa previsto no tempo  $j$ ,  $I$  = investimento inicial. Um investimento é considerado aceitável do ponto de vista financeiro-econômico quando apresenta um VPL positivo, ou seja, quando apresenta uma rentabilidade superior à TMA exigida pelo empreendimento (VALENTE, 2008).

O método da TIR é a taxa exigida de retorno que, quando utilizada como taxa de desconto, resulta em VPL igual a zero. A TIR pode ser obtida aplicando a seguinte equação 2:

$$I = \sum_{j=1}^T \frac{FC_j}{(1+TIR)^j} \quad \text{equação (2)}$$

Um investimento é considerado aceitável quando apresenta uma TIR superior à TMA, pois gera maior rentabilidade ao investidor.

A análise benefício/custo (BC), segundo Souza e Clemente (2004), é uma medida de quanto se espera ganhar por unidade de capital investido. A hipótese implícita no cálculo do BC é que os recursos liberados ao longo da vida útil do projeto sejam reinvestidos à taxa mínima de atratividade (TMA). A análise benefício/custo pode ser calculada pela equação 3:

$$AnáliseBC = \frac{\sum_{j=0}^T \frac{b_j}{(1+k)^j}}{\sum_{j=0}^T \frac{c_j}{(1+k)^j}} \quad \text{equação (3)}$$

em que:  $b_j$  = benefícios do período  $j$  e  $c_j$  = custos do período  $j$ . A análise BC, para efeito de se aceitar ou rejeitar um projeto de investimento, no ponto de vista financeiro, é análoga à do VPL. Neste caso, deve-se analisar o projeto se BC for maior do que 1 (SOUZA; CLEMENTE, 2004).

Para ajustar os valores ao VP (valor presente) foi considerada a indexação dos valores dos benefícios e dos custos do projeto (ano de 2009) pelo Índice de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA. O valor de 4,5 % foi utilizado para o IPCA. A TMA do projeto foi estimada em 11 % a.a., rentabilidade esta que equivale a um bom investimento, como o CDB (Certificado de Depósito Bancário).

Para analisar os investimentos e os benefícios tangíveis do projeto foram construídos seis cenários:

**1º cenário** - conta somente com os custos do projeto, sem levar em conta os benefícios financeiros;

**2º cenário** - além dos custos, são considerados também os benefícios do projeto relativos à comercialização das RCEs;

**3º cenário** - somente os custos são considerados, porém, com a diferença de que o aterro não seja municipal e sim privado, recebendo, deste modo, uma percentagem de 25 % sobre o valor do custo de disposição dos resíduos sólidos a serem aterrados (ou seja, R\$ 55,00);

**4º cenário** - assim como no terceiro cenário, aterro privado, contando ainda com os benefícios da venda das RCEs (cenário conservador);

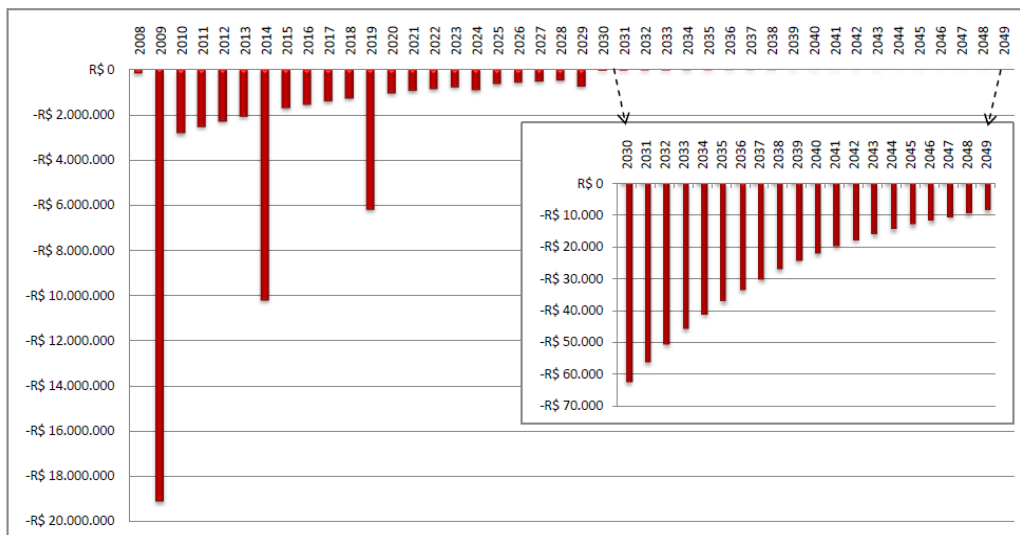
**5º cenário** - tendo como base o segundo cenário, mas considerando que o preço das RCEs sejam maiores do que o estipulado anteriormente (€13,00/RCE) e;

**6º cenário** - modificação do quarto cenário estabelecido, levando em conta que o valor dos RCEs seja o mesmo do quinto cenário.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES DA ANÁLISE ECONÔMICA

Para o 1º cenário construído, onde se contabilizam apenas os investimentos para a implementação do aterro sanitário energético, o resultado para o VPL foi de **VPL = R\$ -59.727.701,14**. As análises de BC e TIR não foram possíveis de serem computadas, já que o projeto não possui benefícios financeiros, mas apenas custos de implantação, operação, manutenção e pós-encerramento. Pode-se verificar, através da análise de VPL, que a implantação do projeto sem a contabilização de benefícios não é viável economicamente, já que apresenta um valor negativo de aproximadamente R\$ 60.000.000,00. Isto quer dizer que, hoje, seriam gastos em torno de sessenta milhões de reais para implantar, operar e realizar as manutenções necessárias no sítio de disposição de RSU. O primeiro cenário analisado não é atrativo, já que resultou em  $VPL < 0$ .

Na figura 4 mostram-se os custos do projeto em valor presente líquido, para cada ano.



**Figura 4: Custos do projeto em VPL - 1º cenário.**

O segundo cenário apresenta, além dos custos do projeto, os benefícios advindos da comercialização das RCEs. O preço estipulado foi de €9,00/RCE (R\$ 2,83). O VPL calculado foi de **VPL = R\$ - 40.168.941,21**. O custo de disposição para este cenário, levando em consideração os benefícios da comercialização das RCEs, se reduz para R\$ 13,30/tonelada de RSU aterrada. A análise BC foi calculada e resultou em **BC = 0,6984**. A análise TIR não foi calculada, pois os benefícios financeiros não são suficientes para recuperar o capital investido (custos de implantação, operação, manutenção e pós-encerramento). As análises de VPL e de benefício/custo evidenciam que a implantação do projeto, com a contabilização de benefícios das RCEs, ainda não é viável, pois resultou em um valor negativo de aproximadamente R\$ 40.000.000,00, para o VPL e em um valor inferior a 1, para a análise BC. O segundo cenário analisado não é atrativo, já que resultou em um  $VPL < 0$  e uma relação benefício/custo  $< 1$ .

Na figura 5 ilustram-se os custos do projeto em valor presente líquido.

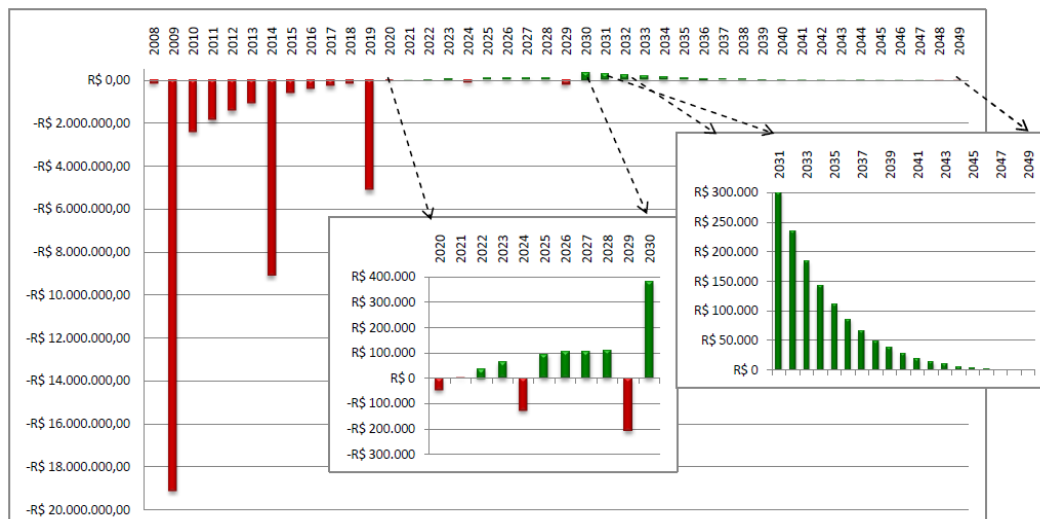


Figura 5: Custos do projeto em VPL - 2º cenário.

No terceiro cenário foi levado em consideração que o aterro sanitário fosse privado. Sabendo que o custo de disposição dos RSU no aterro projetado, sem considerar benefícios, é de aproximadamente R\$ 44,00 por tonelada, o preço cobrado para dispor os resíduos do município no aterro foi de R\$ 55,00 (25 % sobre o custo). Não foram contabilizados os benefícios advindos da comercialização das RCEs neste cenário. A equação do VPL foi aplicada e obteve-se um valor de **VPL = R\$ 4.766.836,70**. A relação benefício/custo foi computada e apresentou o valor de **BC = 1,3032**. Neste cenário, diferentemente dos dois primeiros, é possível calcular a taxa interna de retorno - TIR, pois os benefícios são maiores do que os custos. Assim, a equação 3 foi aplicada e resultou em um valor igual a **TIR = 14,54 % a.a.** O valor de VPL obtido, de aproximadamente R\$ 5.000.000,00, significa que o projeto consegue recuperar o investimento inicial (R\$ 19.349.712,76), remunera também aquilo que teria sido ganho se o capital para esse investimento tivesse sido aplicado na TMA (11 % a.a) e ainda restam, em valores monetários atuais, em torno de cinco milhões de reais (excesso de caixa). Assim, pela análise BC, que resultou em um valor de aproximadamente 1,30 quer dizer que, para cada R\$ 1,00 imobilizado no projeto, espera-se retirar, após o horizonte de planejamento do projeto (40 anos), R\$ 1,30, após deduzido o ganho que se teria caso esse R\$ 1,00 tivesse sido aplicado na TMA. E, com relação à TIR, a comparação deve ser feita com a TMA do projeto. Como a TIR (14,54 % a.a) foi maior do que a TMA do projeto (11 % a.a.), o investidor tem maior rentabilidade se aplicar no projeto em questão.

Na figura 6 evidenciam-se os custos e os benefícios do projeto de ASE em valor presente líquido.

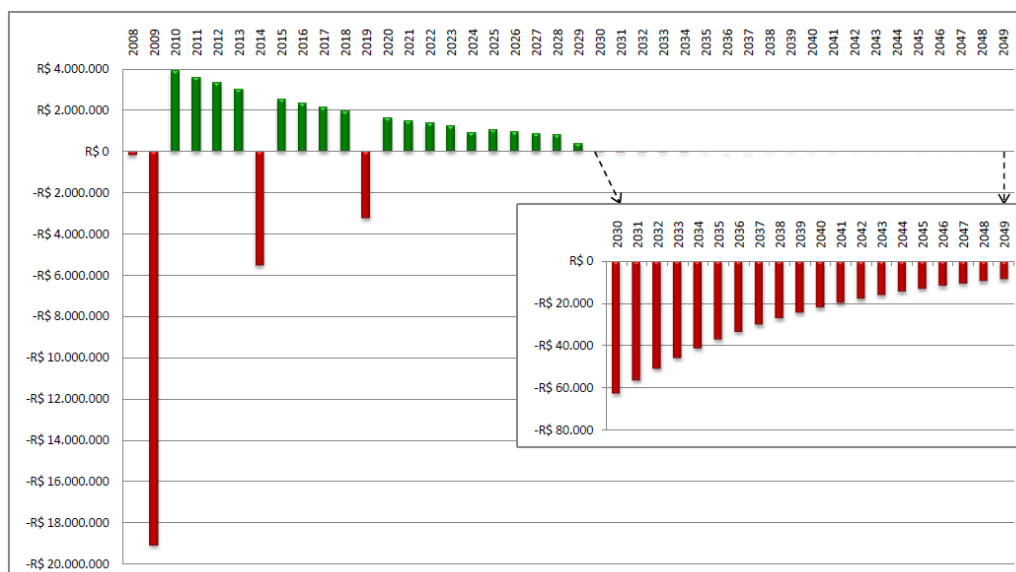
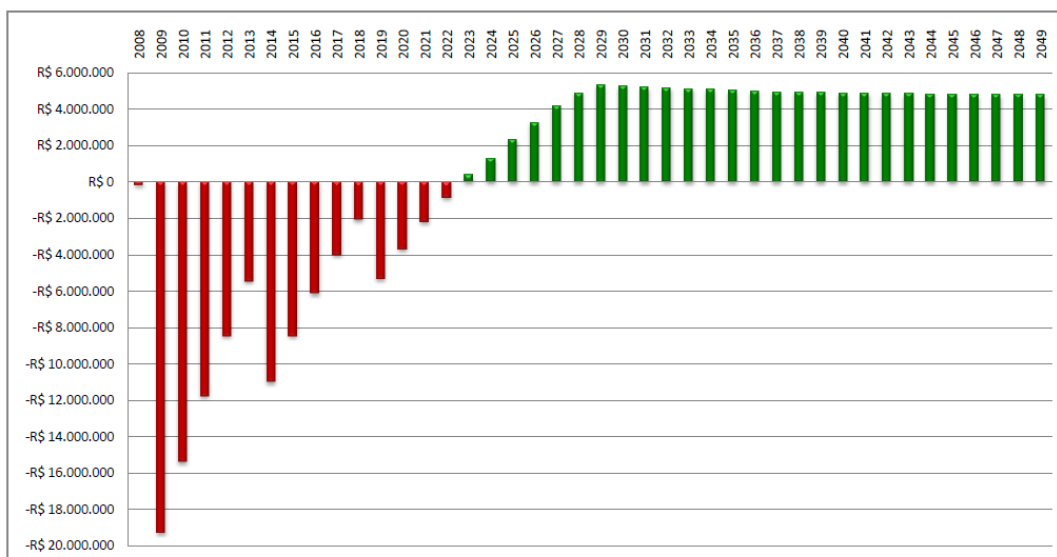


Figura 6: Custos e benefícios do projeto em VPL - 3º cenário.

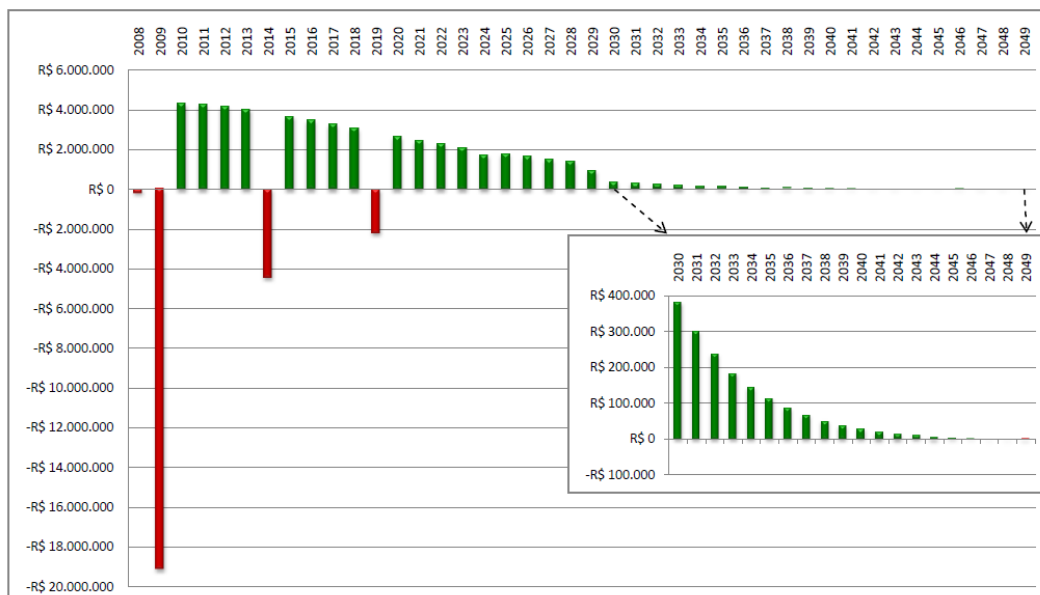
Mostram-se, na figura 7, os valores do saldo em caixa do projeto de ASE aplicados ao VPL.



**Figura 7: Saldo de caixa em VPL - 3º cenário.**

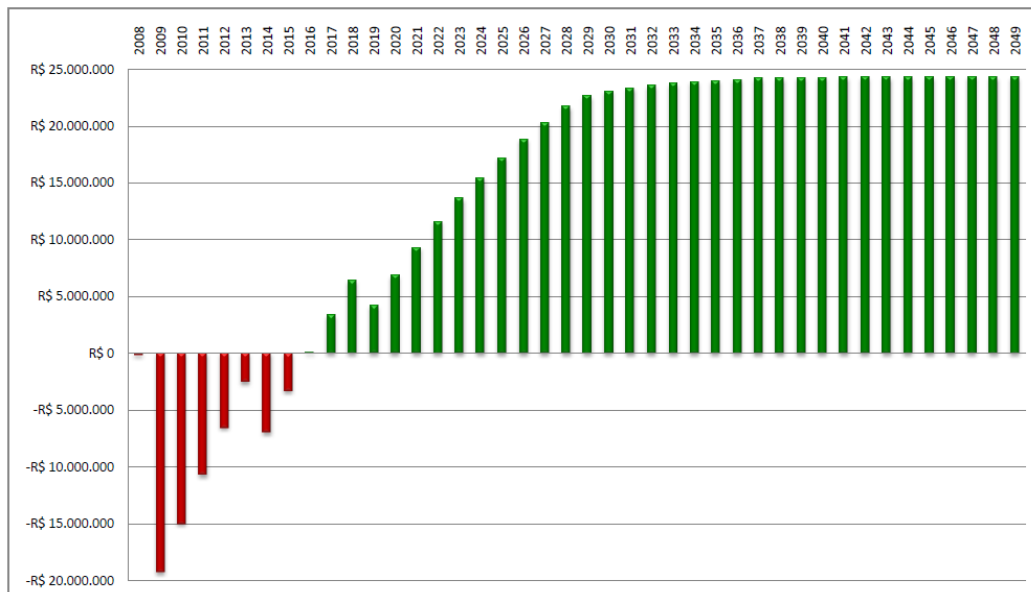
O quarto cenário foi criado para verificar qual seria a atratividade do projeto se este fosse um aterro privado, considerando ainda que a comercialização de créditos de carbono fosse efetuada. O mesmo preço do cenário anterior foi utilizado (€9,00/RCE). O preço cobrado para dispor os resíduos no ASE foi o mesmo do terceiro cenário. O VPL (equação 1) foi aplicado e o valor de **VPL = R\$ 24.325.596,63** foi obtido. A relação BC resultou em **BC = 2,0017** e a TIR em **TIR = 24,03 % a.a.** Pela análise deste cenário, pode-se afirmar que, considerando que o ASE seja privado e conte com a comercialização de RCEs, haverá lucratividade para o investidor, lucros estes superiores em comparação aos do terceiro cenário.

Na figura 8 apresentam-se os custos e os benefícios do projeto de ASE em valor presente líquido.



**Figura 8: Custos e benefícios do projeto em VPL - 4º cenário.**

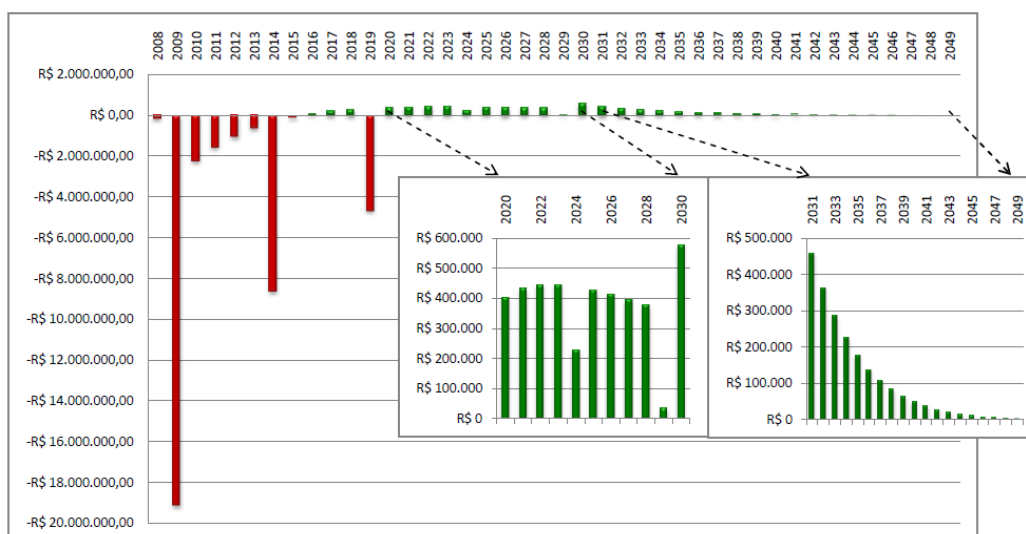
Na figura 9 podem ser visualizados os valores do saldo em caixa do projeto de ASE aplicados ao VPL.



**Figura 9: Saldo de caixa em VPL - 4º cenário.**

O quinto cenário foi construído a partir do segundo, em que são analisados os custos e os benefícios do projeto (RCEs), considerando que o aterro sanitário não cobre pela disposição dos RSU. A diferença do segundo cenário é que o preço das RCEs é de €13,00/RCE. Este cenário foi construído, pois o mercado dos créditos de carbono é extremamente variável e é provável que possa haver um aumento dos preços das RCEs. Para este cenário, o valor de VPL encontrado foi de **VPL = R\$ - 31.476.159,02**. A análise BC obtida foi de **BC = 1,0088**. A análise de VPL indica que a implantação do projeto, com a contabilização de benefícios dos CC valendo € 13,00/RCE, ainda não é viável, pois resultou em um valor negativo de aproximadamente R\$ 31.500.000,00. A análise BC resultou em um valor próximo de 1, evidenciando que é indiferente investir no projeto ou não. A diferença obtida pelas duas análises indica resultados diferentes, pois em uma delas (VPL) é considerada a taxa de desconto ou taxa mínima de rentabilidade exigida pelo investimento, ou seja, a taxa mínima de atratividade (TMA) ou custo de oportunidade de capital, e na outra (Benefício/custo) este valor não é contabilizado. Assim, este cenário indica que, pelo ponto de vista econômico-financeiro, o projeto é inviável, pois não recupera o investimento inicial e não remunera o investidor.

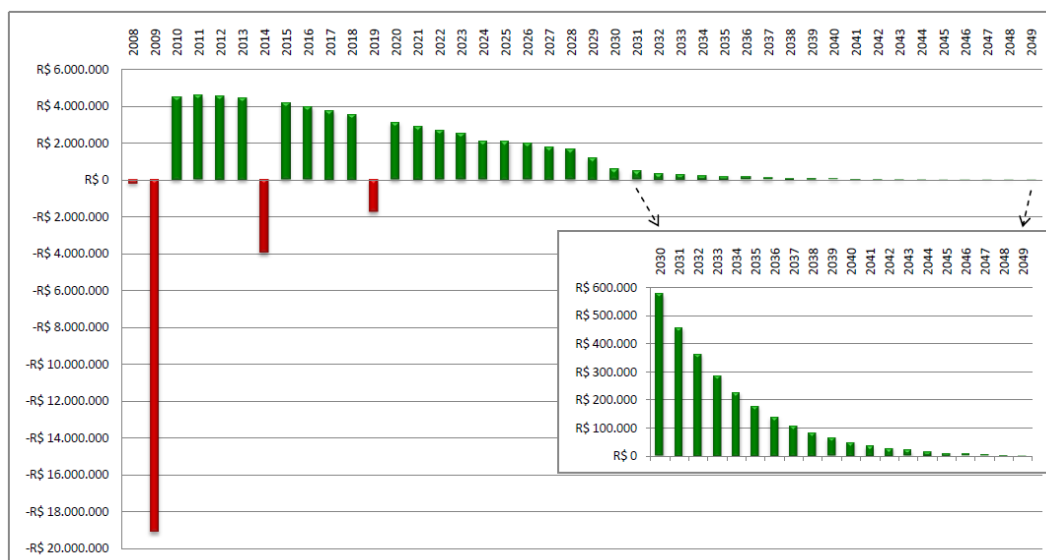
Na figura 10 evidenciam-se os custos e os benefícios do projeto de ASE em valor presente líquido.



**Figura 10: Custos e benefícios do projeto em VPL - 5º cenário.**

O sexto cenário, assim como o quinto, foi construído a partir de um cenário existente. Neste, também foram considerados os custos e os benefícios do projeto (comercialização das RCEs e cobrança pela disposição dos RSU do município) e a diferença criada é o preço das RCEs – € 13,00/RCE. O mercado dos CC é bastante variável e pode haver uma alteração dos preços das RCEs. Assim, procederam-se aos cálculos. A equação 1 foi aplicada para o sexto cenário e obteve-se **VPL = R\$ 33.018.378,82**. A análise benefício/custo calculada pela equação 2 resultou em **BC = 2,3121**. E, por fim, a equação 3 foi aplicada e resultou em um valor igual a **TIR = 27,29 % a.a.** O valor de VPL obtido, de aproximadamente R\$ 33.000.000,00, significa que o projeto consegue recuperar o investimento inicial, remunera aquilo que teria sido ganho se o capital para esse investimento tivesse sido aplicado na TMA (11 % a.a) e ainda sobram, em valores monetários atuais, em torno de trinta e três milhões de reais (excesso de caixa). Pela análise BC, que resultou em um valor de aproximadamente 2,31 quer dizer que, para cada R\$ 1,00 imobilizado no projeto, espera-se retirar, após 40 anos do projeto, R\$ 2,31, após deduzido o ganho que se teria caso esse R\$ 1,00 tivesse sido aplicado na TMA. A TIR obtida, comparando-se com a TMA do projeto, apresentou um índice bem elevado. Assim, a melhor alternativa é investir no projeto, pois este remunera o investidor em 27,29 % a.a., ao invés de 11 % a.a. (TMA).

Na figura 11 são mostrados os custos e os benefícios do projeto de ASE em valor presente líquido, para o sexto cenário.



**Figura 11: Custos e benefícios do projeto em VPL - 6º cenário.**

Na figura 12 demonstram-se os custos e os benefícios do projeto de ASE em valor presente líquido.

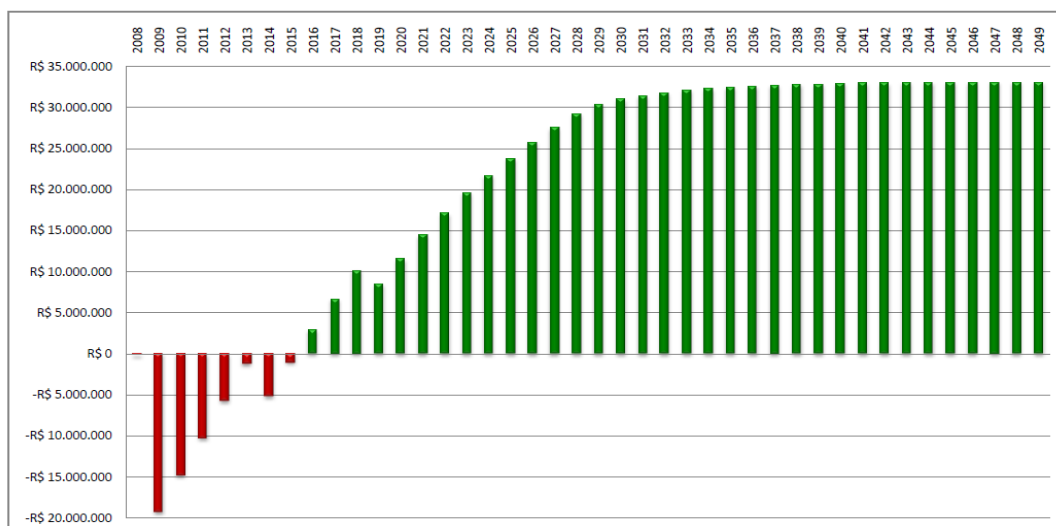


Figura 12: Saldo de caixa em VPL - 6º cenário.

## CONCLUSÕES

O resumo dos resultados obtidos para os cenários anteriormente analisados estão apresentados na tabela 2.

Tabela 2: Resumo dos cálculos financeiros para os cenários construídos.

Cenários	VPL (R\$)	B/C	TIR (% a.a.)
1º	(59.727.701,14)	-	-
2º	(40.168.941,21)	0,6984	-
3º	4.766.836,70	1,3032	14,54
4º	24.325.596,63	2,0017	24,03
5º	(31.476.159,02)	1,0088	-
6º	33.018.378,82	2,3121	27,29

O primeiro cenário construído apresentou-se economicamente inviável, pois leva em conta somente os custos do projeto. O resultado negativo do VPL demonstra a inviabilidade do projeto do ponto de vista financeiro, justamente porque não se tem benefícios a serem contabilizados.

No segundo cenário, o valor da análise benefício/custo foi inferior a 1 e o valor de VPL foi, novamente, negativo, porém menor do que o valor do primeiro cenário, pois incorpora na sua análise a comercialização das RCEs. Mesmo com os benefícios sendo considerados, estes não são suficientes para recuperar o capital investido.

Os valores de VPL, B/C e TIR encontrados no terceiro cenário mostram a viabilidade econômica da implementação do aterro sanitário energético projetado. O investimento, neste projeto, está sendo remunerado a 11 % a.a. e agregando um valor econômico de aproximadamente R\$ 5.000.000,00, expresso em termos de valor presente (análise pelo VPL). Pela análise B/C, para cada R\$ 1,00 investido no projeto, será retirado, após 40 anos, R\$ 1,30, após deduzido o ganho que se teria caso esse R\$ 1,00 tivesse sido aplicado na TMA. A TIR resultante (14,54 % a.a) foi maior do que a TMA do projeto (11 % a.a.) e, deste modo, o investidor tem maior rentabilidade se aplicar no projeto em questão em vez de aplicar em um CDB, por exemplo.

O quarto cenário apresenta valores de VPL, análise B/C e TIR ainda melhores que os do terceiro cenário, revelando uma maior viabilidade do projeto se o mesmo fosse implantado e operado nas condições pré-

definidas (aterro privado e comercialização de RCEs - situação conservadora de €9,00/RCE). Neste caso, o projeto remunera o investidor mais do que o dobro do que se este aplicasse em um CDB.

A análise de VPL do 5º cenário indica que a implantação do projeto (aterro municipal), com a contabilização de benefícios das RCEs valendo €13,00/RCE, ainda não é viável, pois resultou em um valor negativo. A análise B/C resultou em um valor próximo de 1, evidenciando que é indiferente investir no projeto ou não.

No sexto cenário foi considerada a cobrança pela disposição dos RSU e, ainda, o benefício financeiro advindo da comercialização dos CC. O mercado de carbono é extremamente variável (os preços das RCEs já chegaram a €25,00 em julho de 2008) e este, valendo €13,00/RCE, revelou que o investimento se torna bastante viável, pois remunera o investidor em 148 % (acima do que se fosse aplicado em um CDB). Neste cenário, observaram-se valores muito altos, evidenciando a grande viabilidade econômica quando se tem um aterro privado e um valor considerável para venda de CC.

Além de todos os benefícios econômico-financeiros que o projeto pode trazer, têm-se inúmeros benefícios intangíveis, benefícios estes que ainda não podem ser considerados tangíveis, pois não foram descobertos métodos para a sua valoração.

A importância da implantação de um aterro sanitário está na preservação do meio natural e da população em geral, dando um destino e um tratamento correto aos resíduos gerados por uma sociedade. Além disso, o empreendimento sendo projetado para maximizar a geração de biogás poderá suprir pequenas demandas, sejam estas do sítio de disposição de resíduos ou de pequenas comunidades, diversificando a matriz energética em nível local.

A implantação de aterros sanitários energéticos no país trará diversificação de fontes geradoras de energia, sendo que o biogás, conforme comentado, é uma fonte renovável, quase que inesgotável, e ainda estará disponível próxima aos centros consumidores (MORATELLI, 2009).

Cabe o desafio de fomentar a implantação de aterros sanitários e a utilização do potencial do biogás para a geração, não só de energia elétrica, mas também de benefícios ambientais e econômicos (MORATELLI, 2009).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CASTILHOS JR., A. B. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Florianópolis: Prosab, 2006. PROGRAMA DE PESQUISA EM SANEAMENTO BÁSICO.
2. COSTA, C. M. L. *et al.* Avaliação de recomendações normativas sobre o uso de ensaios no controle de qualidade de fabricação de geossintéticos. *Polímeros*. São Carlos, v.18 n.2, 2008. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282008000200014&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0104-14282008000200014&script=sci_arttext)>. Acesso em: 30 abr. 2011.
3. ENSINAS, A. V. Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas, SP. 2003. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2003. Disponível em: <[www.resol.com.br/Textos/GAS%20-%20ESTUDO%20ATERRO%20DELTA.pdf](http://www.resol.com.br/Textos/GAS%20-%20ESTUDO%20ATERRO%20DELTA.pdf)>. Acesso em: 30 abr. 2011.
4. FELIPETTO, A. V. M. Conceito, planejamento e oportunidades. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. Disponível em: <[www.ibam.org.br/publicue/media/02-mdl.pdf](http://www.ibam.org.br/publicue/media/02-mdl.pdf)>. Acesso em: 30 abr. 2011.
5. LA ROVERE, E. L. *et al.* Aterros sanitários no Brasil e o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL): oportunidades de promoção de desenvolvimento sócio-ambiental. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.
6. LIMA, L. M. Q. Lixo: tratamento e biorremediação. 3. ed. rev. ampl. São Paulo: Hemus, 2004.
7. MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Revisão da metodologia de linha de base aprovada AM0003 - "Análise financeira simplificada para projetos de captação de gás de aterro". Brasília: 2008. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br>>. Acesso em: 30 abr. 2011.
8. MORATELLI, L. Projeto de um aterro sanitário energético para a cidade de Caxias do Sul. 2009. 378 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2009.

9. REICHERT, G. A. Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários. Apostila da disciplina de Gerenciamento de Resíduos de Sólidos II, Universidade de Caxias do Sul, 2007.
10. SOUZA, A.; CLEMENTE, A. Decisões financeiras e análise de investimentos: fundamentos, técnicas e aplicações. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2004.
11. USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Municipal solid waste landfills*. EUA, 1998. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s04.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2011.
12. VALENTE, D. N. R. Decisões de investimento em condições de incerteza: uma abordagem com opções reais equivalentes. 2008. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
12. VAN ELK, A. G. H. P. Redução de emissões na disposição final. Rio de Janeiro: IBAM, 2007.