

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO E ECONÔMICO DO TRATAMENTO, DESTINAÇÃO E REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS (RSU)

Andrea Brynner Rezende

Mestre em Engenharia de Energia pela UFSJ

Recebido em: 25/05/2015

Aprovado em: 07/12/2015

RESUMO

A disposição final de RSU (Resíduo Sólido Urbano) apresenta-se como um grande problema para os municípios. Existem rotas de tratamento dos resíduos, das quais as mais utilizadas são incineração e aterro sanitário com recuperação de energia. Essas rotas podem, ainda, ser avaliadas segundo critérios de beneficiamento de materiais recicláveis (integradas) ou na comercialização desses materiais de forma bruta (não integradas). As rotas de tratamento podem gerar renda, o que amortiza o investimento empregado. Tais rendas podem ser obtidas com a venda de energia elétrica, com a comercialização de materiais recicláveis, com crédito de carbono através do MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), taxas de tratamento de RSU, entre outras. Na modalidade de tratamento integrado, pode ser observado ganho financeiro com a economia de energia na produção de bens a partir de materiais recicláveis, encurtando a cadeia produtiva, além dos ganhos ambientais com economia de matéria-prima. A viabilidade dos projetos (incineração e/ou aterro sanitário) pode ser potencializada com a formação de consórcios intermunicipais que, dentre outras vantagens, podemos citar a diminuição de custos, facilidade na captação de recursos e ampliação de receitas.

Palavras-chaves: Resíduo sólido urbano. Recuperação energética. Incineração. Aterro sanitário. Reciclagem.

POTENTIAL ENERGY AND ECONOMIC ASSESSMENT OF TREATMENT, USE AND MUNICIPAL SOLID WASTE REUSE (MSW)

ABSTRACT

The final disposal of MSW (Municipal Solid Waste) represented a major problem for municipalities. There are treatment of waste routes of which the most used are incineration and landfill with energy recovery. And may also, these routes are evaluated according to criteria processing of recyclable materials (integrated) or when to sell them raw to materials (non - integrated). Treatment routes can generate income, which amortizes the employee investment. Such as income from the sale of electricity, with the marketing of recyclable materials, with carbon credit through the CDM (Clean Development Mechanism), MSW treatment rates, among others. In the integrated treatment modality, can be seen financial gain with energy

savings in the production of goods from recyclable materials shortening the supply chain, in addition to environmental gains with saving raw material. The feasibility of projects (incineration and / or landfill) can be enhanced with the formation of consortiums, which among other advantages we can mention the cost savings, ease in fundraising and expansion of revenue.

Keywords: Municipal solid waste. Energy recovery. Incineration. Landfill. Recycling.

1 INTRODUÇÃO

De acordo com (ABRELPE, 2012), a geração de RSU, no Brasil, no ano de 2012 foi 62.730.096 toneladas. Quanto à sua destinação final, 42,02% desse material (23.767.224 toneladas) foram encaminhados para lixões ou aterros controlados, que do ponto de vista ambiental, pouco se diferenciam dos lixões, pois não possuem o conjunto de sistemas necessários para a proteção do meio ambiente e da saúde pública. Na Região Sudeste, foi gerado, em 2012, a quantidade de 98.215 [t/dia] de RSU. Dos resíduos coletados na região, cerca de 28%, correspondentes a 26.492 toneladas diárias, ainda são destinados para lixões e aterros controlados. No Estado de Minas Gerais, no ano de 2012, foram gerados 17.445 [t/dia] de RSU. A disposição final desses resíduos, cerca de 35,8% foram também dispostos nesses tipos de logradouros.

É do conhecimento de todos que os aterros controlados e os lixões empregados largamente por muitos municípios do País, não são formas adequadas de destinação final, e por isso, tenderão a ser desativados. Em se tratando de aterros, só serão permitidos os denominados aterros sanitários, uma vez que nestes há o monitoramento contínuo das áreas de disposição, pois nos mesmos são gerados efluentes líquidos e gasosos que demandam tratamentos específicos. Tal situação tem motivado pesquisas sobre a aplicação de novas tecnologias que reduzam a quantidade de RSU a dispor e ainda permitam benefícios adicionais como a obtenção de receitas pela comercialização de coprodutos gerados.

Dentre esses coprodutos pode-se destacar a geração de energia elétrica que pode se mostrar elemento importante dentro de uma estratégia regional ou local de expansão de oferta de energia. Dentro do Plano Nacional de Energia 2030 – PNE 2030 (EPE, 2007) é considerada a possibilidade de instalação de até 1.300 MW nos próximos 25 anos em termelétricas utilizando RSU como combustível, indicando que são esperados avanços importantes no aproveitamento energético do RSU.

Os aterros sanitários com aproveitamento energético do gás metano podem se mostrar como uma rota de tratamento do RSU. Os processos biológicos, aqui empregados, são considerados de menor agressão à Natureza. Por esse caminho tecnológico, neste estudo foi considerado que a parcela orgânica presente no RSU poderá ser convertida através da digestão anaeróbica em gás de aterro (metano) que poderá ser utilizado para produção de energia elétrica.

O aproveitamento energético do RSU, de maneira mais ampla, engloba a reciclagem de materiais coletados aqui denominados recicláveis tais como papel/papelão, vidro, plásticos, metais ferrosos, alumínio, dentre outros. A reciclagem permite a substituição de insumos, para cuja produção há, comumente, grande consumo de energia (EPE, 2008), pode ser considerada uma forma ambientalmente eficiente de tratamento energético de RSU por aliviar pressões de demanda de matéria-prima, energia e recursos naturais, inclusive.

A caracterização é a base para análise de viabilidade do tratamento com recuperação energética do RSU. Por isso, torna-se necessário o conhecimento da composição gravimétrica do RSU a ser utilizada, a produção total diária de RSU e produção per capita do mesmo. O conhecimento específico das características citadas anteriormente é notoriamente uma das dificuldades a serem superadas no processo de aproveitamento energético do RSU. Dificuldades estas que motivaram o presente estudo considerando-se que a situação atual do tratamento do RSU coletado nos municípios de forma geral também contribuiu para a oportunidade desta pesquisa.

2 METODOLOGIA

A metodologia aqui empregada consiste na adaptação de Sabetai Calderoni (CALDERONI, 1998), José Antônio Poletto Filho (POLETTTO FILHO, 2009), *United States Environmental Protection* (USEPA 2, 1997), Fundação Getúlio Vargas (FGV, 2009), *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2006), Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2012) e Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental & SMA-SP (CETESB/SMA, 2003). Cabe ressaltar que a metodologia pode ser aplicada para qualquer município ou consórcio de municípios, desde que conhecidas população, geração *per capita* diária de RSU e respectiva composição gravimétrica.

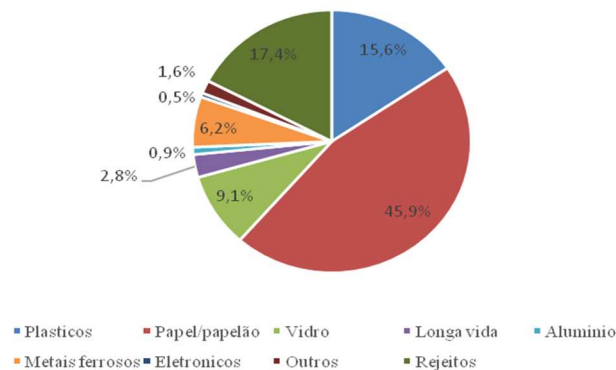
A opção de destinação considerada neste trabalho aproveita a energia contida no RSU para produção de eletricidade. Na tecnologia de aproveitamento de gás de aterro sanitário deve-se estimar o volume de biogás produzido e seu PCI que também depende da composição gravimétrica do RSU.

No presente trabalho consideram-se três cenários para a massa de RSU, baseados em diferentes composições gravimétricas para papel/papelão, plástico, vidro, metais ferrosos, alumínio, matéria orgânica e diversos (inclui têxtil, madeira, varrição e podas). Essa hipótese refere-se a avaliar a relação entre as vantagens e desvantagens da segregação e não segregação em detrimento entre produzir energia e reciclar materiais.

- **Primeiro cenário:** RSU sem segregação;
- **Segundo cenário:** RSU com segregação parcial de materiais recicláveis (papel/papelão, plástico, vidro, metais ferrosos e alumínio). A segregação desses materiais foi feita tendo por base a média da composição gravimétrica da coleta seletiva no Brasil, de acordo com (CEMPRE, 2012) e apresentada no gráfico da FIG. 1. Cabe salientar que os materiais segregados são considerados como recicláveis;
- **Terceiro cenário:** RSU com segregação total de materiais recicláveis.

Figura 1 - Média da Composição Gravimétrica da Coleta Seletiva

Média da Composição Gravimétrica da Coleta Seletiva



Fonte: (CEMPRE, 2012).

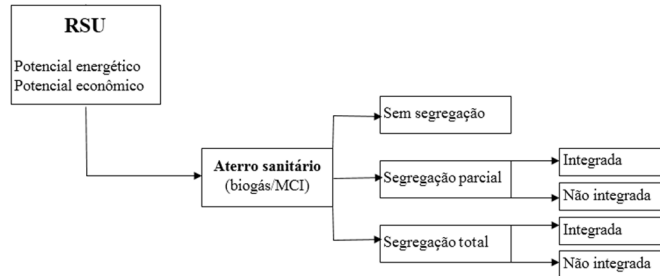
Nos casos de segregação parcial e total, avaliam-se ainda mais duas alternativas de tratamento:

- A primeira, aqui designada **integrada**, considera-se a agregação de valor aos recicláveis por meio do beneficiamento e venda do produto manufaturado;
- A segunda, designada **não integrada**, considera-se apenas a transferência (venda) do material reciclável bruto.

A metodologia implementada em planilhas de cálculo permite considerar o aproveitamento energético e econômico do tratamento e disposição final do RSU através das

duas técnicas mais comumente utilizadas. A FIG. 2 apresenta um esquemático das opções avaliadas e explicadas na sequência.

Figura 2 – Opções avaliadas



Fonte: Elaboração própria.

Neste trabalho, são avaliados 5 cenários para o Consórcio a saber: aterro sanitário – sem segregação, aterro sanitário – segregação parcial – integrada, aterro sanitário – segregação parcial – não integrada, aterro sanitário – segregação total – integrada; aterro sanitário – segregação total – não integrada.

A produção diária de RSU pode ser estimada baseando-se na população residente no município ou consórcio (forma de associação entre municípios) e na produção de RSU *per capita* local, conforme Equação 1:

$$M_{RSU} = h \cdot a \quad (1)$$

O conceito de composição gravimétrica, de acordo com (IBAM, 2001), traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de RSU analisada. Como dito anteriormente, para o presente estudo foram selecionados os seguintes componentes de composição gravimétrica: papel/papelão, plástico, vidro, metais ferrosos, alumínio, matéria orgânica e diversos (inclui têxtil, madeira, varrição, podas). Na TAB. 1 está apresentada a composição gravimétrica do RSU coletado na região do consórcio.

Tabela 1 – Composição gravimétrica do RSU

Componente	% gravimétrica
Papel e papelão	9,0%
Plástico	8,0%
Vidro	3,0%
Metais ferrosos	3,4%
Alumínio	0,6%
Matéria orgânica	66,0%
Diversos	10,0%

Fonte: (FEAM, 2012)

A massa de cada componente presente no RSU produzida diariamente para o primeiro cenário pode ser calculada através do produto de sua parcela na composição gravimétrica pela produção de RSU diária. Abaixo a Equação 2 utilizada para a estimativa dessas massas:

$$M_{\text{comp},1} = Y \cdot M_{\text{RSU}} \quad (2)$$

Para o segundo cenário considerado, no qual foi segregada parte dos materiais recicláveis conforme (CEMPRE, 2012) a massa de cada componente de material presente no RSU pode ser calculada conforme Equação 3 e destinada à comercialização seja para modalidade integrada ou não integrada:

$$M_{\text{comp},2} = (1 - k) \cdot Y \cdot M_{\text{RSU}} \quad (3)$$

Para o terceiro cenário, foram retirados 100% dos materiais recicláveis, restando as parcelas de matéria orgânica e dos materiais diversos que poderão ser obtidos aplicando a Equação 2 para cada caso.

A massa de RSU produzida anualmente poderá ser estimada pela Equação 4 que segue:

$$M_{\text{RSU ano}} = (M_{\text{RSU dia}} \cdot n_d) / 1000 \quad (4)$$

A tecnologia de aproveitamento do gás de lixo (GDL) ou biogás produzido nos aterros é o uso energético mais simples dos RSU. É uma alternativa que pode ser aplicada a curto e

médio prazo para os gases produzidos na maioria dos aterros já existentes. Esse método consiste na recuperação do biogás originado na decomposição anaeróbica da fração orgânica do RSU.

O gás metano é o principal componente do biogás sendo ele cerca de 21 vezes mais potencialmente nocivo que o dióxido de carbono em termos de efeito estufa. Por isso, sua simples queima representa benefício ambiental perante sua emissão. Em conjunto, o aproveitamento energético também evita a emissão de combustível fóssil que poderia ser utilizado para ofertar a mesma quantidade de energia que o biogás.

A geração do biogás ocorre através de quatro fases características da vida útil do aterro, a saber (EPE, 2008):

- Fase aeróbia: é produzido o CO₂, com alto teor de N₂, que sofre declínio nas passagens pelas fases 2 e 3.
- Esgotamento de O₂: ambiente anaeróbico com grandes quantidades de CO₂ e um pouco de H₂ produzido.
- Fase anaeróbia: iniciando a produção de CH₄, reduzindo a quantidade de CO₂ produzido.
- Fase final: produção quase estável de CH₄, CO₂ e N₂.

A composição do resíduo, o material de cobertura, o projeto e o estado anaeróbico são as principais condições que determinam a duração das fases e o tempo de geração do gás, que podem ainda variar com as condições do clima local.

O método usado como referência para o cálculo da estimativa de produção de biogás foi o Método de Decaimento de Primeira Ordem I (IPCC, 1996; USEPA 2, 1997). Considerando a geração de metano por uma quantidade de resíduo depositada no ano x durante os anos posteriores. Como, a cada ano, novas quantidades de resíduos são depositadas, a quantidade de metano gerada em um determinado ano será igual à geração do resíduo depositado no ano T somado às gerações dos resíduos depositados nos anos anteriores, referenciadas no ano T (CETESB/SMA, 2003).

A estimativa da emissão de metano gerada pode ser feita pela Equação 5:

$$Q_T = F \cdot R_x \cdot K \cdot L_0 \cdot e^{-k(T-x)} \quad (5)$$

A variável, R_x , que representa os resíduos dispostos anualmente, depende da taxa de crescimento populacional, geração *per capita* anual, porcentagem de RSU coletada e disposta

no aterro e número de habitantes atendidos pelo sistema. A multiplicação de todos esses fatores origina o valor de R_x , observe na Equação 6:

$$R_x = n_d \cdot i_{cp} \cdot a \cdot hab \cdot I_r \quad (6)$$

Nesse ponto, é necessário calcular a fração de carbono orgânico degradável (COD) presentes no RSU dado pela Equação 7 e baseado na composição do RSU e na quantidade de carbono em cada componente de massa de resíduo como apresentado em (IPCC, 2006). Na TAB. 2 abaixo, são encontrados os valores de COD para diferentes componentes do lixo.

Tabela 2- Teor de carbono orgânico degradável para cada componente do RSU

Componente	Porcentagem COD (em massa)
A) papel e papelão	40
B) resíduos de parques e jardins	17
C) restos de alimentos	15
D) tecidos	40
E) madeira	30

Fonte: (BIRGEMER; CRUTZEN, 1987).

$$COD = (0,40 \cdot A) + (0,17 \cdot B) + (0,15 \cdot C) + (0,40 \cdot D) + (0,30 \cdot E) \quad (7)$$

Para o presente estudo foram adaptados os valores de porcentagem de COD da seguinte forma: B, D e E foram associados em diversos e seus valores correspondem à média aritmética desses três tipos de resíduos.

Em seguida calcula-se a COD_f , ou seja, fração de COD dissociada, que indica a fração de carbono que é disponível para decomposição bioquímica (CRUTZEN; BIRGEMER, 1987) e calculada pela Equação 8.

$$COD_f = 0,014 \cdot T + 0,28 \quad (8)$$

O potencial de geração de metano (L_0) é necessário para o cálculo da produção de metano podendo ser obtido pela metodologia apresentada em IPCC (1996), que segue a Equação 9.

$$L_0 = FCM \cdot COD \cdot COD_f \cdot F \cdot (16/12) \quad (9)$$

O fator de correção do metano (FCM) varia em função do tipo de local, de acordo com CETESB/SMA (2003). De acordo com (IPCC, 2006) são definidas quatro categorias de locais de acordo com a TAB. 3 abaixo:

Tabela 3- Valores para o FCM

Tipo de local de disposição	FCM
Lixão	0,4
Aterro Controlado	0,8
Aterro Sanitário	1,0
Locais sem categoria	0,6

Fonte: (IPCC, 2006).

A magnitude de L_0 estimada a partir da equação 28 está em base mássica [kg de CH_4 /kg de RSU] e para se obter a conversão para base volumétrica [m^3 biogás/t RSU] deve se dividir o valor de L_0 obtido por $0,0007168 \text{ t/m}^3$ ($0,7168 \text{ kg/m}^3$) que é a massa específica do metano.

É preciso salientar que para a opção de geração de eletricidade através de biogás de aterro sanitário optou-se pelo emprego de motores de combustão interna (MCI) do ciclo Otto, baseado na operação com biogás. Dessa forma, a potência nominal do motor será menor que a potência real uma vez que o PCI do gás natural é maior do que o PCI do biogás de aterro, ou em outras palavras, há que se corrigir o consumo do motor considerando as perdas devido ao menor PCI do biogás. Os dados de desempenho do MCI na condição nominal (padrão) são apresentados na TAB. 4 que segue.

Tabela 4 - Dados energéticos aterro

Dados energéticos	Valor
Eficiência elétrica + %perdas	20%
Produção de biogás no aterro	20 anos
Vida útil do MCI	10 anos
Fator de capacidade	90%

Fonte: Elaboração própria.

O custo específico de O&M para a produção de eletricidade em MCI de acordo com (LENSU et al, 2004) é de R\$0,0286 por kWh. O custo de O&M para a produção de energia elétrica pode ser estimado pela Equação 10 descrita abaixo:

$$C_{O\&M_{el.}} = C_{e_{O\&M_{el.}}} \cdot US\$ \quad (10)$$

O cálculo da potência real para a instalação pode ser calculado pela Equação 2.11 abaixo:

$$W_{REAL,MCI} = W_{NOMINAL,MCI} \cdot (1 - \%perdas) \quad (11)$$

É necessário considerar o valor do dinheiro no tempo para isso torna-se necessário o cálculo do fator de capitalização expresso pela Equação 2.12. Na realidade, este valor expressa a taxa paga anualmente pelo investimento da planta, considerando sua vida útil e os juros de mercado.

$$f_c = \frac{i \cdot (1+i)^t}{(1+i)^{t-1}} \quad (12)$$

Para base de muitos cálculos devem ser estimadas as horas de operação anuais da planta em consideração. Esta estimativa de horas pode ser calculada pela Equação 13.

$$h_{op.} = n_{dias} \cdot h_{dia} \cdot f \quad (13)$$

O PCI do biogás pode ser calculado pela Equação 14 considerando o PCI do metano e a percentagem do mesmo presente no biogás.

$$PCI_{biogas} = 4,18 \cdot p_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4} \quad (14)$$

O consumo real estimado do combustível (biogás) pelo motogerador pode ser calculado pela Equação 15:

$$C_{REAL} = \frac{W_{REAL,MCI}}{PCI_{biogas}} \quad (15)$$

O consumo específico real de combustível é calculado pela Equação 16 abaixo descrita:

$$C_{ESP,REAL} = 3600 \cdot \frac{C_{REAL}}{W_{REAL,MCI}} \quad (16)$$

O custo específico de geração de energia é composto, segundo (FEAM, 2012), pelos custos de tratamento do gás, compressão do gás, motogerador, preparação do local e interligação com a rede elétrica. O custo para a geração de energia elétrica pode ser calculado pela Equação 17.

$$C_{ger.} = C_e \cdot W_{NOMINAL,MCI} \quad (17)$$

Aterros sanitários são empreendimentos cuja vida útil deve gerar recursos suficientes para as obras de encerramento, e para um longo período sem receitas realizando tratamento de percolados, monitoramento ambiental e geotécnico, manutenção das instalações, custo específico de pré-implantação, implantação, operação, encerramento e pós-encerramento.

Para se obter a estimativa dos custos de implantação, manutenção e operação, encerramento e monitoramento pós-encerramento do aterro torna-se necessário o conhecimento da estimativa da massa de RSU disposta no aterro durante toda sua vida útil, que poderá ser expressa pela Equação 18.

$$M_{RSUtotal} = \frac{M_{RSU}}{1000} \cdot n_{dias} \cdot t \quad (18)$$

Os valores dos custos específicos para cada fase da vida útil do aterro são imprescindíveis para a formação dos custos totais para este tipo de empreendimento. Para tanto esses custos estão apresentados na TAB. 6 abaixo:

Tabela 6 - Custos específicos para cada fase da vida útil do aterro sanitário

Porte do aterro	Grande porte	Médio porte	Pequeno porte
Custo médio por tonelada [R\$/t _{RSU}]	36,01	40,50	71,84
I. Pré-implantação	0,28	0,39	0,83
II. Implantação	1,24	1,57	3,66
III. Operação	31,61	35,36	62,29
IV. Encerramento	0,44	0,56	0,67
V. Pós-encerramento	2,44	2,62	4,40

Fonte: (FGV, 2009).

De acordo com os dados da tabela acima, é possível calcular os custos de cada fase da vida útil do aterro, pré-instalação, instalação, operação e manutenção, encerramento e pós-encerramento, respectivamente de acordo com as Equações 19 a 23 apresentadas a seguir:

- Pré-implantação:

$$C_{pre-imp.} = C_{e_{pre-imp.}} \cdot M_{RSUtotal} \quad (19)$$

- Implantação:

$$C_{imp.} = C_{e_{imp.}} \cdot M_{RSUtotal} \quad (20)$$

- Operação e manutenção:

$$C_{O\&M} = C_{e_{O\&M.}} \cdot M_{RSUtotal} \quad (21)$$

- Encerramento:

$$C_{enc.} = C_{e_{enc.}} \cdot M_{RSUtotal} \quad (22)$$

- Pós-encerramento:

$$C_{pós-enc.} = C_{e_{pós-enc.}} \cdot M_{RSUtotal} \quad (23)$$

O custo total do empreendimento pode ser obtido pela soma dos valores obtidos nas equações 22 a 26 de acordo com a Equação 24.

$$C_{total} = C_{pre-imp.} + C_{imp.} + C_{O\&M} + C_{enc.} + C_{pós-enc.} \quad (24)$$

O investimento inicial do aterro deve ser anualizado para sua entrada no fluxo de caixa a fim de que se considere a valorização do dinheiro no decorrer do tempo. Isso pode ser calculado através da Equação 25.

$$I_a = f_c \cdot I_{in.} \quad (25)$$

Custo de O&M do motogerador pode ser calculado pela Equação 26.

$$C_{O\&M a(MCI)} = W_{NOMINAL, MCI} \cdot C_{eMCI} \cdot h_{op} \quad (26)$$

O custo operacional anual até o décimo ano de operação do aterro pode ser obtido pela Equação 28.

$$C_{O\&M} = C_{O\&M a(MCI)} + I_a + C_{O\$Materro} \quad (28)$$

A partir do décimo primeiro ano de operação do aterro o seu custo operacional passa a ser calculado pela Equação 29, devido ao término do pagamento do motogerador.

$$C_{O\&M} = C_{O\&Materro} + I_a \quad (29)$$

No vigésimo terceiro mês de operação deverá ser inserido a despesa de encerramento do aterro e a primeira parcela da despesa de pós-encerramento do mesmo. O custo de operação e manutenção do aterro neste mês será calculado pela Equação 30.

$$C_{O\&M} = C_{enc} + C_{pós} + I_a \quad (30)$$

A partir do vigésimo quarto ano de operação do aterro até o quadragésimo segundo ano a despesa de manutenção e operação do aterro deverá ser com a parcela de investimento anualizado acrescido da despesa de pós-encerramento, que pode ser calculada pela Equação 31.

$$C_{O\&M} = C_{pós} + I_a \quad (31)$$

As rendas obtidas com a implementação do projeto de aterro sanitário são aqui designadas como: R_1 é a renda com tratamento (disposição) de RSU; R_2 é a renda com a venda de energia elétrica e R_3 é a renda com a venda de material reciclável que podem ser calculadas através das equações 32, 33 e 34, respectivamente:

$$R_1 = M_{RSUdiaria}/1000 \cdot v \cdot nh_{ano}/nh_{dia} \quad (32)$$

A receita com a venda de energia elétrica poderá ser obtida pela Equação 33:

$$R_2 = W_{INST,INC} \cdot (0,086 \cdot h_{ano} \cdot p_1 + 0,914 \cdot h_{ano} \cdot p_2) \quad (33)$$

A renda estimada pela venda de materiais recicláveis é composta pelo somatório da renda obtida pela venda de cada componente reciclável e aqui apresentada sob duas perspectivas como já comentado: tratamento não integrado no qual o material reciclável não receberá nenhum tipo de beneficiamento e em consequência, apresentará menor valor monetário de mercado e modalidade integrada de tratamento onde o material passará por processo de beneficiamento, sendo mais valorizado economicamente. Na TAB. 7 seguintes são apresentados os valores de venda para os materiais recicláveis com beneficiamento e sem beneficiamento:

Tabela 7- valor de venda de materiais recicláveis

Material	Valor de venda [R\$/t]	
	sem beneficiamento	beneficiado
Papel/ papelão	400	440
Plástico	3.144	4.000
Vidro	90	130
Alumínio	3.000	6.240
Metais ferrosos	420	672

Fonte: (CEMPRE, 2012).

A renda de cada componente reciclável poderá ser estimada pela Equação 34:

$$R_y = M_y \cdot v_y \cdot nd_{ano} \cdot /1000 \quad (34)$$

O valor de y assumirá as denominações apresentadas na TAB. 8 abaixo:

Tabela 8-Materiais presentes no RSU

Y	Componente
A	Papel/papelão
B	Plástico
C	Vidro
D	Metais ferrosos
E	Alumínio

Fonte: Elaboração própria.

O valor total de renda obtida com a venda de material reciclável será estimado pela Equação 35:

$$R_3 = R_A + R_B + R_C + R_D + R_E \quad (35)$$

Os créditos de carbono originados no aproveitamento energético de RSU geram receitas que podem, muitas vezes, tornar o projeto de geração de energia economicamente viável (FEAM, 2012). Na TAB. 9 são apresentadas as emissões evitadas a partir da tecnologia de aproveitamento do gás do lixo (GDL).

Tabela 9- Emissões evitadas pelo aproveitamento do GDL

Emissões evitadas	Gás do lixo (GDL) [tCO₂eq/MWh]
Emissão evitada pelo consumo de RSU	5,41
Emissão evitada pela substituição do gás natural	0,45
Emissão evitada total	5,86

Fonte: (FEAM, 2012).

A receita gerada pela implementação do MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) é um incentivo para melhoria de tecnologias e avançar na questão da gestão adequada de RSU em municípios brasileiros. A renda proveniente dos créditos de carbono, R_4 , pode ser estimada empregando-se a Equação 36 com ressalva de que a variável, E_e (emissão específica evitada), assumirá o valor específico para a tecnologia de aproveitamento do GDL mostrado na TAB. 9 (5,86 [t_{co2eq}/MWh]).

$$R_4 = E_e \cdot E_p \cdot v_{cc} \cdot US\$ \quad (36)$$

A receita total será a soma de todas as receitas obtidas, que por sua vez pode ser obtida pela Equação 37.

Sendo o aterro sanitário um empreendimento peculiar torna-se necessária uma análise mais acurada de seus custos e rendas. Tal análise foi feita levando em consideração os custos contraídos e receitas nas diversas fases da vida útil do aterro, conforme (FEAM, 2012). A capacidade de 800 t/dia para aterro de médio porte (consórcio de municípios) de deposição de RSU municipais sendo os dados obtidos de (FGV, 2009).

A análise econômico-financeira do empreendimento foi realizada através da utilização das ferramentas de engenharia econômica (análise de viabilidade de projetos de investimento), taxa interna de retorno (TIR) e valor presente líquido (VPL) implementada em planilhas eletrônicas de cálculo.

3 CASO DE ESTUDO

Conforme FEAM (2012), consórcios intermunicipais são associações entre municípios de um mesmo estado ou de mais de um estado para execução e gestão de programas e serviços comuns, regulamentadas em lei e respeitadas a autonomia de cada ente envolvido. Um dos objetivos dos consórcios é viabilizar a gestão pública nos espaços metropolitanos em que a solução de problemas comuns pode ser dada somente por meio de políticas e ações conjuntas. O consórcio também permite que pequenos municípios ajam em parceria e, com o ganho de escala, melhorem a capacidade técnica, gerencial e financeira.

Para este caso de estudo foram adotadas informações de um possível consórcio a ser formado pelas cidades: Cláudio, Itapeverica, Oliveira, Carmo da Mata, São Francisco de Paula, Camacho, Pedra do Indaiá, Carmo do Cajuru, Divinópolis, Santo Antônio do Monte, São Sebastião do Oeste, Itaguara, Arcos, Formiga, Crucilândia, Conceição do Pará, Araújos e São Gonçalo do Pará atendendo em um total de 545.863 habitantes.

A produção *per capita* de resíduos sólidos para o consórcio, segundo FEAM (2012) é, em média, 0,8 kg/hab.dia totalizando a produção de 436.690 kg/dia. A massa de RSU produzida varia de acordo com as composições gravimétricas calculadas para os distintos cenários apresentados 2 e os valores para tais massas então apresentados na TAB. 10.

Tabela 10 - Produção de RSU para 1º, 2º e 3º cenários

Componente	1º cenário [kg/dia]	2º cenário [kg/dia]	3º cenário [kg/dia]
Papel e papelão	39.302	21.262	0
Plástico	34.935	29.485	0
Vidro	13.101	11.922	0
Metais ferrosos	14.847	11.737	0
Alumínio	2.620	366	0
Matéria orgânica	288.216	288.216	288.216
Diversos	43.669	43.669	43.669
Total RSU	436.690	406.657	331.885

Fonte: Elaboração própria.

A parcela de recicláveis nos resíduos dos municípios que sinalizaram participação no consórcio somam 24% do peso total, sendo que 66% do peso total representa a fração de matéria orgânica.

Conforme situação relatada na Fundamentação teórica deste trabalho, os municípios que sinalizaram participação no consórcio intermunicipal a ser formado com finalidade de gerenciamento do RSU não possuem um sistema adequado de destinação final de seus resíduos sendo necessária a construção de aterro sanitário com recuperação energética seja por aproveitamento do gás de aterro ou por incineração de seus resíduos.

4 RESULTADOS

O potencial energético para a tecnologia de aterro sanitário dos RSU do consórcio foi avaliado levando em consideração as possibilidades de geração de energia elétrica e reciclagem. Sendo que nesta hipótese, aqui apresentada refere-se a um possível projeto de construção de um novo aterro sanitário. Para tal levou-se em consideração:

Massa total de RSU acumulada no aterro considerando a quantidade e respectiva projeção de RSU coletada em um horizonte de 20 anos de funcionamento do projeto do novo aterro. A massa de RSU depositada no aterro para cada cenário adotado foi estimada e mostrada na TAB. 11 a seguir:

Tabela 11- Massa de RSU depositada no aterro ao fim de 20 anos de funcionamento

Cenários adotados	Massa de RSU depositada no aterro sanitário [t]
Sem segregação	3.187.839
Segregação parcial	2.968.593
Segregação total	132.754

Fonte: Elaboração própria

Para a análise desta tecnologia foram consideradas as seguintes hipóteses:

- **Início do aproveitamento energético do aterro:** imediato, a partir das condições mínimas exigidas;
- **Composição do gás produzido no aterro:** metano 60%; CO₂ e outros gases 40%;

- **Disponibilidade dos equipamentos de geração de energia elétrica** fator de capacidade de 90%, já contempladas a estimativa dos períodos de parada por manutenção programada e defeitos.

Para o cálculo do potencial de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do biogás gerado no aterro sanitário foram adotadas premissas:

- Recuperação do biogás para utilização energética 100% do volume total produzido e
- Rendimento da transformação de energia térmica em energia elétrica: 20%.
- Cada uma das rotas tecnológicas apresenta eficiências individuais em termos de redução adicional de emissão de gases de efeito estufa, em cada tecnologia a quantidade de lixo consumida evita uma quantidade específica de emissões No Brasil, a grande maioria dos projetos implantados utiliza o biogás de aterro como fonte geradora de energia. Na TAB. 12 estão registradas as emissões evitadas para a tecnologia de aproveitamento de biogás de aterro, para o projeto hipotético de aterro a ser implantado para o consórcio de municípios.

Tabela 12 – Emissões evitadas tecnologia de aproveitamento de biogás de aterro

Cenários adotados	Custo total anual [tCO₂eq]
Sem segregação	33.695
Segregação parcial	29.511
Segregação total	23.692

Fonte: Elaboração própria

Para um melhor entendimento do estudo se faz necessária a distinção entre as duas modalidades de aterro sanitário, a saber: não integrada e integrada.

a) Planta não integrada

A planta não integrada não apresenta custo com usina de reciclagem, a rentabilidade com a comercialização de materiais recicláveis é menor devido ao não beneficiamento dos mesmos, além de outras variáveis que se diferem entre uma modalidade e outra de aterro. Na TAB. 13 estão apresentados os potenciais de geração de biogás para o aterro não integrado.

Tabela 13 - Potencial de geração de biogás para aterro não integrado – consórcio

Cenários adotados	Não - integrada
	Potencial de geração de biogás [m/ano ³]
Sem segregação	5.351.558
Segregação parcial	4.686.189
Segregação total	3.763.733

Fonte: Elaboração própria.

O poder calorífico do biogás “in natura” é cerca de 29.938 kJ/kg. Pode-se calcular que, desconsiderados os aspectos econômicos que possam determinar a viabilidade da geração, as máximas potências instaláveis para geração de energia elétrica a partir do aproveitamento do gás de lixo estão apresentadas na TAB. 14:

Tabela 14 - Potência do MCI, potência real do MCI e energia elétrica produzida

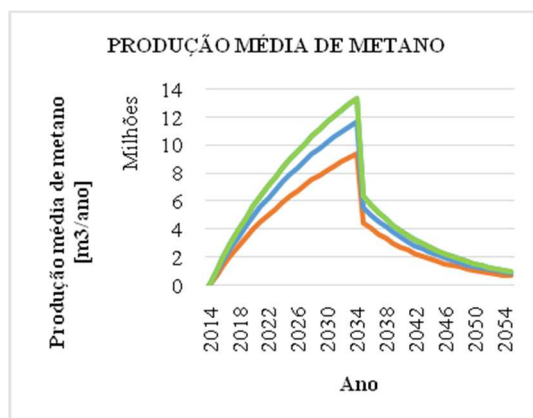
Cenários adotados	Não - integrado		
	Potência nominal do MCI kW	Potência real kW	Energia elétrica produzida MWh/ano
Sem segregação	910,12	728,09	5.740
Segregação parcial	797,10	637,68	5.027
Segregação total	639,92	511,94	4.036

Fonte: Elaboração própria

Assumindo, por hipótese, que a geração de energia elétrica com o gás de lixo se justifica tecnicamente a partir de um fator de capacidade médio anual de pelo menos 20% (para o presente estudo 90%), calcula-se que a vida útil do projeto de geração seria de 20 anos.

A produção de biogás (ou de metano) para Consórcio aterro não integrado, no vigésimo ano de operação atinge seu ápice comportando-se de acordo com as curvas indicadas no gráfico da FIG. 34, onde a linha verde representa o cenário sem segregação de materiais recicláveis, a linha azul representa o cenário de segregação parcial de recicláveis e a linha vermelha o cenário de segregação total de recicláveis.

Figura 3 - Comportamento de produção de metano Consórcio para os cenários estudados (não integrado)



Fonte: Elaboração própria

A seguir estão apresentados, na TAB. 15 os custos gerais do empreendimento para implantação, manutenção, encerramento e pós- encerramento para aterro sanitário não integrado – consórcio.

Tabela 15 - Custos de geração, pré-implantação, implantação, O&M, encerramento e pós-encerramento de aterro não-integrado – consórcio

Cenários adotados	Custo total de geração [R\$]	Custo com pré-implantação [R\$]	Custo de pós-encerramento [R\$]
Sem segreg.	2.621.131	1.243.257	8.352.141
Segregação parcial	2.295.645	1.157.751	7.777.713
Segregação total	1.842.983	51.774	347.815
Custo com implantação [R\$]	Custo O&M [R\$]	Custo de encerramento [R\$]	
5.004.909	112.722.020	1.785.190	
4.660.691	104.969.449	1.662.412	
208.423	4.694.177	74.342	

Fonte: Elaboração própria.

Na TAB. 16 estão sendo mostrados o investimento inicial e o custo total do empreendimento para implantação, manutenção, encerramento e pós- encerramento para aterro sanitário não integrado – Consórcio.

Tabela 16 – Investimento inicial e custo total aterro não integrado consórcio

Cenários adotados	Investimento inicial R\$	Custo total R\$
Sem segregação	8.869.297	131.728.648
Segregação parcial	8.114.087	129.731.780
Segregação total	2.103.180	32.372.882

Fonte: Elaboração própria

Os custos anualizados do empreendimento para implantação, manutenção, encerramento e pós- encerramento para aterro sanitário não integrado consórcio estão apresentados, na TAB. 17.

Tabela 17 - Custos anualizados para o aterro não integrado – consórcio

Cenários adotados	Inv. anual. [R\$/ano]	Custo O&M (MCI) [R\$/ano]	Custo O&M (aterro) [R\$/ano]	Custo de encerramento [R\$/ano] 23º ano	Custo pós encerramento [R\$/ano]	Custo total anual [R\$/ano]
Sem seg.	1.300.395	463.898	15.091.086	1.118.174	1.785.190	19.758.745
Seg. parcial	1.185.258	406.292	14.053.182	1.041.271	1.662.412	18.348.416
Seg. total	961.916	326.178	11.469.226	849.813	1.356.745	14.963.878

Fonte: Elaboração própria

Através da redução de emissões de gases de efeito estufa que seriam originadas na decomposição do lixo disposto em lixões ou aterros sem recuperação de metano, por substituir a necessidade de geração de energia a partir de fontes fósseis e outros fatores como localização da planta de aproveitamento energético, é possível obter créditos de carbono que geram receitas que podem tornar o processo de geração de energia economicamente viável. A cada tonelada de emissão de CO_{2eq} evitada corresponde a 1 crédito de carbono. As receitas estimadas para a planta não integrada de tecnologia de aproveitamento de biogás de aterro para consórcio estão apresentadas na TAB. 18.

Tabela 18 – Possíveis receitas para aterro não integrado consórcio

Cenários adotados	Receita com trat. de RSU R\$/ano	Receita com venda de eletr. R\$/ano	Receita com venda de rec. R\$/ano	Receita com crédito de carbono R\$/ano	Receita anual R\$/ano
Sem segregação	9.563.519	934.402	0	1.361.126	11.859.049
Segregação parcial	9.563.519	818.370	11.872.277	1.192.105	23.446.273
Segregação total	9.563.519	657.001	51.403.919	957.042	62.581.482

Fonte: Elaboração própria.

A economia anual para o aterro não integrado – Consórcio está apresentado na TAB.

19.

Tabela 19 - Economia anual aterro não integrado

Cenários adotados	Custo total anual [R\$/ano]	Receita anual R\$/ano	Economia anual R\$/ano
Sem segregação	19.758.745	11.859.049	-7.899.696
Segregação parcial	18.348.416	23.446.273	5.097.856
Segregação total	14.963.878	61.891.855	47.617.604

Fonte: Elaboração própria

b) Planta integrada

A modalidade de aterro sanitário integrado é aquela em que os materiais recicláveis são destinados ao processo de beneficiamento a fim de agregar valor aos mesmos. Por consequência, o empreendimento apresentará um custo adicional anual com usina de reciclagem. Mas, em contrapartida, os materiais recicláveis beneficiados apresentam um valor superior de mercado aumentando a renda a ser obtida.

Tabela 20 - Potencial de geração de biogás e metano para aterros integrado – consórcio

Cenários adotados	Integrada
	Potencial de geração de biogás [m ³]
Sem segregação	5.351.558
Segregação parcial	4.686.189
Segregação total	3.763.733

Fonte: Elaboração própria

As potências, nominal e real do MCI, assim como a energia elétrica produzida anualmente estão sendo mostradas na TAB. 21.

Tabela 21- Potência nominal do MCI, Potencia real do MCI e energia elétrica produzida

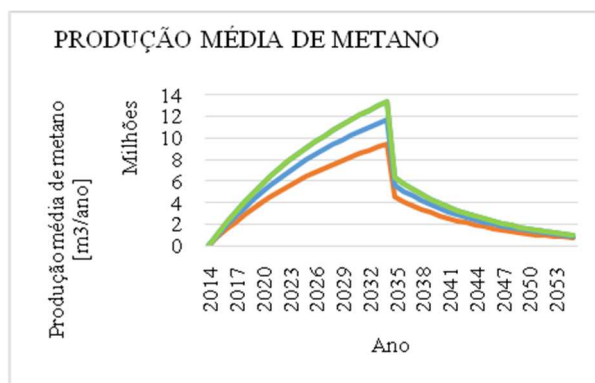
Cenários adotados	Não - integrado		
	Potência nominal do MCI [kW]	Potência real [kW]	Energia elétrica produzida [MWh/ano]
Sem segregação	910,12	728,09	5.740
Segregação parcial	797,10	637,68	5.027
Segregação total	639,92	511,94	4.036

Fonte: Elaboração própria

A quantidade de gás disponível para a geração é variável ao longo do tempo. De acordo com o *WasteModel* (IPCC, 2006), a produção anual de biogás calculada para o aterro sanitário do consórcio alcança seu valor máximo para o aterro no 20º ano de acumulação de RSU, decrescendo exponencialmente a partir daí uma vez cessada a deposição do lixo no aterro.

A produção de biogás (ou de metano) para consórcio, aterro não integrado, no vigésimo ano de operação atinge seu ápice comportando-se de acordo com as curvas indicadas no gráfico da Figura 2.4, onde a linha verde representa o cenário sem segregação de materiais recicláveis, a linha azul representa o cenário de segregação parcial de recicláveis e a linha vermelha o cenário de segregação total de recicláveis.

Figura 2 - Comportamento de produção de metano consórcio para os cenários estudados (integrado)



Fonte: Elaboração própria

A seguir estão apresentados, na TAB. 22 os custos gerais do empreendimento para implantação, manutenção, encerramento e pós- encerramento para aterro sanitário integrado – consórcio.

Tabela 22 - Custos de geração, pré-implantação, implantação, O&M, encerramento e pós-encerramento de aterro integrado – consórcio

Cenários adotados	Custo total de geração [R\$]	Custo com pré-implantação [R\$]	Custo com implantação [R\$]	Custo O&M [R\$]	Custo de encerramento [R\$]	Custo de pós-encerramento [R\$]
Sem segreg.	2.621.131	1.243.257	5.004.909	112.722.020	1.785.190	8.352.141
Segregação parcial	2.295.645	1.157.751	4.660.691	104.969.449	1.662.412	7.777.713
Segregação total	1.842.983	51.774	208.423	4.694.177	74.342	347.815

Fonte: Elaboração própria

Os custos anualizados do empreendimento para implantação, manutenção, encerramento e pós-encerramento para aterro sanitário integrado – consórcio estão apresentados, na TAB. 23.

Tabela 23 - Custos anualizados para o aterro integrado

Cenários adotados	Investimento anualizado [R\$/ano]	Custo O&M (MCI) [R\$/ano]	
Sem segregação	1.300.395	463.898	
Segregação parcial	1.185.258	406.292	
Segregação total	961.916	326.178	
Custo de encerramento [R\$/ano] 23º ano	Custo de encerramento pós [R\$/ano]	Custo com usina de reciclagem [R\$/ano]	Custo total anual [R\$/ano]
1.118.174	1.785.190	0	19.758.745
1.041.271	1.662.412	965.013	18.348.416
849.813	1.356.745	3.367.502	14.963.878

Fonte: Elaboração própria

Pode-se ainda destacar as possíveis receitas que poderão ser obtidas com os subprodutos da tecnologia do aterro sanitário, sendo que as mesmas poderão amortizar os investimentos empregados no empreendimento. Na TAB. 24 estão representadas as receitas para o aterro não integrado.

Tabela 24 - Possíveis receitas para aterro integrado

Cenário adotado	Receita com trat. de RSU [R\$/ano]	Receita com venda de El. [R\$/ano]	Receita com venda de rec. [R\$/ano]	Receita com credito de carbono [R\$/ano]	Receita anual [R\$/ano]
Sem seg.	9.563.520	934.402	0	1.361.126	11.859.049
Segr. parcial	9.563.520	818.370	16.808.073	3.528.021	30.717.985
Segr. total	9.563.520	657.001	67.548.415	957.042	78.725.979

Fonte: Elaboração própria

A economia anual para a tecnologia do aterro sanitário integrado está apresentada na TAB. 25.

Tabela 25 - Economia anual aterro integrado Consórcio

Cenários adotados	Custo total anual [R\$/ano]	Receita anual R\$/ano	Economia anual R\$/ano
Sem segregação	19.758.745	11.859.049	-7.899.696
Segregação parcial	18.348.416	30.717.985	11.404.555
Segregação total	14.963.878	78.725.979	73.921.926

Fonte: Elaboração própria

A energia economizada depende da produção e separação de materiais recicláveis. Sendo que os mesmos critérios de análise foram adotados tanto para a tecnologia de incineração quanto para o aproveitamento do biogás de aterro. Portanto, a economia de energia e de valor monetário para as tecnologias aqui analisadas coincidem em suas magnitudes. A economia de energia e valor monetário, relacionados à reciclagem na planta integrada para o Consórcio de municípios está apresentada na TAB. 26.

4 CONCLUSÃO

A alternativa de aproveitamento de gás de aterro gera 4.036 MWh/ano para o melhor cenário econômico (segregação total de materiais recicláveis-planta integrada). Pode-se concluir que o PCI dos resíduos coletados não satisfaz as condições técnicas mínimas de viabilidade sem a adição de um combustível adicional. Além do potencial de geração energética, também foi levado em consideração o tempo de retorno, que para esse tipo de empreendimento é de 0,06 anos com separação total de materiais recicláveis. A tecnologia de aproveitamento do gás de aterro também, neste caso, é a mais indicada, associada ao reaproveitamento dos materiais recicláveis. Para o empreendimento do consórcio há a possibilidade de economia de energia de valor em torno de 161 MWh/ano em que em valor monetário corresponde a uma economia de R\$26.253.028. Em termos ambientais, a tecnologia de aproveitamento de gás de aterro evita o despejo de 23.692 t CO_{2eq} na atmosfera.

Tabela 26 – Caracterização do aproveitamento energético do RSU Consórcio

Alternativa de planta integrada	Potência elétrica instalada [kW]	Energia gerada [MWh/ano]	Tempo de retorno [ano]
Aproveitamento de biogás Sem segregação	910	5.740	Não viável
Aproveitamento de biogás Segregação parcial	797	5.027	1,69
Aproveitamento de biogás Segregação total	640	4.036	0,06

Fonte: Elaboração própria

Entre as principais vantagens da formação dos consórcios intermunicipais, podem ser citadas as seguintes:

- ganhos de escala, pois quanto maior a população atendida, menores são os custos de manutenção da estrutura que presta esses serviços,
- maior facilidade encontrada na captação de recursos, tendo em vista que os consórcios, por representarem sempre grupos de municípios, são vistos como prioridades pelas fontes de recurso, e
- ampliação das receitas, visto que, no caso de consórcios intermunicipais de gestão de resíduos sólidos, há a possibilidade de obtenção de recursos a partir dos produtos resultantes da reciclagem e da compostagem, assim como do repasse de ICMS ecológico.

A produção de energia por meio de aproveitamento do gás de aterro vem de encontro a um problema surgido há pouco, a responsabilidade da iluminação pública dos municípios. A Constituição de 1988 definiu que a iluminação pública é de responsabilidade do município e permite a cobrança da Contribuição de Iluminação Pública (CIP). O artigo 218 da Resolução Normativa 414/2010 determinou cronograma de transferência. Municípios teriam até 15 de setembro de 2012 para assumir a iluminação pública. A pedido da Associação Mineira de Municípios, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aceitou prorrogar o período para que municípios pudessem ter maior conhecimento sobre o assunto. A Resolução 479, de 3 de abril de 2012, estabeleceu como prazo 31 de janeiro de 2014. Em audiência pública em dezembro de 2013, a ANEEL cede a novo pedido da AMM e o prazo é prorrogado para 31 de dezembro de 2014. A produção de energia partir de RSU poderia se mostrar como uma alternativa para suprir a demanda de energia para a iluminação pública

O aproveitamento energético do RSU não deve ser considerado como projeto convencional de geração de energia, em que se busca maximizar o retorno econômico e financeiro do investidor. Neste caso, o benefício principal é de outra natureza, e está intimamente ligado às questões socioambientais o aproveitamento energético do RSU deve ser considerado apenas como mais um elemento que poderá, sim, contribuir para a minimização do impacto ambiental gerado pela ação do homem. É nessa esfera que deve ser analisado.

REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2012**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2012.pdf>>. Acesso em: 5 set. 2014.
- CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo**. São Paulo: Humanitas, 1998. v. 2.
- CEMPRE. **Compromisso empresarial com a reciclagem**. 2012. Disponível em: <www.cempre.org.br>.
- CETESB/SMA. 2003. **Relatório Técnico nº 2 do convênio SMA/MCT nº 01.0052.00/2001 - aterros**. São Paulo, 2003.
- CRUTZEN, H. G.; BIRGEMER, P. J. The production of methane from solid wastes. **Journal of geophysical research**, v. 92, n. D2, 1987.
- EPA. U.S. Environmental Protection Agency. 2007. Disponível em: <www.epa.gov>.
- EPE. Documentos. **Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos de campo grande, MS**. 2008. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Documents/S%C3%A9rie%20Estudos%20de%20Energia/20081208_1.pdf>.
- EPE. **Plano Nacional de energia 2030**. 2007. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/20070626_1.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2014.
- FEAM. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para municípios de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2012.
- FGV. 2009. Disponível em: <<http://www.abetre.org.br/biblioteca/publicacoes/publicacoes-abetre/FGV%20-%20Aterros%20Sanitarios%20-%20Estudo.pdf>>.
- GASNET. Agência Minas e Energia Hoje/Sindcomb Notícias. **Biogás para Reduc em 2011**. Disponível em: <www.gasnet.com.br/conteudo/11291>.
- IBAM. Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. **Manual de gerenciamento integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2001.
- IBGE. 2012. Cidades. Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=314560&search=minas-gerais|oliveira>>. Acesso em: 26 set. 2014.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Waste model**. 2006. Disponível em: <www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/5_volume5/IPCC_Waste_Model.xls>.

LENSU, T.; ALANKANGAS, E. 2004. Disponível em: <http://s3.amazonaws.com/zanran_storage/www.catie.ac.cr/ContentPages/15882611.pdf>.

OLIVEIRA, L. B. **Potencial de aproveitamento energético de lixo e de biodiesel de insumos residuais no Brasil**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2004.

POLETTI FILHO, J. A. **Incineração de resíduos sólidos urbanos e geração de energia, aspectos energéticos e econômicos**. São Paulo: UNESP, 2009.

USEPA 2. **Energy Project Landfill Gas Utilization Software (E-Plus): user's manual**. USA, 1997.

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

PCI: poder calorífico inferior

Y: parcela do componente presente no RSU

Q_{INC} : potência térmica instalada

$M_{comp.}$: massa do componente produzida por dia

h_{dia} : horas de operação

E: eletricidade produzida anualmente

n_h : número de horas de operação anuais

R: relação energia gerada/massa de RSU tratada/ano

E: energia elétrica gerada anualmente

M_{RSUano} : massa de RSU tratada em um ano

C_e : custo específico

M_{RSU} : massa de RSU produzida diariamente

i_a : investimento anual

i: taxa de juros anual

v_r : valor residual

t : vida útil do equipamento

$O\&M_a$: custo operacional anual

$ce_{O\&M}$: custo específico O&M

n_d : número de dias de operação

C_R : custo anualizado com a usina de reciclagem

C_{eR} : custo específico com usina de reciclagem

M_{Rec} : massa de materiais recicláveis

n_a : número de dias de operação anuais

C_{aT} : custo anual total

C_R : custo anualizado com a usina de reciclagem

R_1 : renda com tratamento de RSU

v : valor monetário para o tratamento do lixo

nh_{ano} : número de horas trabalhadas por ano

nh_{dia} : número de horas trabalhadas por dia

R_2 : renda com a venda de eletricidade

p_1 : valor monetário de venda de energia elétrica (período de ponta)

p_2 : valor monetário de venda de energia elétrica (período fora de ponta)

R_y : renda obtida com a venda do componente reciclável

M_y : massa do componente produzida diariamente

v_y : valor de monetário de venda do componente reciclável

R_3 : renda total obtida com a venda de material reciclável

R_A : renda obtida com a venda de papel/papelão

R_B : renda obtida com a venda de plástico

R_C : renda obtida com a venda de vidro

R_D : renda obtida com a venda de metais ferrosos

R_E : renda obtida com a venda de alumínio

R_4 : receita com o crédito de carbono

US\$: cotação do dólar

v_{cc} : valor monetário do crédito de carbono

E_p : Energia elétrica produzida anual

R_T : receita anual total

E_a : economia anual;

R_T : renda total anual

C_T : custo total anual

T_R : tempo de retorno;

C_{aT} : custo anual total

E_{ec} : energia economizada na produção de bens a partir de material reciclável

M_{comp} : massa diária do componente produzida

E_{comp} : energia economizada por tonelada de componente

V_{ec} : valor monetário economizado na produção de bens a partir de materiais recicláveis

E_{ec} : energia economizada na produção de bens a partir de material reciclável

$V_{v.energia}$: valor monetário de venda de energia elétrica

Q_T : metano gerado no ano T

F: fração de metano no biogás

R_x : quantidade de resíduo depositado no ano x

K: constante de decaimento

L_0 : potencial de geração de biogás

T: ano atual;

x: ano de deposição do resíduo;

R_x : resíduo disposto anualmente no aterro

n_d : número de dias do ano

i_{cp} : taxa de crescimento populacional

a: produção de RSU *per capita*

hab: número de habitantes do municípios

I_r : índice de recolhimento de RSU

COD: carbono orgânico degradável

A: fração de papel e papelão no RSU;

B: fração de resíduos de parques e jardins no RSU;

C: fração de restos de alimentos no RSU:

D: fração de tecidos no RSU;

E: fração de madeira no RSU;

COD_f : fração de COD dissociada

T: temperatura na zona aeróbia

L_0 : potencial de geração de metano do RSU

FCM: fator de correção do metano

COD: carbono orgânico degradável

COD_f : fração em volume de metano no biogás

(16/12): fator de conversão de carbono em metano

$C_{O\&Mel}$: custo de operação e manutenção na produção de eletricidade

$C_{e_{O\&Mel}}$: custo específico de operação e manutenção na produção de eletricidade

US\$: taxa de câmbio

$W_{(REAL, MCI)}$: potência real do MCI operando com biogás do aterro

$W_{(NOMINAL, MCI)}$: potencia elétrica do motor na condição nominal

%perdas: fator de perda de potência ('derating') devido a substituição de combustível

f_c : fator de capitalização

i : taxa de juros

t : tempo de vida útil do projeto

$h_{(op.)}$: horas de operação anual

n_{dias} : número de dias trabalhados no ano

h_{dia} : número de horas trabalhadas no dia

f : fator de capacidade

$\langle PCI \rangle_{biogas}$: PCI do biogás

$p_{(CH_4)}$: percentual de metano no biogás

$\langle PCI \rangle_{(CH_4)}$: PCI do metano

C_{REAL} : consumo de combustível real (considera a operação com biogás)

$W_{(REAL, MCI)}$: potência real

$\langle PCI \rangle_{biogas}$: PCI do biogás

$C_{(ESP, REAL)}$: consumo de combustível real

C_{REAL} : consumo de combustível

$W_{(REAL, MCI)}$: potência real

$C_{(ger.)}$: custo de investimento de geração

C_e : custo específico de investimento de geração

$W_{(NOMINAL, MCI)}$: potência elétrica do motor na condição nominal

$M_{(RSU total)}$: capacidade total do aterro

n_{dias} : número de dias de produção de RSU

t : tempo de vida útil do aterro

$C_{(pre - imp.)}$: Custo de pré-implantação do aterro

$\langle Ce \rangle_{(pre - imp)}$: custo específico de pré-implantação

$C_{(imp.)}$: Custo de implantação do aterro

$\llbracket Ce \rrbracket_{imp}$: custo específico de implantação

$C_{(O\&M)}$: Custo de operação e manutenção do aterro

$\llbracket Ce \rrbracket_{(O\&M)}$: custo específico de operação e manutenção do aterro

$C_{(enc.)}$: Custo de encerramento do aterro

$\llbracket Ce \rrbracket_{(enc.)}$: custo específico de encerramento do aterro

$C_{(pós - enc.)}$: Custo de pós-encerramento do aterro

$\llbracket Ce \rrbracket_{(pós - enc.)}$: custo específico de pós-encerramento do aterro

C_{total} : custo total de investimento

I_a : investimento anualizado

f_c : fator de capitalização;

$I_{(in.)}$: investimento inicial do aterro

$C_{(O\&Ma(MCI))}$: custo de O&M do motor a combustão interna, anualizado

$W_{(NOMINAL, MCI)}$: potencia elétrica do motor na condição nominal

$\llbracket Ce \rrbracket_{MCI}$: custo específico de O&M do motor a combustão interna

h_{op} : número de horas de operação anuais

$C_{(op. aT)}$: custo operacional anual total

$C_{(O\&M. a(MCI))}$: custo de operação e manutenção do motor de combustão interna anualizado

$C_{(O\&Materrro)}$: custo de operação e manutenção do aterro

$C_{(O\&M)}$: custo de operação e manutenção

C_{enc} : custo de encerramento do aterro

$C_{pós}$: custo de pós- encerramento do aterro