

ANÁLISE DO CUSTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PELA UNIDADE DE DISPOSIÇÃO FINAL DE RSU DE MACAPÁ

Celso Costa Lima Verde Leal – celsolimaverde@hotmail.com

Alaan Ubaiara Brito – aubrito@unifap.br

Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Direito Ambiental e Políticas Públicas – PPGDAPP.

Alan Cavalcanti da Cunha – alancunha@unifap.br

Universidade Federal do Amapá, Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical - PPGBIO

Resumo. A geração de energia elétrica a partir do biogás, oriundo da decomposição anaeróbica dos resíduos sólidos de origem urbana (RSU), parece ser uma alternativa ambientalmente e economicamente viável onde a matéria prima está disponível. A presente pesquisa objetiva preencher uma lacuna de conhecimento aplicado na área, utilizando-se de um estudo de caso para o Estado do Amapá. O objetivo é analisar a viabilidade econômica de um sistema a partir da quantificação de parâmetros estimados, como custo de manutenção e operação, custos de investimentos, crédito de carbono, capacidade de geração, considerando três cenários temporais e econômicos da aplicação de MDL para o Estado do Amapá. Inicialmente foi realizada a estimativa do volume de formação de biogás na unidade de disposição final de RSU de Macapá para identificar eventual capacidade de geração de energia elétrica em usina a ser instalada para aproveitamento do biogás. Em seguida, foi estimado o custo de instalação e manutenção da usina de geração e estruturas anexas nas dimensões definidas para cada cenário idealizado. Da análise dos resultados, foi possível perceber que projetos de curta duração (7 anos) se mostram pouco atrativos, diante do pouco tempo para incorporação do investimento inicial. Por sua vez, projetos com usinas mais potentes (3MW) resultam em um alto valor final da energia diante do maior investimento na usina de geração e do sistema de captação. Também foi possível comprovar que as receitas do MDL favoreceram em quase todos os ambientes o valor de geração da energia elétrica e que a contribuição do MLD é diretamente proporcional ao tamanho do projeto, sendo que em projetos pequenos (usinas de geração de baixa potência) são de menor importância diante do custo de sua administração.

Palavras-chave: Energia Elétrica, Custo de Geração, Biogás.

1. INTRODUÇÃO

A tendência de aumento da demanda de energia elétrica é mais um paradigma econômico e ambiental global. Por esta razão o desenvolvimento de novas tecnologias e o aproveitamento de fontes alternativas é uma necessidade estratégica de vários países. E esta situação não é diferente no Brasil que, apesar de gerar maior parte de sua energia elétrica de hidroelétricas, ainda mantém taxas elevadas de emissões de gás carbônico (Santos Filho, 2010).

Em nível mundial, projetos de aproveitamento do biogás são utilizados para geração de energia elétrica. Por exemplo, a crise do petróleo em 1973 desencadeou diversas pesquisas na América do Norte, Suíça, Alemanha e Grécia sendo que, apenas nos Estados Unidos, foram instaladas mais de sessenta unidades, com fundos do governo americano e de empresas privadas ligadas ao uso do gás ou à exploração de recursos energéticos alternativos, entre eles os Aterro de Monterey Park (112.000 m³/ dia de CH₄), de San Fernando (100.000 m³/ dia), de Liosia – Atenas – Grécia (192.000 m³/ dia) (Vanzin, 2006).

Entretanto, a busca por fontes alternativas de energia sempre esbarrou no custo dessas fontes em relação à energia hidroelétrica. Apesar disso, especificamente no Brasil, a crise energética de 2001 deu novo impulso na aplicação de novas fontes, dentre as quais o aproveitamento do biogás decorrente da decomposição anaeróbica de lixo orgânico das unidades de disposição final de RSU. O uso desta tecnologia, além de trazer benefícios ambientais, permite a destinação adequada dos RSU, apresentando vantagens financeiras relativamente valiosas, sobretudo se enquadrada como um projeto de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) (MCT, 2009).

O MDL foi criado na Conferência de Quioto como uma alternativa para financiar projetos que objetivem a redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE). No caso, a redução das emissões provem da queima de biogás resultante do processo de decomposição anaeróbica dos RSU, composto por aproximadamente 50% (cinquenta por cento) de gás metano, para geração de energia elétrica. O produto financeiro final são os Créditos de Carbono que, após certificados, podem ser negociados, resultando em receitas adicionais para o empreendimento (Vanzin, 2006).

A geração de biogás nas unidades de disposição final de RSU no Brasil é significativa, sendo estimada em 677 Gg sob uma densidade de 0,716 kg/m³. Estes valores representam 945 milhões de metros cúbicos por ano (Vanzin, 2006). Uma das grandes vantagens apontadas por Leite, Mahler e Brito Filho (2005) é a possibilidade de utilização de receitas oriundas do biogás do lixo para desenvolver a atividade de construção de aterros sanitários e recuperação de lixões e aterros controlados no país. Contudo, o uso desta tecnologia é algo ainda raro no Brasil, apesar de favorecer os meios para a melhoria da saúde humana e a qualidade geral do meio ambiente.

No Brasil diversos projetos já foram implantados, como no Aterro do Caju no Rio de Janeiro, financiado pela FINEP e desenvolvido pela COMLURB e pela CEG – Companhia Estadual do Gás do Rio de Janeiro (Leite, Mahler e Brito Filho, 2005). Um projeto como este poderia ser valioso para Estado do Amapá, sobretudo porque ainda não se encontra conectado ao Sistema Interligado Nacional.

Com efeito, antes da implementação de um projeto para aproveitamento energético dos RSU, é necessário estimar o custo de geração da energia elétrica da unidade de disposição final de RSU de Macapá, o que permitirá concluir pela viabilidade ou não do projeto.

2. RISCO DE DEPENDÊNCIA DE POUCAS FONTES ENERGÉTICAS E BENEFÍCIOS DO PROJETO

A dependência energética de poucas fontes de energia elétrica pode trazer graves riscos aos usuários. Um exemplo contundente é o que ocorreu durante a crise energética de 2001, resultante de baixos índices pluviométricos que afetou significativamente o sistema hidrelétrico brasileiro. A razão do problema foi o irregular funcionamento das hidroelétricas, forçando a população brasileira a conviver com meses de racionamento (Silveira e Guerra, 2001). Soma-se a isso a precária realidade do trato dos resíduos sólidos, outro problema nacional Abrelpe (2010). A produção de energia elétrica a partir do biogás proveniente da decomposição anaeróbica dos resíduos orgânicos, apesar de não ser uma solução definitiva para ambos, certamente irá amenizá-los.

Em termos energéticos o uso de resíduos orgânicos apresenta menor custo relativo de geração. Do ponto de vista ambiental os benefícios vão da adequada disposição dos RSU até a mitigação das emissões de GEEs (Pierobon, 2007). Na composição do biogás gerado pela decomposição da matéria orgânica constante no lixo urbano estão presentes quantidades variáveis de CO_2 , CH_4 , H_2O , H_2S e mercaptanos, sendo o metano (CH_4) o mais importante, por apresentar potencial combustível e causar danos de efeito estufa na proporção de 21:1 em relação ao CO_2 (Vanzin, 2006). Portanto, a emissão de uma tonelada de metano equivale a 21 toneladas de carbono. Por este motivo a utilização do CH_4 como combustível reduz em 21 vezes os efeitos negativos ao ambiente, pois o CO_2 é um gás bem menos prejudicial ao efeito estufa.

A diferença entre a quantidade de emissões de carbono equivalente resultante da liberação direta do metano para a atmosfera e as emissões resultantes das emissões de carbono após a queima do CH_4 resulta em Créditos Equivalentes de Carbono (CEC). Após a devida certificação os CECs poderão ser negociados, gerando receita extra que beneficiaria o sistema de aterro sanitário de Macapá (Vanzin, 2006).

3. SISTEMA ISOLADO E O ESTADO DO AMAPÁ

O Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro possui tamanho e características que o distingue de qualquer outro no mundo, sendo um sistema de produção e transmissão de energia elétrica hidrotérmica de grande porte, com predominância de usinas hidrelétricas de múltiplos proprietários (De Deus, 2008). Como usinas hidrelétricas são construídas em espaços onde melhor se aproveitam as aflúências e os desníveis dos rios, normalmente distantes dos centros de consumo, há a necessidade de um robusto sistema de transmissão, somado às variações climáticas e hidrológicas do país (Souza *et al.*, 2009). Estas características geográficas e físicas podem gerar escassez ou excesso de energia em determinadas regiões, fazendo-se necessário a sua transmissão a longas distâncias. Um agravante a este problema foi protagonizado pela crise de energia que o país viveu no ano de 2001, quando da ocorrência de um evento de seca extrema, de certa forma já prenunciada por fontes de pesquisa meteorológica, foi o alibi governamental para um possível “apagão” de energia elétrica. O alibi, na realidade, encobriu a ausência de instrumentos de planejamento energético para o desenvolvimento do setor elétrico no país. Porém, a crise do setor deixou transparecer a carência de dados hidrometeorológicos e o estado de abandono do monitoramento hidrológico do país (Souza Júnior, 2006).

O SIN é integrado aos sistemas de produção e transmissão de energia elétrica de todo o Brasil, Regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e parte da Região Norte. Somente 3,4% da capacidade de produção de energia elétrica não estão interligados ao SIN (De Deus, 2008). Por sua vez, o conceito de sistema isolado se dá por exclusão, sendo todos aqueles que não estão interligados ao SIN e por consequência não podem realizar trocas de energia com os demais submercados (Souza *et al.*, 2009; Souza e Cunha, 2010; Souza Jr., 2006). É o caso do Estado do Amapá, que deveria estar interligado ao SIN desde o final de 2011, previsão inicial para conclusão das obras da linha de transmissão Tucuruí-Macapá-Manaus, que se encontra atrasada por problemas no licenciamento ambiental (De Doile e Nascimento, 2010).

Por ser parte de sistema isolado, o Estado do Amapá deve produzir toda energia elétrica consumida. Para isso se utiliza da UHE Coaracy Nunes, além das usinas termoelétricas UTE Santana, unidades geradoras contratadas de produtores independentes, que, além de poluentes, possuem alto custo operacional em relação às hidroelétricas, tornando imprescindível diversificar as fontes energéticas (Eletronorte, 2006).

Ocorre que o crescimento do consumo no Estado induz a ampliação das usinas termoelétricas, como ocorreu recentemente no ano de 2011. Este fato forçou o Ministério de Minas e Energia a autorizar a Companhia de Energia do Amapá (CEA) a alugar unidades geradoras com potência de 23MW, para atender a demanda de energia elétrica, tendo em vista a possibilidade de ocorrer um déficit na geração de energia elétrica de até 23MW no ano de 2011, podendo chegar a 29 MW em caso de um cenário hidrológico desfavorável (De Doile e Nascimento, 2010).

4. MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO (MDL)

O MDL foi criado na Conferência de Quioto, consistindo-se em “um instrumento pelo qual os países desenvolvidos podem investir em projetos em países em desenvolvimento, com a promoção de seqüestro de carbono, contabilizando redução em suas emissões” (Barreto, Freitas e Paiva, 2009). Trata-se de uma ferramenta original na arena internacional, projetada para lidar com o problema global de redução de GEEs prejudiciais ao sistema climático mundial (Thorne, 2001). Sua origem decorreu da recusa da proposta do Brasil para criação de um fundo de Desenvolvimento Limpo, formado com recursos financeiros dos países desenvolvidos que não cumprissem suas metas de redução de emissões de GEEs (MCT, 2009).

O MDL possibilita que os países desenvolvidos atinjam suas metas de redução das emissões de gases do efeito estufa (GEE) a partir do financiamento de projetos em países sem metas definidas pelo Protocolo de Quioto. Ou ainda pela compra de créditos de carbono de projetos que não financiem (Ruth, Worrell e Price, 2000). Entretanto, para receber os créditos, denominados de Unidades de Redução de Emissões de Carbono (RCE), é necessário comprovar uma redução adicional nas emissões de GEE em relação às que ocorreriam na ausência do projeto (UNFCCC, 1997). Além disso, o projeto deve resultar em benefícios reais, mensuráveis e de longo prazo, devendo também contribuir para o desenvolvimento sustentável no país onde o investimento for realizado (Thorne, 2001).

Este mecanismo permite que os países industrializados disponham de maior flexibilidade para atender as suas metas de emissões e, simultaneamente, transfiram tecnologia limpa para os países em desenvolvimento (UNFCCC, 1997). Segundo as regras do MDL, os projetos podem ter duração de 10 anos sem possibilidade de renovação ou de 7 anos com possibilidade de duas renovações (total de 21 anos). Desta forma, as receitas obtidas com a venda dos créditos de carbono podem ser abatidas dos custos de geração de energia elétrica, contribuindo para incentivar a utilização de fontes renováveis (UNFCCC, 1997).

5. DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DE MACAPÁ

O município de Macapá, assim como a maioria das cidades brasileiras, dava destinação inadequada aos seus resíduos sólidos (Funasa, 2006). Inicialmente, os RSU eram lançados na “lixeria pública de Macapá”, localizada a aproximadamente 200 metros da margem esquerda da BR-156, sentido Macapá-Oiapoque, no Km 14, distante 3,5 Km do Rio Matapi (oeste) e a 13 Km do Aeroporto Internacional de Macapá (sul). A área útil era de 104 ha, que não recebia qualquer tratamento, o que inevitavelmente contaminava o solo e a água. Após longas negociações, foi firmado o Termo de Ajustamento de Conduta (TAC) entre o Ministério Público do Estado do Amapá e o Município de Macapá. O objetivo era a adequação do manejo dos RSU em valas sépticas, tendo início o processo de transformação do lixo em aterro controlado nos termos do procedimento de licenciamento ambiental.

Atualmente, as características operacionais do aterro de Macapá tem evitado a contaminação do solo, água e ar próximos. Sua exploração teve início em 2007, quando já havia cerca de 653.214 t de resíduos, incluindo o entulho não orgânico, proveniente da lixeria pública de Macapá. Seu gerenciamento foi concedido pela Prefeitura Municipal de Macapá à concessionária Rumos Engenharia Ambiental Ltda., com exclusividade operacional e para implantação do aterro sanitário de Macapá, nos termos do Contrato nº 015/2008-PMM firmado em 2008, com período de vigência de 20 anos. Há uma alternativa de prorrogação por mais 5 anos. Sua capacidade máxima é de aproximadamente 465 mil t de resíduos, com previsão de fechamento do aterro para 2012, quando terá início a exploração da segunda célula, enquadrada como aterro sanitário. Esta última deverá operar até 2027, com possibilidade de prorrogação de mais 5 anos, conforme informações prestados pela administradora do aterro (MPF, 2011).

Atualmente o armazenamento dos RSU (domiciliar, comercial, feiras e varrição) realizado numa célula de aproximadamente 52.800 m². (220m x 240 m), impermeabilizada por meio de argila compactada e capacidade de aproximadamente 465 mil t. Por sua vez, os resíduos provenientes de serviço de saúde são depositados em uma célula com dimensões de 532 m² (28m x 19m) e capacidade de 908 t.

A Tab. 1 resume as características dos resíduos sólidos depositados no aterro, com a composição gravimétrica para o município de Macapá (%), sendo de grande importância para pesquisa, visto que, a formação do biogás em aterros sanitários é devido à degradação microbiana anaeróbia de resíduos orgânicos, ou seja, quanto maior a concentração de matéria orgânica no lixo, maior a produção de biogás.

Tabela 1. Composição gravimétrica do lixo doméstico de Macapá.

Fonte: MPF, 2011.

Componentes	Categoria	Massa (base úmida)	Umidade Típica	Massa de ref. (base seca - kg)
Restos de Alimentos	Rapidamente degradável	61,1	70	18,3
Papel, papelão	Rapidamente degradável	11,7	6	11,0
Têxteis	Lentamente degradável	*	10	-

Madeira	Lentamente degradável	*	20	-
Plástico	Não degradável (ou dificilmente)	15,5	2	15,2
Vidro	Não degradável (ou dificilmente)	2,3	2	2,3
Metais	Não degradável (ou dificilmente)	4,3	2	4,2
Outros	Não degradável (ou dificilmente)	5,1	5	4,8

6. ESTIMATIVA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS PELO ATERRO DE MACAPÁ

6.1 Biogás - geração e uso energético

Para desenvolvimento da pesquisa foi utilizado o Programa *Biogás Geração e Uso Energético* para estimar a geração de biogás no aterro de Macapá. O *software*, assim como o Manual do Usuário (CETESB, 2006), foi produzido com recursos do Programa Mudanças Climáticas Globais – “Plano Brasil de Todos” do Governo Federal, sendo ambos frutos dos Convênios “*Subsídios para a recuperação e uso energético de biogás gerado em estações de tratamento anaeróbico de efluentes – ETAE*”; e “*Subsídios para a recuperação e uso energético de biogás gerado em locais de disposição de resíduos sólidos – LDRS*”, firmados entre o Governo Federal e o Governo do Estado de São Paulo. O modelo matemático utilizado é o mesmo adotado pelo *United States Environmental Protection Agency* – USEPA para estimar a geração de metano nos aterros dos Estados Unidos.

6.2 Dados utilizados para estimativas

Para utilização do referido modelo matemático é necessário identificar a constante de decaimento ($0,001 < K_1 < 0,15 - \text{ano}^{-1}$ para reação de primeira ordem), temperatura, umidade e natureza do resíduo. Quanto mais úmido o ambiente maior será K_1 , portanto sendo favorecida por climas mais quentes e úmidos. Para definição de K_1 empregado, utilizou-se dos valores sugeridos pelo USEPA (1996) em função da umidade do ambiente. De acordo com Souza e Cunha (2010) e Souza et al., (2009) Macapá apresenta uma taxa de precipitação anual variável, normalmente entre 2300 a 2700 mm, com temperatura média de 25,9°C nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, período de menor temperatura, e com médias de 28,3°C em outubro, mês com temperaturas mais elevadas do ano. Sobre a umidade relativa do ar a variação encontra-se entre 88% em abril e 73% em outubro. O software sugere um valor de $K_1 = 0,08$, como o adequado para realidade de Macapá. Já o Potencial de Geração de Biogás (L_0) varia entre $0,001 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg}_{\text{RSD}}$, para resíduos pouco orgânicos, e $0,312 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{kg}_{\text{RSD}}$, para resíduos muito orgânicos (CETESB, 2006). Segundo a Tab.1 o lixo urbano de Macapá é formado por mais de 60% de matéria orgânica, o que resultou num valor de $L_0 = 0,12$. Para estimativa de geração de metano (Σqx) utilizou-se a quantidade real do fluxo de resíduos no aterro.

O horizonte de análise se iniciará a partir de 2012, considerando uma taxa de crescimento populacional e por consequência da geração de lixo. Para definir essa taxa foram utilizados dados do IBGE (2004) referentes ao estudo Tendências Demográficas. Segundo o estudo, Macapá, entre os anos de 1991 e 2000, apresentou taxa média geométrica de crescimento anual de 6,02%. A quantidade diária de lixo depositada no aterro em 2010 foi de 98.126,36 t. Se a taxa foi de 6,02% a.a., resultou em uma geração de 104.033,57 t/ano 285 t. diárias de resíduos sólidos só em 2011, ou seja, ano que antecede o início de exploração do aterro sanitário (condição inicial do problema).

6.3 Resultado de geração de energia elétrica

Para a taxa de vazão de biogás utilizou-se os valores sugeridos pelo software: linha de base (taxa de queima) de metano no aterro (20%); emissão de GEE evitada pela economia de energia elétrica gerada por fontes não renováveis (0,2782 tCO₂/MWh_{evit}); eficiência de coleta de CH₄ do aterro (75%); eficiência de queima do metano (95%). Identificou-se também a estimativa de índice de potência disponível e os valores de Potência (kW), Vazão (m³/h), Potência (MMBtu/h) (CETESB, 2006). Por fim, de posse dos dados, foi possível estimar a Potência Elétrica, levando em conta que a conversão da energia térmica do biogás para energia elétrica seria feita por meio de utilização de Grupo de gerador Otto nacional e taxa de rendimento de conversão energética de 20% (vinte por cento). Para definir a potências dos geradores empregados deve-se considerar o potência útil elétrica desejada. Durante o pico de geração de biogás, o aterro será capaz de gerar 4.215 kW, mas por apenas um ano. A Tab. 2 apresenta o resultado da estimativa de geração de biogás, utilizando os dados na forma acima informada. Nela são apresentados os valores de potência (KW), de vazão (m³/hora) e de potência (MMBtu/h), para cada ano, desde a abertura do aterro até o ano de 2052, data em que se estima a vida útil do aterro para produção de biogás.

Tabela 2. Taxa de vazão de biogás e potência no tempo para o aterro de Macapá.

Ano	Potência (KW)	Vazão M3/hora	Potência MMBtu/h	Ano	Potência (KW)	Vazão M3/hora	Potência MMBtu/h	Ano	Potência (KW)	Vazão M3/hora	Potência MMBtu/h
2012	895	102	3053	2026	13719	1566	46811	2040	11104	1268	37887
2013	1774	203	6054	2027	14814	1691	50548	2041	10250	1170	34974
2014	2644	302	9020	2028	15955	1821	54440	2042	9462	1080	32285
2015	3506	400	11964	2029	17145	1957	58501	2043	8735	997	29803
2016	4367	499	14901	2030	18389	2099	62746	2044	8063	920	27512
2017	5230	597	17844	2031	19692	2248	67191	2045	7443	850	25396
2018	6098	696	20807	2032	21058	2404	71852	2046	6871	784	23444
2019	6976	796	23804	2033	19439	2219	66328	2047	6343	724	21641
2020	7868	898	26846	2034	17944	2048	61228	2048	5855	668	19978
2021	8777	1002	29948	2035	16565	1891	56521	2049	5405	617	18442
2022	9707	1108	33123	2036	15291	1746	52175	2050	4989	570	17024
2023	10663	1217	36383	2037	14116	1611	48164	2051	4606	526	15715
2024	11647	1330	39742	2038	13030	1487	44461	2052	4252	485	14507
2025	12665	1446	43214	2039	12029	1373	41043				

7. DEFINIÇÃO DOS DADOS PARA ANÁLISE DO CUSTO DA ENERGIA

Para cálculo do custo da energia a ser gerado pela unidade de disposição final de RSU de Macapá foram identificadas as despesas do empreendimento ao longo de sua execução. Iniciou-se pela estimativa do custo de implantação da usina de geração e do sistema de captação e tratamento do biogás e de sua operação e manutenção. A partir desses dados, foi possível calcular o VPL (Valor Presente Líquido), o VPLa (Valor Presente Líquido Anualizado) e do custo da energia elétrica.

7.1 Estimativa de investimento inicial na usina de geração e sistema de captação e tratamento

O investimento inicial do projeto inclui a instalação da usina de geração e do sistema de captação do biogás. Estes valores são necessários para a estruturação do projeto. Logo seu desembolso se dá no primeiro ano. Para o valor da usina de geração, utilizou-se o método desenvolvido por Vanzin (2006) com base em estudos do Banco Mundial (2005). Estes estudos avaliaram a pré-viabilidade de recuperação do biogás e produção de energia nos aterros sanitários da Muribeca em Pernambuco, Gramacho no Rio de Janeiro, Montividéu, (Uruguai), Queretaro e Chihuahua (México), Huaycoloro (Peru), El Combeima, La Esmeralda, El Carrasco (Colômbia). A partir de então, foi criado um banco de dados com os respectivos valores dos orçamentos em geração de energia, infraestrutura de captação e coleta do biogás, capacidade de disposição de resíduos sólidos, referente a cada um dos aterros acima citados. Em seguida utilizou o software de inferência estatística – Sisreg Windows para gerar uma equação de estimativa do valor do investimento para a usina de geração. O resultado é obtido em milhões de dólares, com base na potência de geração (MW). Esse modelo é recomendado para usinas com potência de geração que varie entre 1 a 10 MW, com confiabilidade de 99%, conforme informado pelo próprio software (Vanzin, 2006), seguindo a equação 1 para cálculo do custo da usina.

$$Inv. U. G. (\text{milhões US\$}) = 0,08032049 + 0,9616 (\text{Potência (MW)}) \quad (1)$$

Conforme Banco Mundial (2004) o custo da usina de geração é de cerca de 40 a 60% do investimento inicial, sendo o restante referente ao sistema de coleta e tratamento do biogás. Para a presente análise, nos diversos cenários, o valor encontrado pela equação 1 corresponderá a 40% (pessimista), 50% (realista) e 60% (otimista) do investimento, ou seja, o restante será correspondente ao custo do sistema de captação e tratamento do biogás.

7.2 Custo de manutenção e operação

A análise dos custos de operação e manutenção foi baseada no mesmo trabalho de Vanzin (2006), que se utilizou de dados de projetos desenvolvidos e em operação nos Estados Unidos, disponíveis no Banco Mundial (2004). O valor do custo anual de manutenção e operação da usina de geração de energia elétrica é estimado em US\$ 0,018/kWh e o custo anual de manutenção e operação do sistema de coleta e tratamento do biogás corresponde a 5% (cinco por cento) do investimento em infraestrutura de coleta e captação do biogás (Vanzin, 2006). O Custo de registro, monitoração e verificação se refere ao registro do empreendimento como MDL e para monitoramento e verificação dos créditos a serem certificados, variando seu valor entre US\$ 25.000 a US\$ 40.000 por aterro sanitário ao ano (Vanzin, 2006). Para

estudo do custo de energia, foram adotados os valores de US\$ 25.000 (otimista), US\$ 32.500 (realista) e US\$ 40.000 (pessimista) nos diversos cenários.

Um custo adicional considerado na pesquisa foi o valor de compra do biogás. O valor adotado por Vanzin (2006) foi de US\$ 0,35/MMBtu. Na definição dos cenários, adotou-se os seguintes valores: US\$ 0,30 (otimista), US\$ 0,40 (realista) e US\$ 0,50 (pessimista) por MMBtu. Para efeitos de cálculos foi considerado apenas o valor de compra de biogás suficiente para manter a usina correspondente (1MW, 2MW ou 3MW).

7.3 Custo de manutenção do aterro não relacionado com a geração de energia elétrica

Todos os parâmetros estimados acima consideram apenas custos relacionados com a captação, processamento e utilização do biogás para geração de energia elétrica. Não se considerou o custo de manutenção do próprio aterro relacionado com a gestão do lixo no aterro, o que inclui seu transporte, cobertura, entre outros. Atualmente, esses custos no aterro de Macapá são de R\$ 2.069.145,91 por ano, conforme dados fornecidos pela Prefeitura Municipal de Macapá (MPF, 2011). Essas despesas foram acrescentadas ao custo de manutenção e operação da usina de energia elétrica nos cenários que considerarem a atividade de manutenção do aterro no cálculo do custo da energia elétrica.

7.4 Créditos de carbono

Para efeito de cálculo do valor da energia elétrica, abateu-se o valor que seria arrecadado com a venda dos créditos de carbono do custo com o projeto em cada ano. Isso foi feito para que a receita da venda dos créditos de carbono fosse considerada no cálculo do custo da energia elétrica. Ainda que em geral a venda de créditos de carbono ocorra de forma pontual, após acumulo de determinada quantidade pelo detentor do projeto, para efeitos de cálculos, foi considerada a venda do montante obtido após cada ano. Ou seja, presumiu-se que todo o crédito acumulado foi vendido no mesmo ano. Como o valor do crédito de carbono está sujeito a significativas variações de mercado, foi adotado como variável para os diversos cenários. Dessa forma, adotou-se três valores, para os respectivos cenários da seguinte forma: pessimistas (US\$ 8,00), realistas (US\$ 12,00) e otimistas US\$ 16,00).

8. CUSTO DE GERAÇÃO DA ENERGIA ELÉTRICA

Para cálculo do custo de geração da energia elétrica, inicialmente foi necessário calcular o VPL (Valor Presente Líquido) com base nos dados acima e na definição dos índices considerados nos respectivos cenários abaixo. Nesse cálculo, todas as receitas e despesas são calculadas no presente, o que facilita sua compreensão. Entretanto, como se busca definir no final o custo da energia, aqui as receitas foram desprezadas, salvo referente às vendas de CER, sendo analisadas apenas as despesas. Em seguida foi identificado o VPLa (Valor Presente Líquido Anualizado) e posteriormente o valor da energia elétrica gerada pelo projeto, dividindo o VPLa pela quantidade de energia gerada pela usina, dimensionada para os cenários com potências de 1MW, 2MW e 3MW.

9. CENÁRIOS PARA CÁLCULO DO VALOR DA ENERGIA ELÉTRICA

Os cenários elaborados foram distribuídos em três Ambientes, relacionados com as potências das usinas de geração de energia elétrica estimada para o projeto (1 MW, 2 MW e 3 MW). Para cada um desses cenários foram realizadas simulações de custos para projetos de 7, 14 ou 21 anos, conforme regras do MDL. Foram refeitas análises com exclusão das despesas e receitas decorrentes do MDL e, finalmente, incluindo os custos com administração do aterro. Para as análises foram consideradas as seguintes variáveis: investimento inicial na usina de geração e sistema de captação e tratamento; custo de manutenção e operação do sistema de coleta e controle do biogás; custo de registro, monitoração e verificação; depreciação; taxa de compra do biogás; valor de venda do crédito de carbono. Em todos os cenários se considerou um taxa de juros de 8% (oito por cento/a.a) do Banco Mundial para projetos de MDL.

No Ambiente 1, os cenários consideraram a instalação de uma usina de geração de 1 MW, com análise de projetos de 7, 14 e 21 anos. Por sua vez, no Ambiente 2, os cenários foram feitos considerando a instalação de uma usina de geração de 2 MW, sendo que somente foram estudados projetos de 7 e 14 anos, visto que o aterro somente poderia atender uma usina com potência 2 MW por no máximo 19 anos. No Ambiente 3 foi considerada a instalação de uma usina de geração de 3 MW, o que resultou em apenas um cenário para o projeto, com duração de 7 anos, já que o aterro somente poderia atender uma usina com potência 3MW por no máximo 9 anos. Por fim, foram feitas simulações com exclusão das receitas e despesas relacionadas ao MDL e com incorporação do custo de administração do aterro. Os resultados estão na Tab. 3, com análises otimistas, realistas e pessimistas para cada cenário.

Tabela 3. Valores do custo de geração de energia elétrica pelo projeto (US\$/MWh).

AMBIENTE 1									
Cenário	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
Duração(anos)	7	14	21	7	14	21	7	14	21
MDL	sim	sim	sim	sim	sim	sim	não	não	não
Custo Aterro	não	não	não	sim	sim	sim	não	não	não
Otimista	70,47	54,95	54,38	331,72	316,21	315,64	72,24	56,72	56,15
Realista	85,84	67,22	61,33	347,10	328,47	322,59	85,43	66,81	60,92
Pessimista	106,52	83,24	69,38	367,78	344,50	330,63	103,98	80,65	66,79
AMBIENTE 2						AMBIENTE 3			
Cenário	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	3.1	3.2	3.3
Duração(anos)	7	14	7	14	7	14	7	7	7
MDL	sim	sim	sim	sim	não	não	sim	sim	não
Custo Aterro	não	não	sim	sim	não	não	não	sim	não
Otimista	126,46	96,62	387,72	357,88	133,15	103,31	164,60	425,85	176,21
Realista	152,86	117,05	414,12	378,31	156,14	120,33	201,88	463,13	208,85
Pessimista	189,47	144,71	450,72	405,96	189,34	144,58	254,41	515,67	256,74

10. CONCLUSÃO

Da análise dos resultados, foi possível perceber que projetos de curta duração (7 anos) se mostram pouco atrativos, diante do pouco tempo para incorporação do investimento inicial. Por sua vez, projetos com usinas mais potentes (3MW) resultam em um alto valor final da energia diante do maior investimento na usina de geração e do sistema de captação e do pouco tempo para incorporação, visto que somente seria possível manter essa potência para projetos de 7 anos.

Também foi possível comprovar que as receitas do MDL favoreceram em quase todos os ambientes o valor de geração da energia elétrica e que a contribuição do MLD é diretamente proporcional ao tamanho do projeto, sendo que em projetos pequenos (usinas de geração de baixa potência) são de menor importância diante do custo de sua administração. Em relação à incorporação do custo de administração do aterro ao projeto, essa atitude torna o projeto não competitivo em todos os ambientes. De igual forma, percebeu-se que mesmo sem quadramento como MDL a geração de energia elétrica no aterro de Macapá ainda seria competitiva, sobretudo para pequenas usinas. Por fim, mostrou-se mais um projeto de MDL com uma usina 1 MW é o mais adequado e com duração de 14 ou 21 anos, sendo esta a que melhor atenderia a realidade do aterro de Macapá.

REFERÊNCIAS

- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - Abrelpe. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2010. Edição Eletrônica. Disponível em <<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em: 25 out. 2011.
- Barreto, L. V.; Freitas, A. C.; Paiva, L. C.. Sequestro de Carbono. Goiânia: Centro Científico Conhecer, 2009.
- Centrais Elétricas do Norte do Brasil – Eletronorte. Plano de Atendimento de Energia Elétrica. 2007 – 2016. Brasília. 2006.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental - Cetesb. Biogás, geração e uso energético. Manual do usuário do programa de computador. Versão 1.0. São Paulo, 2006.
- De Deus, M. L. D. Séries Temporais Aplicadas ao Planejamento da Operação do Sistema Interligado Nacional – SIN. 2008. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2008.
- De Doile, G. N. D.; Nascimento, R. L. Linhão de Tucuruí - 1.800 km de Integração Regional. T&C Amazônia, Ano VIII, Número 18, I Semestre de 2010.
- Fundação Nacional de Saúde - Funasa. Manual de Saneamento. Orientações Técnicas. Brasília – DF. 443 p. 2006.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Plano Nacional de Saneamento Básico (PNSB). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. (Org) Luiz Antônio Pinto de Oliveira. . Departamento de População e Indicadores Sociais 397 p. (2000).
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE.. Tendências Demográficas: Uma Análise dos Resultados da Amostra do Censo Demográfico 2000. Rio de Janeiro, 2004.

- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. Indicadores de Desenvolvimento Sustentável (IDS) Estudos e Pesquisas. (Org) Diretoria de Geociências Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais Coordenação de Geografia Celso José Monteiro Filho e Maria Luisa Gomes Castello Branco 443 p. (2010).
- Leite, L. E. H. B. C.; Mahler, C. F.; Brito Filho, L. F. Avaliação do potencial de receitas derivadas do biogás de aterro. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Campo Grande/MT. Anais. Campo Grande: ABES, 2005.
- Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT. O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo: Guia de Orientação 2009.
- Ministério Público Federal - MPF. Procuradoria da República no Estado do Amapá. Inquérito Civil Público nº 1.12.000.000610/2011-06, 2011.
- Pierobon, L. R. P. Sistema de Geração de Energia de Baixo Custo Utilizando Biogás Proveniente de Aterro Sanitário, 2007. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- Ruth, M.; Worrel, E.; Price, L. Evaluating Clean Development Mechanism Projects in the Cement Industry Using a Process-Step Benchmarking Approach, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, July 2000.
- Souza, E.B.; Cunha, A.C. Climatologia da precipitação no Amapá e mecanismos climáticos de grande escala. In: Cunha, A.C.; Souza, E.B.; Cunha, H.F.A.(Orgs). Tempo, Clima e Recursos Hídricos: resultados do Projeto REMETAP no estado do Amapá. Macapá: IEPA. Capítulo 10. p.177-195. 2010.
- Souza; E. B. *et al.*, Precipitação sazonal sobre a Amazônia Oriental no período chuvoso: observações e simulações regionais com o REGCM3. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.24, n.2, 111-124, 2009.
- Souza Jr, W. C. Influência da meteorologia nas decisões econômicas e ambientais. Boletim SBMET, pg 11-14. Abril de 2006.
- Souza, L. R.; Cunha, A. C.; Barreto, N. J. C. e Brito, D. C. Aplicação do Sistema Hidrológico IPHS1 no Estudo de Chuva-Vazão em Aproveitamentos Hidrelétricos na Bacia Hidrográfica do Alto e Médio Araguari. In: Cunha, A.C.; Souza, E.B.; Cunha, H.F.A.(Orgs). Tempo, Clima e Recursos Hídricos: resultados do Projeto REMETAP no estado do Amapá. Macapá: IEPA. Capítulo 10. p.117-134. 2010.
- Silveira, Carlos A C.; Guerra, Hélio N. 2001. A crise Energética e o monitoramento de reservatórios hidrelétricos. XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos Aracaju.
- Tecsys Engenharia. Sisreg: Sistema de Regressão. Belo Horizonte: TECSYS engenharia, 1998.
- Thorne, S.; Raubenheimer, S.. Sustainable Development (SD) appraisal of Clean Development Mechanism (CDM) projects – experiences from the SouthSouthNorth (SSN) project. Forum for Economics and Environment – First Conference Proceedings, 2001.
- UNFCCC. 1997. Kyoto Protocol to UNFCCC. United Nations Framework Convention on Climate Change. Bonn, Germany, 1997.
- United States Environmental Protection Agency - USEPA. Municipal Solid Waste Landfills. (1998) (Fórmula). Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s04.pdf>> Acesso em: 11 ago. 2011.
- Vanzin, E. Procedimento para análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica: aplicação no aterro Santa Tecla. 2006. Dissertação (mestrado) - Faculdade de Engenharia e Arquitetura. Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

ANALYSIS OF THE COST OF ELECTRICITY GENERATION UNIT FOR FINAL DISPOSAL OF MSW MACAPÁ

Abstract. The generation of electricity from biogas, derived from the anaerobic decomposition of municipal solid waste from (MSW), seems to be an environmentally and economically viable alternative where the raw material is available. This research aims to fill a gap in the area of applied knowledge, using a case study for the State of Amapá. The goal is to analyze the economic feasibility of a system based on the quantification of estimated parameters, such as maintenance and operation costs, investment costs, credit, generation capacity, considering three temporal and economic scenarios of the application of CDM to the State Amapá. Initially, it was estimated that amount of biogas produced in the unit of final disposal of MSW from Macapa to identify the potential capacity of electricity generation in the power plant to be installed to use the biogas. Then, we estimated the cost of installation and maintenance of power generating plant and associated structures in sizes defined for each scenario envisioned. Analysis of the results revealed that short-term projects (7 years) have shown not to be attractive, given the short time for incorporation of the initial investment. In turn, projects with more powerful plants (3MW) result in a higher final value of energy in face of the higher investment in the generation plant and collection system. It was also possible to prove that revenues from CDM favored in almost all situations of the value of electricity generated and the contribution of the MLD is directly proportional to the size of the project, and in small projects (lower capacity power plants) are of minor importance due to the cost of its administration.

Keywords: *Electric Power, Generation Cost, Landfill Gas*