

# Análise de Risco do Aproveitamento Energético do Biogás de Aterros Sanitários para a Geração de Eletricidade

*Risk Analysis of the Energetic Avail of Landfill Biogas for Electricity Generation*

**Alessandro Nunes Costa**

alessandronun@hotmail.com

**Giordani Pacífico Medeiros**

giordani@medeiros@gmail.com

**Airon Herbert Moreira Stach**

aironherbert@hotmail.com

**Elder Geraldo Domingues**

prof.eldergd@gmail.com

## **Resumo**

*Este artigo apresenta modelagem estocástica para análise de viabilidade econômica de usinas termoeletricas que utilizam biogás produzido em aterros sanitários para a geração de eletricidade. A análise de risco é feita considerando as variáveis aleatórias que afetam o fluxo de caixa desse tipo de projeto de investimento. As séries sintéticas temporais das variáveis aleatórias foram modeladas utilizando-se o Método de Simulação de Monte Carlo associado ao Processo Estocástico de Reversão à Média (Modelo Geométrico Ornstein-Uhlenbeck). Este tipo de projeto enquadra-se no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo do Protocolo de Quioto. Para quantificar as emissões de linha de base e de projeto, os créditos de carbono (Certificado de Emissões Reduzidas) e o potencial de geração de energia elétrica, utilizou-se a versão 15 da Metodologia ACM-0001, aprovada e consolidada pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas. A fim de se verificar a aplicabilidade dessa metodologia, um estudo de caso foi apresentado para um aterro sanitário localizado na região Centro-Oeste do Brasil. Os resultados da análise de risco mostraram que o projeto é economicamente viável.*

Palavras-Chave: *Análise de Risco; Biogás de Aterro; Certificado de Emissões Reduzidas; Método de Simulação de Monte Carlo; Processos Estocásticos.*

## Introdução

A matriz energética brasileira é fundamentada, principalmente, na geração de energia elétrica a partir da hidroeletricidade. Até o final do século XX, pouco se incentivou o uso de outras formas potenciais de energia renováveis, tais como as energias solar, eólica e a biomassa residual.

Fatores como a sazonalidade de chuvas, preços dos combustíveis fósseis e questões ambientais podem colocar em risco a eficácia do modelo energético brasileiro, o qual ainda é pouco diversificado. Para se obter um modelo econômico e tecnológico mais sustentável, torna-se necessário incentivar, expandir e diversificar as fontes de geração de energia elétrica distribuída e renovável (DOMINGUES, 2003).

Nesse contexto, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) vem lançando, nos últimos anos, chamadas públicas para o desenvolvimento de projetos de pesquisa estratégicos em energias solar, eólica e biomassa. Dentre elas, destaca-se a chamada pública de projeto estratégico n. 014/2012, intitulada: Arranjos Técnicos e Comerciais para Inserção da Geração de Energia Elétrica a partir do Biogás oriundo de Resíduos e Efluentes Líquidos na Matriz Energética Brasileira.

O uso de biogás de aterros sanitários para geração de eletricidade é uma alternativa energética que apresenta grande potencial no Brasil, e que, portanto, merece destaque (ENSINAS, 2003). No Brasil, estima-se que, diariamente, mais de 110 mil toneladas de resíduos sejam destinadas a aterros, o que equivale a 58,3% do total de resíduos gerados (BRASIL, 2011).

A deposição de resíduos em aterros sanitários ainda é um dos métodos mais utilizados e adequados para destinação final de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil. Isto se deve a seu baixo custo, sua alta capacidade de absorção e sua facilidade de operação em comparação com outros métodos, como a incineração e a compostagem.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) geralmente possuem grande quantidade de materiais parcial ou totalmente degradáveis, tais como resíduos alimentares, resíduos de jardinagem, papel e madeira (ENSINAS, 2003). A decomposição anaeróbia desses materiais em aterros sanitários produz biogás contendo cerca de 50% de metano ( $\text{CH}_4$ ), um gás de efeito estufa (GEE), cujo potencial de aquecimento global é 25 vezes maior do que o do dióxido de carbono. Dessa forma, os aterros representam um

dos maiores geradores de gás metano e tendem a crescer, principalmente devido ao crescimento populacional e ao aumento da geração *per capita* de resíduos (IPCC, 2006).

Com o objetivo de extinguir os lixões a céu aberto até o ano de 2014, por meio da implementação de aterros sanitários adequados, foi aprovada, em agosto de 2010, a Lei n. 12.305, a qual institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos no Brasil (PNRS). Apesar de todos os esforços empregados, tal objetivo não foi alcançado dentro do prazo, o que, no entanto, não exime os municípios de cumprir a legislação vigente, que impõe penalidades. Além disso, a referida lei prevê a adoção, o desenvolvimento e o aperfeiçoamento de tecnologias limpas, desde que comprovadas suas viabilidades técnica e ambiental. Como consequência, tanto o governo quanto as empresas que gerenciam aterros devem encontrar soluções e implementar técnicas adequadas para atingir o desenvolvimento sustentável para a gestão dos aterros sanitários (BRASIL, 2010).

A quantificação das emissões de metano produzido em aterros sanitários envolve incertezas devido às variáveis aleatórias inerentes ao processo. É comum, na literatura pertinente, avaliar-se o potencial de geração de metano, as reduções de emissões e a

eletricidade produzida a partir do biogás de aterro, assim como a viabilidade econômica de projetos usando análise determinística. O Método de Decaimento de Primeira Ordem (MDPO), desenvolvido pelo IPCC, tem sido um dos modelos determinísticos mais importantes e amplamente utilizados para a estimativa dessas emissões (ENSINAS, 2003).

Ao contrário dos métodos determinísticos, neste método a análise de risco é mais fidedigna à realidade e leva em consideração variáveis aleatórias que afetam a viabilidade econômica de projetos de investimentos. A previsão das variáveis aleatórias pode ser feita utilizando-se de processos estocásticos adequados, associados ao Método de Simulação de Monte Carlo (MSMC), que é uma metodologia estatística, a qual consiste na geração de uma quantidade de amostragens aleatórias e probabilísticas para se chegar próximo aos resultados reais.

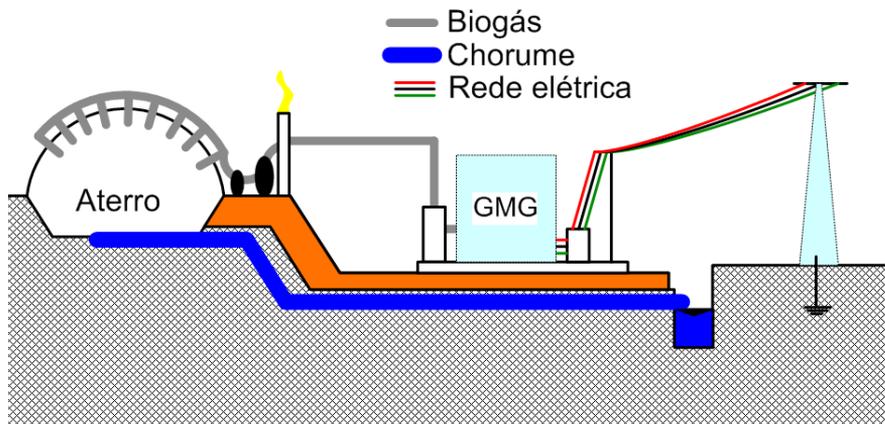
No presente trabalho, o MDPO foi adaptado, levando-se em consideração o fato de que a taxa de geração de resíduos é uma variável aleatória. Na análise de viabilidade econômica, foram consideradas como variáveis aleatórias os preços dos CER e da eletricidade. A análise de risco foi feita utilizando-se conceitos e critérios de engenharia econômica.

## Utilização de biogás de aterros sanitários na geração de eletricidade

O biogás gerado em aterros sanitários é espontâneo, quando o RSU não está em contato com o ar, ocasionando o processo de fermentação anaeróbica de resíduos orgânicos que resulta em biogás, o qual pode ser capturado mais eficientemente com drenos internos verticais e/ou horizontais. Esses drenos são conectados a tubos de polietileno de alta densidade que levam biogás para o setor de sucção e condensação, sendo, posteriormente, enviado para queima. Por outro lado, para gerar eletricidade, ao invés de simplesmente queimar o biogás em *flares*, ele deve ser capturado e enviado até um setor de

purificação e tratamento. A recuperação de biogás de aterro pode ser feita de várias maneiras. Normalmente, nos países desenvolvidos, onde essa prática é usada, gera-se eletricidade com grupos motores geradores (GMG) de combustão interna (ciclo Otto) ou turbinas a gás (ENSINAS, 2003; UNFCCC, 2013).

A Figura 1 ilustra, de forma simplificada, uma usina termoeletrica que utiliza biogás de aterro para geração de eletricidade. A sigla GMG indica o local em que está localizado o grupo motor-gerador de combustão interna. Verifica-se também, na Figura 1, a rede de coleta de chorume (líquido poluente oriundo da decomposição anaeróbica de resíduos), cujo tratamento é feito nas lagoas de decantação do aterro.



**Figura 1**  
Esquema  
ilustrativo  
da produção  
de biogás  
de aterro  
e geração  
de energia  
elétrica.

Além dos benefícios ambientais, o uso de biogás como fonte de energia

apresenta outras vantagens, dentre as quais pode-se destacar: o uso de uma

fonte de energia renovável; a aproximação da fonte geradora ao centro consumidor (Geração Distribuída), evitando grandes investimentos em linhas de transmissão de energia elétrica; e a diversificação das fontes de energia.

## Metodologia ACM-0001

A Metodologia ACM-0001 refere-se a todos os procedimentos e métodos necessários para implementação de um projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Ela utiliza de várias ferramentas, entre elas o Método de Decaimento de Primeira Ordem para estimar a produção de biogás em aterros (UNFCCC, 2015). De acordo

com ENSINAS (2003), o MDPO é o método que mais se aproxima da realidade e leva em consideração vários parâmetros, a saber: as condições climáticas locais, a concentração de nutrientes no solo e a composição dos resíduos.

O MDPO considera a geração de metano por quantidade de resíduo depositada no ano  $x$  e durante os anos posteriores. Como, a cada ano, novas quantidades de resíduos são depositadas, a quantidade de metano gerada em determinado ano será igual à geração do resíduo depositado no ano  $y$  somada das gerações dos resíduos depositados nos anos anteriores, referenciadas no ano  $y$ , conforme Eq. 1 (UNFCCC, 2015):

$$BE_{CH_4, SWDS, y} = \varphi (1-f) GWP_{CH_4} (1-OX) \frac{16}{12} F DOC_f MCF \sum_{x=1}^y \sum_j W_{j,x} DOC_j e^{-k_j(y-x)} (1-e^{-k_j}) \quad (1)$$

Em que:  $BE_{CH_4, SWDS, y}$  representa as emissões de linha de base do projeto, ou seja, as emissões de metano geradas pelo resíduo colocado no aterro entre o início da atividade de projeto e o final do ano  $y$  ( $tCO_{2e}$ );  $\varphi$  é o fator de correção que contabiliza as incertezas do modelo;  $f$  é a fração de metano capturada no aterro e queimada ou usada de outra forma;  $GWP_{CH_4}$  é o potencial de aquecimento global (GWP) do metano, válido para o período de

compromisso relevante;  $OX$  é o fator de oxidação, o qual reflete a quantidade de metano do aterro que é oxidado no solo ou em outro material que cobre o resíduo;  $F$  é a fração de metano no gás de aterro (fração em volume);  $DOC_f$  é fração de carbono orgânico degradável que pode decompor;  $MCF$  é o fator de correção do metano;  $W_{j,x}$  é a quantidade de resíduo orgânico tipo  $j$  despejado no aterro no ano  $x$ , em toneladas;  $DOC_j$  é a fração de carbono orgânico degradável

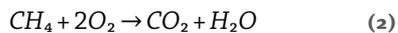
(por massa) no resíduo tipo  $j$ ; e  $k_j$  é a taxa de decaimento do resíduo tipo  $j$ .

Os valores de  $j$ ,  $x$  e  $y$  são definidos como se segue:  $j$  é a categoria do tipo de resíduo (índice);  $x$  é o ano em que o resíduo do tipo  $j$  foi depositado no aterro; e  $y$  é o ano para o qual as emissões de metano são calculadas. Ressalta-se que o valor de  $x$  vai do primeiro ano do primeiro período de crédito ( $x=1$ ) ao ano para o qual as emissões evitadas são calculadas ( $x=y$ ).

As emissões do projeto são a quantidade de gases de efeito de estufa em toneladas de dióxido de carbono equivalente que seria emitida com a implementação do projeto. Para esse cálculo, foram consideradas as emissões fugitivas, as emitidas pelo gerador e as emissões deslocadas por substituição de fonte energia.

Se o aterro tiver sistema de ventilação passiva, torna-se necessária a implementação de sistema de ventilação forçada, promovida por um conjunto de ventiladores, cuja eficiência de coleta pode chegar a mais de 75% do total de biogás produzido (ENSINAS, 2003). Assim, pode-se considerar que 15% das emissões totais de metano são as fugitivas. Trata-se de um valor médio que tem sido utilizado nos projetos de MDL implementados no Brasil (MCT, 2016). Dessa forma, 85% do metano produzido pode ser aproveitado nos GMG, seja

gerando energia ou queimado em *flares*, conforme o equilíbrio estequiométrico:



Como demonstrado acima, para cada tonelada de  $CH_4$  que é queimada, tem-se a geração de 2,75 toneladas de  $CO_2$  que são emitidas para a atmosfera.

Por outro lado, deve-se considerar a quantidade de energia deslocada da rede. Assim, a quantidade de energia gerada com a implementação do projeto seria produzida por outra fonte, no caso brasileiro, pelo sistema interligado de energia, composto de diversos tipos de fontes que emitem GEE. Como consequência, essa substituição de fonte também geraria redução de emissões.

O fator de emissão pode ser calculado de acordo com a versão 02.2.0 da “Ferramenta para calcular o fator de emissão de um sistema elétrico” (UNFCCC, 2015), também disponível na metodologia ACM-0001:

$$FE = (0.5MC) + (0.5MO) \quad (3)$$

Em que:  $FE$  é o fator de emissão do sistema elétrico interligado ( $tCO_2/MWh$ );  $MC$  é a margem de construção; e  $MO$  é a margem de operação.

As reduções de emissões em dado ano  $y$  ( $RE_y$ ), expressas em  $tCO_2e$ , podem ser calculadas, conforme Eq. (4):

$$RE_y = MD_y + ED_y \quad (4)$$

$$MD_y = (MD_{p,y} - MD_{BL,y}) \cdot GWP_{CH_4} \quad (5)$$

$$ED_y = EL_{LFG,y} CEF_{elec,BL,y} + ET_{LFG,y} CEF_{ther,BL,y} \quad (6)$$

Em que:  $RE_y$  é a redução de emissões em um dado ano  $y$  ( $tCO_{2e}$ );  $MD_{p,y}$  é a quantidade de metano que teria sido destruída durante o ano, em toneladas de metano ( $tCH_4$ ) no cenário do projeto;  $MD_{BL,y}$  é a quantidade de metano que teria sido destruída durante o ano na ausência do projeto devido a exigências regulatórias e/ou contratuais, em toneladas de metano ( $tCH_4$ ); e  $GWP_{CH_4}$  foi determinado na Eq. (1).

Ressalta-se que o valor de  $MD_{BL,y}$  normalmente é nulo, pois não há legislação brasileira que determine o montante de biogás a ser queimado. Trata-se do mesmo fator  $f$  na Eq. (1), porém esse último expresso em porcentagem.

Na Eq. (6),  $EL_{LFG,y}$  representa a quantidade líquida de eletricidade produzida usando biogás, que, na ausência da atividade do projeto, teria sido produzida por centrais elétricas interligadas à rede ou por uma geração de energia cativa, no local ou fora dele, com base em combustível fóssil, durante o ano  $y$ , em megawatt horas (MWh);  $CEF_{elec,BL,y}$  é a intensidade das emissões de  $CO_2$  da fonte de linha de base da eletricidade deslocada, em  $tCO_{2e}/MWh$ ;  $ET_{LFG,y}$  é

a quantidade de energia térmica produzida usando gás de aterro, que, na ausência da atividade do projeto, teria sido produzida por caldeira queimando combustível fóssil no local/fora do local, durante o ano  $y$ , em terajoule (TJ); e  $CEF_{ther,BL,y}$  é a intensidade das emissões de  $CO_2$  do combustível usado pela caldeira para gerar energia térmica que é deslocada pelo biogás com base na geração de energia térmica, em  $CO_{2e}/TJ$ .

## Potência Elétrica Útil

Para calcular a potência elétrica útil, faz-se, primeiramente, o cálculo da vazão de metano, ano a ano, que pode ser aproveitado, conforme Eq. (7) (UNFCCC, 2013; ENSINAS, 2003):

$$Q_{CH_4,y} = \frac{BE_{CH_4,SWDS,y}}{d_{CH_4} GPW_{CH_4}} \quad (7)$$

Em que:  $Q_{CH_4,y}$  é a vazão de metano ( $m^3/ano$ );  $d_{CH_4}$  é a densidade do metano ( $t/m^3$ );  $BE_{CH_4,SWDS,y}$  foi dado em (1);  $GPW_{CH_4}$  foi determinado em Eq. (1).

Calculada a vazão, pode-se obter a potência elétrica útil gerada pelo GMG, em um determinado ano, por meio da Eq. (11) (Custódio, et al, 2007):

$$Pot_y = \frac{Q_{CH_4,y} PCI_{CH_4} E \eta}{31.536.000} \quad (8)$$

Em que:  $Pot_y$  é a potência elétrica útil disponível a cada ano  $y$  (kW);  $Q_{CH_4,y}$  foi dado em (7);  $PCI_{CH_4}$  é o poder calorífico inferior ( $kJ/m^3 CH_4$ );  $E$  é a eficiência de coleta de gases; o valor de 31.536.000 é o fator de conversão (s/ano); e  $\eta$  é o rendimento elétrico do GMG.

## Análise de Viabilidade Econômica

Na análise da viabilidade econômica, foram consideradas as variáveis de risco presentes e que afetam o fluxo de caixa do projeto. Foram utilizados conceitos e critérios de engenharia econômica, tais como: fluxo de caixa, taxa mínima de atratividade, Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e Período de Recuperação do Capital (*Payback Period*). O fluxo de caixa foi obtido considerando-se as variáveis aleatórias envolvidas, taxas e impostos, depreciação dos equipamentos, entre outros, durante o período de análise do investimento.

## Análise de Risco

Os estudos envolvendo a análise de viabilidade econômica da geração de eletricidade pelo uso do biogás de aterros sanitários podem ser feitos por

meio da análise de risco, que leva em consideração as variáveis aleatórias envolvidas, fornecendo informações mais seguras aos tomadores de decisão.

A energia gerada pelo GMG que utiliza biogás de aterro depende diretamente da taxa de fluxo de metano e dos resíduos depositados no aterro ( $BE_{CH_4,SWDS,y}$ ).

O comportamento da quantidade de resíduos orgânicos do tipo  $j$  depositado no aterro para o cenário  $i$  durante um período de tempo  $x$ , ( $W_{j,i,x}$ ) pode ser modelado por séries temporais que são, por sua vez, descritas por processos estocásticos. Esta variável aleatória, que apresenta uma tendência ascendente ao longo do tempo, pode ser modelada usando o processo estocástico de Reversão à Média (Movimento Geométrico Browniano com Reversão à Média – MGB-RM), também conhecido como Modelo Geométrico de Ornstein-Uhlenbeck associado ao Método de Simulação de Monte Carlo (HULL, 1993).

A quantidade de lixo orgânico do tipo  $j$ ,  $W_j$ , não atinge valores negativos. É razoável que a sua função de distribuição de probabilidade possa ser considerada como uma distribuição log-normal. Pode-se, assim, operar uma mudança da variável  $z = \ln(W_j)$ . O processo de reversão à média é, então, aplicado ao logaritmo neperiano para a variável quantidade de resíduos orgânicos de tipo  $j$  ( $W_j$ ).

A equação matemática para o MGB-RM é demonstrada em (9):

$$dz = z_{t+1} - z_t = \eta_{wj} (\bar{W}_j - W_{jt}) dt + \sigma_{wj} \varepsilon_{wj} \sqrt{dt} \quad (9)$$

Em que:  $\eta_{wj}$  refere-se à velocidade média global de RSU para um período de reversão à média do RSU tipo  $j$ ;  $\sigma_{wj}$  histórico; e  $t$  é o tempo. Com  $d[\ln(W_j)]$  é a volatilidade (desvio padrão) do RSU; sendo incrementado a  $\ln(W_j)$ , tem-se:  $\varepsilon_{wj} \sqrt{dt}$  é o processo de Wiener, em que  $\varepsilon_{wj}$  é um número aleatório com distribuição padrão normal ( $N(0,1)$ );  $\bar{W}_j$  é a

$$d[\ln(W_j)] = \frac{dW_j}{W_j} \quad (10)$$

Substituindo (10) em (9) obtém-se:

$$\frac{dW_j}{W_j} = \eta_{wj} (\ln(\bar{W}) - \ln(W_j)) dt + \sigma_{wj} \varepsilon_{wj} \sqrt{dt} \quad (11)$$

Aplicando-se o Lema de Itô<sup>1</sup> em (11), chega-se à seguinte expressão:

$$W_{jt+1} = W_{jt} e_{jt+1} \left\{ \eta_{wj} (\ln(\bar{W}) - \ln(W_j)) - \frac{\sigma_{wj}^2}{2} dt + \sigma_{wj} \varepsilon_{wj} \sqrt{dt} \right\} \quad (12)$$

Da mesma forma, esse método pode também ser usado para modelar as demais variáveis aleatórias que afetam o fluxo de caixa do projeto, como os preços do CER e da eletricidade, cujos dados históricos foram obtidos na *Chicago Climate Exchange* (CCX, 2015) e nos leilões de energia realizados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), respectivamente.

$\bar{z}$ ) e volatilidade  $\sigma$  foram estimados a partir de séries históricas  $z_t$  de cada variável analisada, usando a metodologia desenvolvida por (DIXIT AND PINDYCK, 1994). Para as séries consideradas, foram utilizadas regressões lineares  $\ln(z_t) - \ln(z_{t-1})$ , como variáveis dependentes, e  $\ln(z_{t-1})$ , como variável independente, dadas por:

$$\ln \left( \frac{z_t}{z_{t+1}} \right) = a + (b-1) \ln(z_{t-1}) \quad (13)$$

Em que  $a$  e  $b$  representam, respectivamente, os coeficientes linear e angular da equação da reta.

## Estimativa de Parâmetros

Para o MGB-RM, conforme equações de (9) a (11), os parâmetros velocidade de reversão  $\eta$  (valor de reversão à média

Os parâmetros foram calculados a partir de regressões, utilizando (14),

<sup>1</sup> O Lema de Itô é uma aplicação e estabelece que: se  $G=f(x, t)$ , em que  $x$  segue o processo estocástico, então:

$$dG = \left( \frac{\partial G}{\partial x} \mu + \frac{\partial G}{\partial t} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} \sigma^2 \right) dt + \frac{\partial G}{\partial x} \sigma dz$$

(15), (16), em que  $\sigma_\epsilon$  é o desvio padrão da variável analisada.

$$\eta = \frac{-\ln(b)}{\Delta t} \tag{14}$$

$$\bar{z} = \exp \left[ \frac{a}{1-b} + \frac{\sigma_\epsilon}{(1-b)^2} \right] \tag{15}$$

$$\sigma = \sigma_\epsilon \sqrt{\frac{2\ln(b)}{(b2-1) \Delta t}} \tag{16}$$

### Estudo de caso

O estudo de caso foi realizado no aterro sanitário da cidade de Anápolis, Estado de Goiás, Brasil, e teve como objetivo validar o modelo de análise de risco apresentado. O aterro em questão foi implementado em dezembro de 1999, com previsão de encerramento para dezembro de 2050. O Estudo de geração de biogás no aterro foi feito para o período de 2000 a 2100. No entanto, na análise de viabilidade econômica foi considerado apenas o período de obtenção

de créditos de carbono igual a 21 anos, com início da atividade prevista para janeiro de 2017 e término em dezembro de 2037. Foram gerados 2.000 cenários para cada variável aleatória.

### Parâmetros Adotados e Estimados

A Tabela 1 fornece os valores dos parâmetros utilizados na simulação para a obtenção das emissões de linha de base. A Tabela 2 apresenta a caracterização dos resíduos por tipo. A Tabela 3 fornece os dados utilizados para a obtenção das emissões de projeto.

Já a Tabela 4 mostra os dados utilizados para a obtenção do fluxo de caixa do projeto. A Tabela 5 apresenta os parâmetros estimados para o MGB-RM, obtidos a partir dos dados históricos anuais das seguintes variáveis aleatórias: 1) RSU, no período de 2000 a 2013; 2) Preço da energia elétrica (Et), no período de 2005 a 2015; e 3) Preço do CER (Ct), no período de 2008–2012.

TABELA 1  
**Parâmetros Utilizados Para obter o Cenário de Linha De Base**

Parâmetros	Valores
Taxa de geração de RSU	0,76 kg/hab/dia
Taxa de coleta de RSU	100%
PCI do metano	8.500 kcal/m <sup>3</sup>
Densidade do metano	0,7167kg/m <sup>3</sup>
$\phi$	0,75
f	0
GWP <sub>CH<sub>4</sub></sub>	25
O	0,1
F	0,5
DOC <sub>f</sub>	0,5
MCF	1,0

TABELA 2

**Caracterização de Resíduos por Tipo**

Tipo de RSU(j)	Composição Gravimétrica (%)	DOC <sub>j</sub> (% base molhada)	K <sub>j</sub>
Madeira e derivados	5	43	0.035
Polpa, papel e papelão	17	40	0.07
Resíduos alimentares, bebida e tabaco	45	15	0.40
Têxteis	3	24	0.07
Resíduos de Jardinagem	0	20	0.17
Vidro, plástico e outros não inertes	30	0	-

TABELA 3

**Parâmetros Utilizados na Obtenção do Cenário de Projeto**

Parâmetros	Valores
Taxa de coleta de biogás	85%
Potência de cada GMG	330 kW
Eficiência do GMG	35%
Operação do GMG	8560 h/ano
Vida útil do GMG	21 anos
Fator de emissão da rede	0,4322 tCO <sub>2</sub> /MWh

TABELA 4

**Dados Utilizados na Análise de Viabilidade Econômica**

Parâmetro	Valores
Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	12% ao ano (média Selic dos últimos 5 anos)
Programa de Integração Social (PIS)	0,65% da Receita Bruta
COFINS	3% da Receita
Contribuição Social	8% do Lucro Líquido
Custo de Administração	2% do Investimento Inicial
Custo de O&M	R\$ 200.000,00 (ao ano)
Custo de conexão à rede	R\$ 30.000,00
Sistema de purificação (H <sub>2</sub> O)	0,0138 R\$/m <sup>3</sup>
Sistema de purificação (H <sub>2</sub> S/Siloxina)	0,0138 R\$/m <sup>3</sup>
Sistema de purificação (CO <sub>2</sub> )	0,0138 R\$/m <sup>3</sup>
Custo de compressão	690 R\$/m <sup>3</sup> /h
Duração do projeto (período de fluxo de caixa)	21 anos

TABELA 5

**Parâmetros Estimados para o MGB-RM (Wt, Et e Ct)**

RSU (Kg)	Preço da Energia (R\$)	Preço dos CER (R\$)
$\bar{W}$	$\bar{W}$	$\bar{C}$
79.714.779	120,01	10,00
$\eta_w$	$\eta_E$	$\eta_C$
0,015	0,2494	0,8494
$\sigma_w$	$\sigma_E$	$\sigma_C$
0,05	0,2311	0,2

## Resultados

O Gráfico 1 ilustra os 2.000 cenários gerados para a variável aleatória quantidade de lixo depositado no aterro desde o ano de abertura até o ano de encerramento do mesmo. O Gráfico 2 e o Gráfico 3 representam 2.000 cenários

gerados para as variáveis aleatórias preço da eletricidade e preço das CER, respectivamente, para o período de 2017 a 2037, período considerado para o estudo da viabilidade econômica do projeto.

GRÁFICO 1  
Montante de RSU depositado no aterro

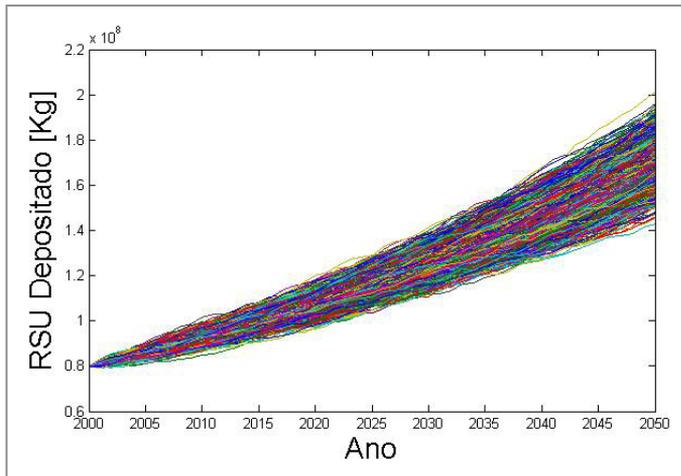
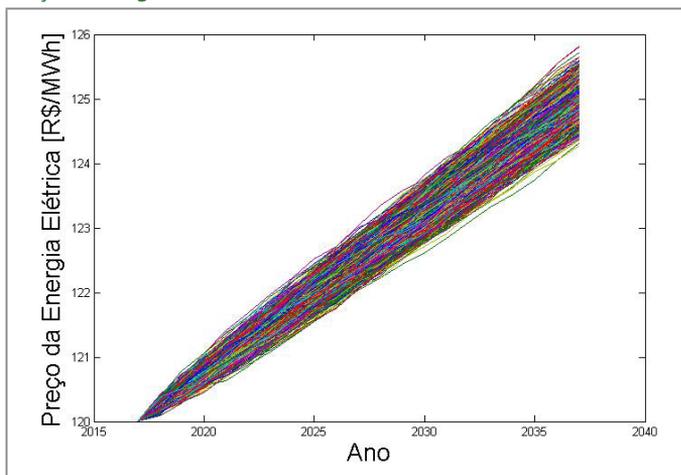
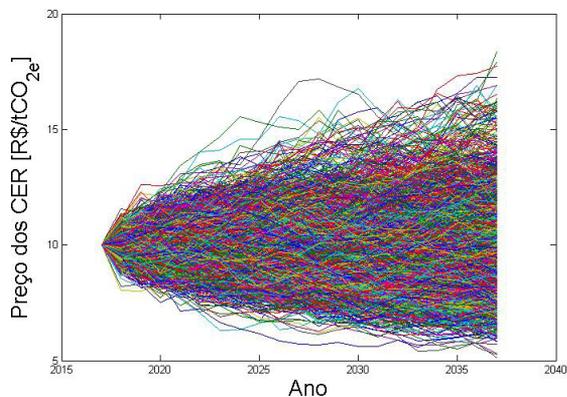


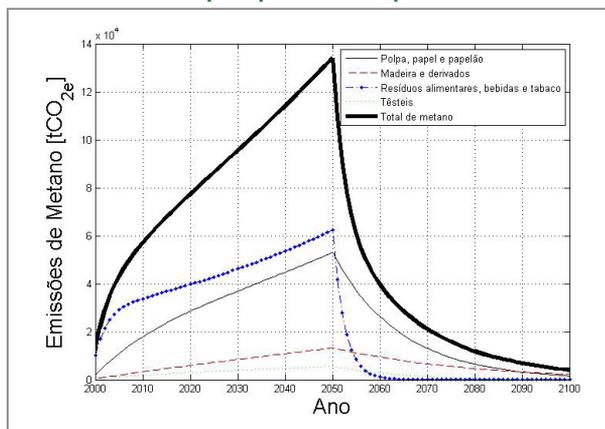
GRÁFICO 2  
Preço da Energia Elétrica



**GRÁFICO 3**  
**Preço dos CER**

O Gráfico 4 ilustra as estimativas de emissão de metano em tCO<sub>2e</sub> para o período de 2.000 a 2.100 para um único

cenário. No gráfico, aparecem também as curvas de geração de metano por tipo de resíduo do aterro.

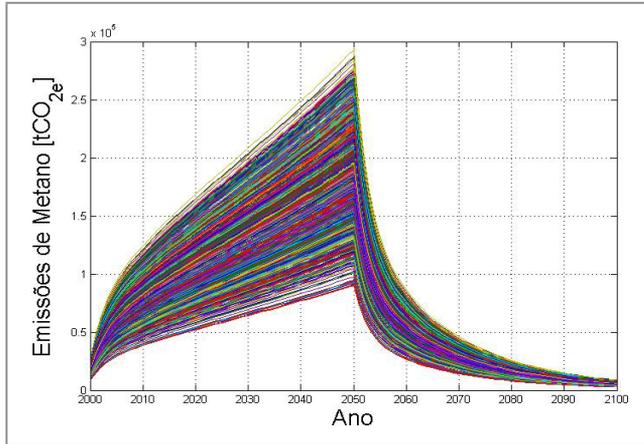
**GRÁFICO 4**  
**Emissões de metano por tipo de resíduo para um único cenário**

O Gráfico 5 ilustra as estimativas para o potencial de emissão de metano em tCO<sub>2e</sub>, no período de 2.000 a 2.100, para os 2.000 cenários gerados. Nessa simulação, foram utilizados os parâmetros da Tabela 1 e da Tabela 2,

sendo, portanto, determinística. É interessante destacar que, após o ano previsto para o encerramento do aterro (2050), haverá contínua produção de metano, que deve ser usado ou, ao menos, controlado, a fim de evitar riscos

de explosão. Observa-se que a produção máxima de metano ocorre no ano de encerramento do aterro. O pior cenário de produção de metano excede 70.000 tCO<sub>2e</sub>, enquanto o melhor cenário excede 300.000 tCO<sub>2e</sub>.

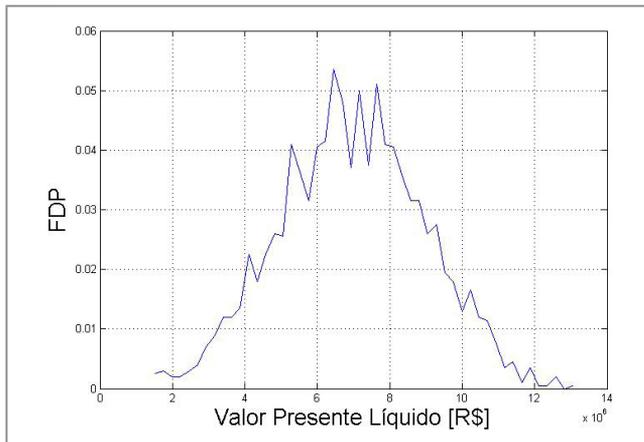
GRÁFICO 5  
**Potencial de emissão de metano**



O fluxo de caixa foi realizado considerando-se as receitas dos CER e da venda de energia elétrica, bem como os impostos e as taxas em vigor no Brasil. A função densidade de probabilidade (FDP) do

VPL é mostrada no Gráfico 6. Nesse caso, verifica-se que a probabilidade de não retorno sobre o investimento (PNRI) é igual a zero, devido ao fato de que em todos os cenários os valores de VPL são positivos.

GRÁFICO 6  
**Função Densidade Probabilidade**



A Tabela 6 mostra o valor esperado ( $\mu$ ), o desvio padrão ( $\sigma$ ) e os valores máximos e mínimos das variáveis alea-

tórias VPL, TIR e *Payback*, obtidos por meio das suas funções de densidade de probabilidade.

TABELA 6

**Resumo da Análise de Risco**

	VPL (R\$)	TIR (%)	<i>Payback</i> (Anos)
$\mu$	6.945.300,00	29,87	4,9057
$\sigma$	2.066.200,00	3,25	0,8496
Valor Máximo	14.049.000,00	37,84	11,9939
Valor Mínimo	766.460,00	15,70	3,6084

Com base nas análises dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o projeto é economicamente viável, devido aos seguintes fatores: 1) O projeto é economicamente viável mesmo no pior cenário, cujo VPL é de aproximadamente 766 mil reais; 2) Em todos os cenários a TIR é maior do que a taxa mínima de atratividade (TMA) considerada (12% ao ano); e 3) o pior valor do período de *Payback* é de cerca de 12 anos, menor que o período de fluxo de caixa considerado.

## Conclusão

Este artigo apresentou uma metodologia para análise de risco para projetos de investimento que utilizam biogás de aterro sanitário para gerar eletricidade a partir de grupo motores geradores de combustão interna. A partir da modelagem estocástica apropriada, foi possível

prever o comportamento das variáveis aleatórias: preço da eletricidade, preço dos créditos de carbono e quantidade de resíduos sólidos urbanos — principais variáveis de risco que afetam o fluxo de caixa deste tipo de projeto de investimento. No estudo de caso apresentado, foram simulados 2.000 cenários para a produção de biogás para o período de 101 anos. Verificou-se que, no ano de encerramento do aterro, o melhor cenário atingiu valor máximo próximo a 300.000 tCO<sub>2e</sub>, enquanto no pior cenário o valor máximo foi de cerca de 70.000 tCO<sub>2e</sub>.

O projeto é economicamente viável mesmo no pior cenário, cujo VPL é de aproximadamente 766 mil reais, a TIR é maior que a TMA e o *Payback* é de cerca de 12 anos, sendo, portanto, menor do que o período de análise considerado no fluxo de caixa.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Anápolis (SMMA) e aos administradores do aterro sanitário pelo fornecimento dos dados necessários à realização da

pesquisa, à FAPEG pela bolsa de mestrado concedida ao primeiro autor e ao Instituto Federal de Educação e Tecnologia de Goiás (IFG) pelo incentivo à pesquisa.

## Referências

- ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). *Leilões de energias renováveis*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 26 abr. 2015.
- BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, Seção 1, p. 3–7.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. *Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)*. Brasília, 2016.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. *Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Ministério do Meio Ambiente*. Brasília, 2011.
- CCX. *Chicago Climate Exchange*. 2015. Disponível em: <<http://www.theice.com/ccx>>. Acesso em: 20 jun. 2016.
- CUSTÓDIO, E.B.; SILVA, L.R. da.; CARVALHAES, V. *Avaliação do potencial de geração de energia elétrica e obtenção de créditos de carbono a partir do aterro sanitário de Goiânia*. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Goiás, Goiânia, 2007.
- DIXIT, A.K.; PINDICK, R.S. *Investment Under Uncertainty*. Princeton/New Jersey: Princeton University Press, 1994.
- DOMINGUES, E.G. *Análise de risco para otimizar carteiras de ativos físicos em geração de energia elétrica*. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Instituto de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.
- ENSINAS, A.V. *Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas/SP*. 2003. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- HULL, J., *Options, Futures and Other Derivatives*. 2. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1993.
- IPCC. *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. National Greenhouse Gas Inventories Programme. Kanagawa, Japan: United Nation Environmental Programme, 2006.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change). *Methodological Tool: Emission Factor for an Electricity System – Version 02.2.0*. 2015.
- \_\_\_\_\_. *Methodological Tool: Emissions from Solid Waste Disposal Sites – Version 07.0*. 2015.
- \_\_\_\_\_. *Methodology ACM-0001: Consolidated Baseline Methodology for Landfill Gas Project Activities – Version 1*. 2015.
- \_\_\_\_\_. *Clean Development Mechanism Methodology Booklet*. 5. ed. Bonn/Germany, 2013.

**Abstract**

*This paper presents stochastic modeling for economic feasibility analysis of thermal power plants that uses biogas produced in landfills to generate electricity. The risk analysis is done considering the random variables that affect the cash flow of such investment project. Temporal synthetic time series of the random variables were modeled using the Monte Carlo Simulation Method associated with the Mean Reversion Stochastic Process (Geometric Model of Ornstein-Uhlenbeck). This type of project fits on the Clean Development Mechanism of the Kyoto Protocol. It is used the version 15 of ACM-0001 methodology, approved and consolidated by Intergovernmental Panel on Climate Change to quantify the baseline and project emissions, carbon credits (Certificate of Emission Reductions) and the potential for electricity generation. In order to verify the applicability of this methodology, a case study was presented to a landfill located in the Midwest region of Brazil. Risk analysis results showed that the project is economically viable.*

*Keywords: Risk Analysis; Landfill Biogas; Certified Emission Reductions; Monte Carlo Simulation Method; Stochastic Process.*

