



Análise do custo do ciclo de vida de sistemas de tratamento de resíduos sólidos urbanos

Lineker Max Goulart Coelho¹, Rafaella de Souza Henriques²

¹Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (rafaellahenriques@gmail.com)

²Universidade Federal de Minas Gerais (linekermx@yahoo.com.br)

Resumo

A análise do custo de ciclo de vida (ACCV) é uma ferramenta que possui características interessantes ao setor de resíduos sólidos. Isso porque a ACCV possibilita auxiliar os gestores na realização de prognósticos de custos de implantação e operação de diferentes sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos e também pode trabalhar associada com avaliações ambientais. Sendo assim, o presente trabalho tem por objetivo avaliar sistemas de tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), no contexto brasileiro, utilizando ACCV. Foram avaliados 8 cenários empregando diferentes combinações de cinco tecnologias de tratamento de RSU. Foram utilizados dados de geração per capita e composição de RSU típicos do Brasil. Os resultados indicam que o aproveitamento energético e de materiais dos RSU são fatores fundamentais para a sustentabilidade financeira do sistema de gerenciamento de resíduos sólidos. Dentre as alternativas avaliadas, a geração de energia elétrica a partir do biogás de aterros sanitários e a instalação de usinas de triagem de recicláveis foram as opções com melhor retorno financeiro ao se considerar toda a vida útil do sistema de gerenciamento de RSU.

Palavras-chave: Análise de ciclo de vida. Resíduos sólidos urbanos. Análise de custos.

Área Temática: Resíduos sólidos.

Life cycle cost analysis of municipal solid waste treatment systems

Abstract

Life cycle cost analysis (LCCA) is a tool that presents interesting characteristics to the solid waste sector. Indeed, LCCA allows supporting managers to carry out prognostics related to investment and operational costs of waste management systems and could be used in association with environmental assessment. Thus, this paper aims to evaluate waste management systems for Brazilian context by using the LCCA approach. It were evaluated eight scenarios presenting different combinations of five waste treatment technologie. Brazilian waste generation and composition were used in this study. The results indicate that energy and materials recovery are crucial factors to achieve financial sustainability of solid waste management systems. Among the alternatives assessed, the options that adopt energy recovery from landfill biogas and material recovery from recyclables sorting plants presented the best financing results considering the life cycle of the systems.

Key words: Life cycle analysis. Municipal solid waste. Cost analysis.

Theme Area: Solid waste



1 Introdução

O crescimento da população mundial vem gerando elevados níveis de consumo de materiais e produtos diversos, e conseqüentemente o acelerado desenvolvimento industrial observado em varias partes do mundo tem levado a um aumento da geração de resíduos sólidos. De acordo com o Banco Mundial (2012) cerca de 1,3 bilhões de toneladas de resíduos sólidos são geradas anualmente e estima-se que esta quantidade vai aumentar para 2,2 bilhões até 2025.

Ao mesmo tempo o gerenciamento de resíduos sólidos tem ganhado importância porque a destinação inadequada de resíduos sólidos pode acarretar vários impactos negativos ao meio ambiente em geral. Sendo assim, torna-se necessário encontrar formas para reverter esta situação.

De fato, o gerenciamento de resíduos sólidos passa obrigatoriamente pelas etapas de geração, coleta, armazenamento, transporte e destinação (tratamento ou disposição final), e se constitui como um elemento fundamental para que todos os problemas advindos da geração de resíduos sejam evitados ou minimizados sem causar novos impactos ambientais e a saúde pública em geral.

Especificamente quanto à destinação dos resíduos sólidos urbanos, destaca-se a importância da definição de uma hierarquização e priorização das formas de manejo dos RSU, iniciando-se pela não geração ou minimização da geração, reutilização e reciclagem de resíduos sólidos, aplicação de sistemas de tratamento de resíduos, aproveitamento energético e, finalizando, pela disposição final adequada dos resíduos.

Ressalta-se ainda que o gerenciamento de resíduos sólidos visa orientar gestores e/ou instituições a agir pela sustentabilidade mostrando sua habilidade para utilizar e proteger os recursos naturais (Szaro et al., 1998 apud Orhan, 2011).

De acordo com USEPA (2012), o principal objetivo das tecnologias e políticas para gerenciamento de resíduos sólidos é proteger o meio ambiente e a saúde humana pela redução dos impactos negativos provocados pelos resíduos e pela busca de reutilizá-los para trazer benefícios para a sociedade, em especial a melhoria de sua qualidade de vida.

Entretanto, uma das grandes dificuldades que se tem observado para a elaboração de planos e projetos de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos é a obtenção da taxa de geração dos resíduos sólidos ao longo do tempo.

Na verdade, muitos gestores municipais de resíduos sólidos vem enfrentando problemas para definir os custos que serão demandados para a implantação e operação de plantas de tratamento de resíduos sólidos, por desconhecerem qual a taxa de geração de resíduos mais realística para sua realidade local. Além dos impactos financeiros, as falhas no gerenciamento adequado dos resíduos sólidos também vem trazendo impactos ao meio ambiente e as condições sociais de diferentes regiões (Den Boer et al., 2005).

Diante disso, a obtenção de custos mais próximos dos reais é fundamental para que os gestores possam traçar as melhores linhas de ação para enfrentar os impactos negativos trazidos pela ausência de gestão dos resíduos sólidos urbanos. Segundo Den Boer et al. (2005) a análise do custo de ciclo de vida é uma ferramenta que possibilita auxiliar os gestores na realização de prognósticos quanto aos custos de implantação e operação de diferentes sistemas de gerenciamento de resíduos sólidos urbanos.

Neste contexto, buscando apoiar gestores em suas tomadas de decisões, o presente trabalho tem por finalidade avaliar sistemas de tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), no contexto brasileiro, utilizando análise de custo de ciclo de vida.



2 Material e métodos

Composição gravimétrica

Adotou-se a composição gravimétrica típica dos RSU no Brasil (BNDES, 2013), a qual apresenta as seguintes características: 51.4% orgânicos, 2.9% metais, 13.5% plásticos, 2.4% vidro, 13.1% papel e 16.7% outros.

Cenários analisados e tecnologias consideradas

Foram consideradas 5 tecnologias de tratamento e/ou disposição final de RSU: compostagem, triagem de recicláveis, digestão anaeróbia, incineração e aterro sanitário com e sem aproveitamento energético. Neste estudo foram investigados 8 cenários que correspondem a diferentes combinações das tecnologias supracitadas, as quais são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 é Destinação do RSU para cada cenário de tratamento considerado na avaliação de custo de ciclo de vida

Tecnologias	Cenários							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Aterro sanitário	100%	-	50% org 100% rec	50% org 100% rec	50%	50% rec 100% org	-	-
Aterro sanitário com aprov. energético	-	100%	-	-	-	-	-	-
Compostagem	-	-	50% org	-	-	-	50% org	-
Digestão anaeróbia	-	-	-	50% org	-	-	-	50% org
Incineração	-	-	-	-	50%	-	50%	50%
Triagem de Recicláveis	-	-	-	-	-	50% rec	50% rec	50% rec

É importante ressaltar que os valores constantes na Tabela 1 compreendem a porcentagem de resíduos diretamente enviados para cada tecnologia. Além disso, assumiu-se que rejeitos de cada tecnologia seriam encaminhados para aterros sanitários. Foi considerada uma cidade com 1,000,000 de habitantes com uma geração de RSU per capita diária igual a 1 quilo, o que é aproximadamente o valor médio de geração de RSU no Brasil, conforme a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública - ABRELPE (2016).

Inventário de ciclo de vida

O inventário de ciclo de vida para cada tecnologia de tratamento de RSU foi determinado com base no modelo Life Cycle Assessment Integrated Waste Management - LCA-IWM (Den Boer et al., 2005) o qual foi especialmente desenvolvido para análises de ciclo de vida de sistemas de gerenciamento de RSU. O modelo em questão apresenta inventários de ciclo de vida específico para cada tipo de tecnologia de tratamento de resíduos sólidos apresentando dados sobre uma larga gama de tecnologias atualmente disponíveis.

Custo de ciclo de vida

A comparação dos cenários em termos do seu custo de ciclo de vida foi realizada considerando os custos de implantação e operação bem como as receitas obtidas pela geração



de energia de elétrica e recuperação de materiais a partir dos RSU recolhidos. Considerou-se que as unidades de triagem de recicláveis recuperam 4 frações de materiais (papel, plástico, metal e vidro). Usinas de compostagem e digestão anaeróbia produzem composto a partir de resíduos orgânicos. A geração de eletricidade a partir de RSU para o estudo em questão foi considerada para as tecnologias de incineração, digestão anaeróbia e aterro sanitário. A partir dos resultados de balanço de massa obtidos pelo inventário de ciclo de vida determinou-se o custo de implantação e operação; e receitas de cada tecnologia para todos os cenários avaliados.

Os custos de implantação e operação foram estimados a partir de curvas que os relacionam com a capacidade de processamento das unidades de tratamento. Essas curvas foram obtidas a partir de dados e de equações apresentadas em estudos prévios. As equações para estimativas de custos de operação e implantação de aterros sanitários foram obtidos em Oliveira & Souza (2014) e Banco Mundial (2012). As curvas e dados utilizados para estimativa de custos de sistemas de digestão anaeróbia, usinas de reciclagem e incineradores foram obtidos em Mamede (2013) e Banco Nacional de Desenvolvimento do Brasil ó BNDES (2013). As equações de estimativa de custos envolvendo usinas de compostagem foram definidas a partir de BNDES (2013).

Foi considerado que a vida útil de cada unidade de tratamento e/ou disposição final de RSU é de 20 anos. Com relação ao crescimento da quantidade de RSU gerado ao longo do tempo, tendo em vista que a PNRS (Brasil, 2010) prevê a implantação de medidas para atingir metas de redução dos RSU dispostos, considerou-se que a geração de RSU se matéria constante para o período de projeto avaliado.

Para o cálculo das receitas obtidas com a venda de materiais utilizou-se os dados fornecidos pelo Compromisso Empresarial com a Reciclagem - CEMPRE (2015). Quanto à receita obtida com a venda de energia elétrica considerou-se um valor médio de quilowatt-hora igual a R\$ 0,50.

3 Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos considerando os custos de implantação e operação; e receitas anuais para cada cenário avaliado. Nota-se claramente que o cenário 1, com foco em aterros sanitários sem aproveitamento energético é o que apresenta os menores custos de operação e implantação, o que explica a predominância desta solução técnica no Brasil (ABRELPE, 2016). Por outro lado, tecnologias que proporcionam benefícios para a sociedade como a geração de eletricidade e o reaproveitamento de materiais acabam requerendo maiores investimentos para sua implantação e operação.

Tabela 2 ó Custos de implantação e custo de operação e receitas anuais para cada cenário avaliado

Cenários	Custos		Receitas	
	Implantação (Milhões R\$)	Operação (Milhões R\$/ano)	Geração de eletricidade (Milhões R\$/ano)	Reaproveitamento de materiais (Milhões R\$/ano)
1	9.00	6.50	-	-
2	31,05	10.00	27.35	-
3	14.50	10.80	-	1.58
4	72.50	10.95	9.35	1.65
5	418.80	28.50	45.60	-
6	14.00	9.30	-	32.05
7	428.65	35.24	45.60	33.63
8	486.61	35.42	55.00	33.70



A Tabela 3 apresenta os custos e receitas em cada cenário considerando toda a vida útil dos sistemas em questão. A Figura 1, por sua vez, apresenta os resultados globais, ou seja, a diferença entre as receitas e custos apresentados na Tabela 3.

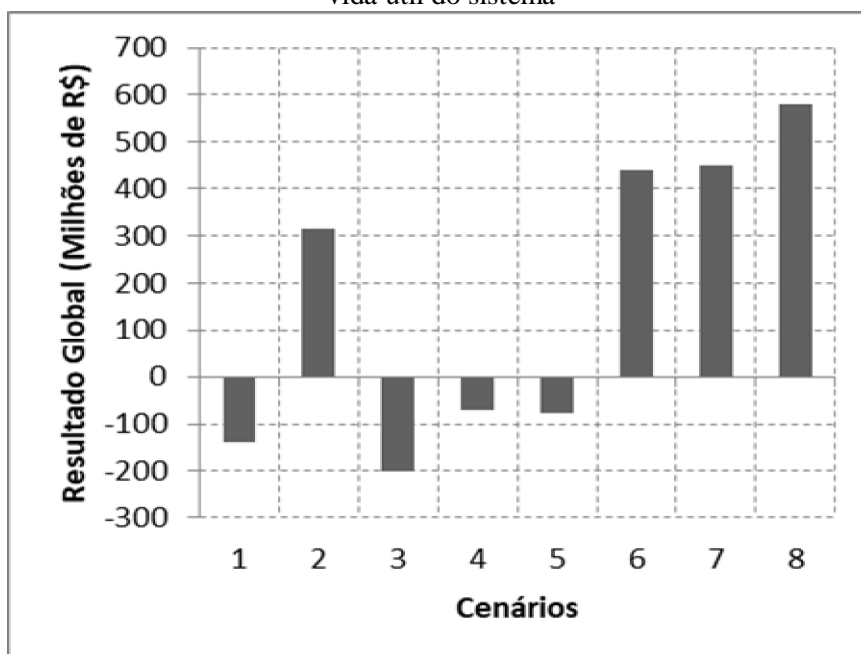
Tabela 3 ó Custos, receitas e resultado global para cada cenário considerando toda a vida útil do sistema

Cenários	Custos (Milhões de R\$)	Receitas (Milhões de R\$)
1	139.0	-
2	231.0	547.0
3	230.5	31.6
4	291.5	220.0
5	988.8	912.0
6	200.0	641.0
7	1,133.4	1,584.6
8	1,195.0	1,774.0

Conforme observado na Figura 1, o cenário que apresentou o pior resultado global em termos de diferenças entre custos e receitas foi o cenário 3, que combina compostagem e aterro sanitário, sendo inclusive pior que o cenário 1 que utiliza apenas o aterro sanitário. Isso porque as receitas obtidas com a venda de composto acabam não compensando os gastos com instalação e operação da usina de compostagem. O segundo pior resultado global é observado para o cenário 1, que compreende o uso de aterro sanitário sem aproveitamento do biogás.

Comparando os cenários 1 e 2, nota-se a uma elevada contribuição financeira positiva da implantação de sistemas de geração de energia elétrica em aterros, pois apesar de elevar o custo inicial de implantação, conforme Tabela 2, ao longo da vida útil as receitas obtidas com a geração de eletricidade superam os investimentos adicionais iniciais.

Figura 1 ó Resultado global de cada cenário: diferenças entre receitas e custos considerando toda a vida útil do sistema





Comparando os resultados dos cenários 3 e 4, o qual se diferenciam quanto ao tipo de tratamento dado a fração orgânica, adotando compostagem e digestão anaeróbia, respectivamente, nota-se um comportamento similar. Apesar de o custo de implantação do sistema de digestão anaeróbia ser mais elevado, o cenário 4 apresentou resultados globais bem mais atrativos do que a compostagem tendo em vista que a digestão anaeróbia permite não apenas a produção de composto, mas também a geração de energia elétrica.

Com relação à incineração, nota-se que, por um lado os custos globais mais elevados foram obtidos para os cenários que utilizam esta tecnologia em sua estratégia de gerenciamento de RSU, sendo eles os cenários 5, 7 e 8. Por outro lado, estes cenários foram também os que resultaram em maiores receitas obtidas pelo gerenciamento de resíduos, principalmente devido à geração de eletricidade pelos incineradores.

Com relação à triagem de recicláveis, esta demonstra ser uma técnica interessante para as autoridades conseguirem aumentar a autossuficiência do sistema tendo em vista que requer um custo de investimento relativamente baixo para instalação de usinas de triagem e uma elevada receita obtida com a venda de material. Ressalta-se que os três cenários (5, 6 e 7), que possuem a triagem de recicláveis como parte da estratégia de gerenciamento de RSU, apresentaram um resultado global positivo.

Sendo assim, do ponto de vista econômico fica evidente que alternativas que apresentam tecnologias que permitem a geração de energia elétrica e reaproveitamento de materiais, apesar de exigirem um investimento mais elevado para sua implantação, em longo prazo contribuem para a sustentabilidade financeira do sistema de gerenciamento de RSU evitando a necessidade de aporte de recursos públicos e gerando inclusive receitas para os municípios.

Considerando apenas as alternativas avaliadas que apresentaram resultado global positivo, destacam-se os cenários 2 e 6, pois estes permitem a geração de receitas consideráveis e requerem investimentos iniciais de implantação bem inferiores aos dos demais cenários que possuem resultado positivo.

Com base nesta constatação foi avaliado um novo cenário combinando as características dos cenários 2 e 6, ou seja, reciclagem de 50% dos recicláveis e aterramento com aproveitamento energético. O resultado foi um custo total e receitas de aproximadamente R\$ 330,000,000.00 e R\$1,190,000,000.00, respectivamente. Assim este novo cenário apresenta um saldo positivo no final de sua vida útil de R\$ 860,000,000.00, sendo a opção com melhor desempenho dentre as alternativas avaliadas.

4 Conclusões

O estudo em questão avaliou diferentes estratégias para tratamento e disposição final de RSU para cidades de grande porte no Brasil sob a ótica da análise de custo de ciclo de vida. Os resultados indicaram que a maioria das alternativas que possuem um custo de implantação elevado mostrou-se viável em longo prazo graças as receitas obtidas com geração de energia elétrica e aproveitamento de materiais.

Dentre as opções avaliadas constatou-se que a adoção de sistemas de aproveitamento energético de biogás em aterros e instalação de usinas de triagem de material reciclável possuem os menores custos de implantação se comparadas a outras tecnologias que também resultam em ganhos financeiros ao longo da vida útil do sistema. Portanto, com base nos resultados obtidos, essas tecnologias são as opções mais adequadas do ponto de vista econômico.

Ressalta-se que os resultados e conclusões obtidos foram elaborados considerando as características típicas de geração e composição de RSU no Brasil, não devendo ser generalizados a outras regiões as quais devem ser analisadas com base em suas



especificidades. Como complemento a análise de custo de ciclo vida realizada sugere-se o desenvolvimento de estudos futuros que permitam a incorporação de custos sociais e ambientais associados ao gerenciamento do RSU na análise de custos de ciclo de vida.

5 Referências bibliográficas

ABRELPE, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil ó 2015. São Paulo: ABRELPE, 2016.

BANCO MUNDIAL. What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management, Washington DC, USA: World Bank, ch. 3, 7-8, 2012.

BNDES, BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão. 186p, 2013.

BRASIL. LEI Nº 12.305/2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União. 03 ago. 2010.

CEMPRE, COMPROMISSO EMPRESARIAL PELA RECICLAGEM. Preços de venda de materiais recicláveis, 2015. Acesso em 11 de dezembro de 2015, disponível em: <http://www.cempre.org.br>

DEN BOER, E. DEN BOER, J. JAGER. Waste Management Planning and Optimisation. Handbook for Municipal Waste Prognosis and Sustainability Assessment of Management Systems. 283 pp, 2005.

MAMEDE, M. C. S. Avaliação Econômica e Ambiental do Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos no Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Unicamp, 2013.

OLIVEIRA, R. SOUZA L. E. Desenvolvimento de Modelo de Estimativa de Custos aplicado ao caso dos Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos. Ciência e Natura, Santa Maria, v. 36 Ed. Especial, p. 3026313, 2014.

ORHAN, A. Eco-economy in sustainable development and waste exchange, a new approach regarding waste management. Middle East Finance and Economics, 10, 41-50, 2011.

SZARO, R.C., SEXTON, W.T., VE MALONE, C. R. The Emergence of Ecosystem Management as a Tool For Meeting People's Needs and Sustaining Ecosystems, Elsevier Science, Landscape and Urban Planning, 21 pp, 1998.

USEPA, UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Municipal Solid Waste, 2012. Acesso em 11 de novembro de 2014, disponível em: <http://www.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/index.htm>