

Estimativa da geração de metano proveniente dos locais de disposição final de RSU em Pernambuco seguindo as diretrizes do Plano Estadual de Resíduos Sólidos

Estimation of biogas generation from the final disposal sites of MSW in Pernambuco following the directives of State Plane for solid wasteon basic sanitation municipal plans

- **Data de entrada:**
09/02/2017
- **Data de aprovação:**
07/07/2017

Diogo Henrique Fernandes da Paz* / Alessandra Lee Barbosa Firmo

DOI: 10.4322/dae.2018.010

Resumo

Esta pesquisa tem como objetivo estimar a geração de CH_4 proveniente da implantação de novos aterros sanitários em Pernambuco, como contribuição aos estudos de aproveitamento de biogás. O modelo aplicado para estimar a geração de CH_4 nos aterros entre os anos de 2014 a 2032 foi o modelo do IPCC (2000). Considerando as implementações previstas no Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Pernambuco, a geração total de biogás estimada para o estado em 2014 foi de 21.790 t de CH_4 e em 2032 foi de 161.986,5 t de CH_4 . Considerando apenas os incentivos financeiros com a comercialização dos créditos de carbono ao aproveitar o CH_4 dos aterros, cerca de 5,2 milhões de dólares por ano poderiam ter contribuído em termos econômicos para a melhoria do setor nos municípios de Pernambuco, inclusive envolvendo ações com sujeitos carentes de recursos econômicos no setor. **Palavras-chave:** Resíduos sólidos urbanos. Modelo de primeira ordem. Aterros sanitários. Geração de biogás. Geração de energia.

Abstract

*This research aims to estimate the generation of CH_4 from the deployment of new sanitary landfills in Pernambuco, as a contribution to studies of biogas use. The model applied to estimate the generation of CH_4 from landfills between 2014 and 2032 was the Method of First Order Decay defined by IPCC (2000). Considering the implementations provided in the State Plan for Solid Waste in Pernambuco, the total estimated biogas generation for the state in 2014 was 21,790 tons of CH_4 and in 2032 was 161,986.5 tons of CH_4 . Considering only the financial incentives with the commercialization of carbon credits to harness the biogas from landfills, about 5.2 million dollars per year could have contributed economically to improve the sector in the municipalities of Pernambuco, including actions involving subjects with deprived of economic resources in the sector. market. **Keywords:** Municipal solid waste. First-order model. Landfills. Biogas generation. Energy generation.*

Diogo Henrique Fernandes da Paz – Graduado em Tecnologia em Gestão Ambiental pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Pernambuco - IFPE e em Engenharia Ambiental pelo Centro Universitário Maurício de Nassau - Uninassau. Mestre em Engenharia Civil pela Escola Politécnica de Pernambuco - Poli/UPE. Professor do IFPE, campus Cabo de Santo Agostinho.

Alessandra Lee Barbosa Firmo – Graduada em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, e em Tecnologia em Gestão Ambiental pelo Instituto Federal de Pernambuco – IFPE. Mestre e doutora em Engenharia Civil pela UFPE. Professora do IFPE, campus Recife.

***Endereço para correspondência:** Av. Prof. Luís Freire, 500 - Cidade Universitária, Recife - PE, CEP 50740-540. E-mail: diogo.paz@cabo.ifpe.edu.br.

1 INTRODUÇÃO

A disposição final dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) é um dos graves problemas ambientais enfrentados pelos grandes centros urbanos. Atualmente, existem diversas alternativas tecnológicas para o tratamento e a destinação final de resíduos, envolvendo desde a valorização dos materiais até a valorização energética destes. Entretanto, no Brasil ainda existe a predominância do uso de práticas de destinação final de resíduos no solo, como lixões, aterros controlados e aterros sanitários, que têm como um dos subprodutos a emissão de gases provenientes da decomposição do material orgânico. Dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) mostram que em 2013 cerca de 42% dos resíduos gerados no Brasil tiveram como destino locais inadequados, ou seja, 78.987 t/dia.

Com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305), publicada em 2010, havia a esperança que ocorresse a eliminação dos lixões e aterros controlados até o ano de 2014 adotando novas tecnologias de tratamento e destinação final de resíduos (BRASIL, 2010), porém isso não aconteceu e ainda existem discussões sobre esta temática e o estabelecimento de novos prazos. Entre as tecnologias existentes, o aterro sanitário vem sendo amplamente utilizado e difundido no país, por ser uma tecnologia universal de disposição final de rejeitos (GRS, 2014), devendo existir a valorização dos resíduos antes de sua disposição final.

Uma das maiores preocupações observadas na disposição de resíduos em aterros consiste na decomposição anaeróbia da fração degradável com a consequente emissão de biogás, composto principalmente por CO₂, CH₄ e outros gases traços. O CH₄ possui um potencial de aquecimento global (Global Warming Potential – GWP) 21 vezes maior

que o dióxido de carbono (CO₂). Dessa forma, justifica-se a preocupação com a emissão de gás associada às discussões sobre mudanças climáticas (LIMA, 2006).

Segundo dados do Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT, 11% das emissões antrópicas de CH₄ para a atmosfera são provenientes do tratamento de resíduos, havendo um aumento de 4% na emissão deste gás entre 2000 e 2005 no Brasil. Outras fontes de emissão são as provenientes da agropecuária, com a maior contribuição, da mudança no uso da terra e florestas e da queima incompleta de combustíveis tradicionais para gerar energia ou aquecimento térmico. (MCT, 2010),

Uma série de estudos vem sendo realizada para estimar a quantidade de metano gerada nos aterros e lixões (CETESB, 2009; FIRMO, 2013, ABRELPE, 2013), bem como a busca de formas de controle e aproveitamento do biogás, sendo as principais referências advindas do *Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC* (2000).

No país, projetos de aproveitamento do biogás de aterros foram impulsionados inicialmente pela oportunidade de obtenção do Certificados de Emissões Reduzidas (RCE), por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), que promovia a implantação de tecnologias limpas para o tratamento (queima) e/ou geração de energia a partir do biogás produzido em aterros localizados nos países em desenvolvimento, tendo em troca créditos de carbono que poderiam ser negociados e vendidos internacionalmente, principalmente para a iniciativa privada localizada nos países desenvolvidos signatários do Protocolo de Quioto (FIRMO, 2013).

Com a crise econômica europeia e a não renovação do protocolo, porém, a comercialização de créditos de carbono deixou de ser o principal eixo

de financiamento dos projetos de tratamento e aproveitamento energético de biogás em aterros no Brasil, sendo tais projetos promovidos com base na sustentabilidade ambiental e econômica do próprio empreendimento, no atendimento às normas e políticas públicas, na necessidade de estabelecer relações positivas com a vizinhança do aterro, na necessidade de diversificação da matriz energética, na comercialização de energia elétrica, e ainda na existência de diversas inovações tecnológicas envolvidas no setor.

Em termos de políticas públicas, as práticas de tratamento do biogás e geração de energia são incentivadas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e Política Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187/2009), esta última regulamentada pelo Decreto nº 7.390/2010, que estabelece como um de seus objetivos a redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE's) oriundos de diversas atividades humanas, inclusive as referentes aos resíduos (Artigo 4º, II), e oficializa o compromisso do Brasil junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima de redução de emissões de GEE's entre 36,1% e 38,9% das emissões projetadas até 2020.

Entre os anos de 1999 e 2002 foi elaborado o Diagnóstico de Resíduos Sólidos no Estado de Pernambuco pela Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente (SECTMA) em convênio com a Fundação de Amparo à Universidade Federal de Pernambuco (FADE) e o Grupo de Resíduos Sólidos da Universidade Federal de Pernambuco (GRS/UFPE). Neste trabalho foram realizadas pesquisas de indicadores sociais, de limpeza urbana, de destinação final e composição dos resíduos sólidos em cada um dos 185 municípios do estado (FIRMO e RODRIGUES, 2009). Entretanto, mesmo com a existência desses dados, não existe nenhum pro-

jeto de comercialização de créditos de carbono ou aproveitamento energético do biogás em efetivo funcionamento no Estado.

2 OBJETIVO

O objetivo desta pesquisa é estimar a geração de biogás proveniente da implantação de novos aterros sanitários em Pernambuco, prevista no Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERS, 2012), e verificar o potencial de aproveitamento para comercialização de créditos de carbono e geração de energia.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da área de estudo

Segundo o Plano Estadual de Resíduos Sólidos - PERS (PERNAMBUCO, 2012), Pernambuco é uma das 27 unidades federativas do Brasil, tendo como limites geográficos: ao Norte, o Ceará e a Paraíba; a Oeste, o Piauí; ao Sul, Bahia e Alagoas e a Leste, o Oceano Atlântico (Figura 1). Ocupando uma área de aproximadamente 98.146 km², o estado está dividido politicamente em 184 municípios e um distrito estadual, o Arquipélago de Fernando de Noronha, tendo como capital a cidade do Recife.

De acordo com dados levantados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), a população do estado é a sétima maior do país, com 8.796.448 habitantes, equivalente a 4,6% da população nacional, resultando em uma densidade demográfica média de 89,63 hab.km². Com taxa de urbanização de 80,2%, a maior parte da população se concentra nas áreas urbanas dos grandes centros urbanos, com maior densidade nos municípios da Região Metropolitana do Recife (RMR).

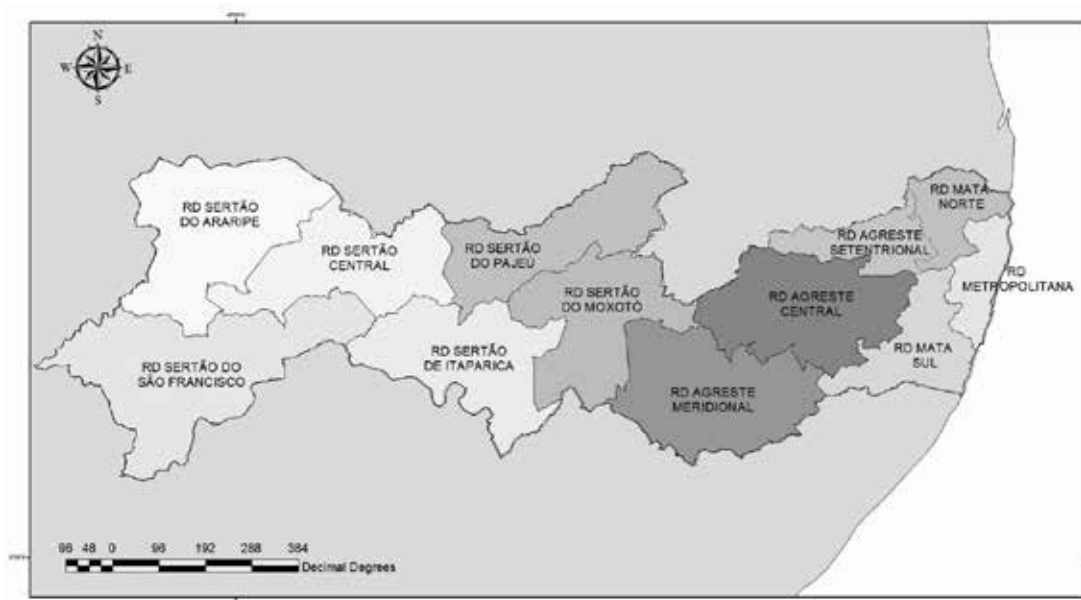
Figura 1 - Localização do estado de Pernambuco, na região Nordeste.



O território de Pernambuco está dividido em 12 Regiões de Desenvolvimento (RDs), de acordo com suas características ambientais, socioeconômicas, culturais e geográficas, facilitando a implantação de políticas públicas de gestão participativa e especializada (Figura 2). A partir dessa

divisão, é possível realizar orçamentos regionalizados, com participação da sociedade, atendendo principalmente as necessidades, potencialidades e peculiaridades de cada região, permitindo que as ações do governo sejam descentralizadas, integradas e interiorizadas (PERS, 2012).

Figura 2 – Regiões de Desenvolvimento do estado de Pernambuco



Fonte: Firmo e Rodrigues (2009)

Em 2012, foi elaborado o Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Pernambuco (PERS), por meio de parcerias com várias instituições, e de acordo com as diretrizes estabelecidas na Lei nº 12.305/2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e pela Lei nº 14.236/2010, que institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos. O plano tem como objetivo relacionar a situação atual dos resíduos sólidos no estado de Pernambuco e desenvolver diretrizes, estratégias, metas, programas e projetos, capazes de subsidiar a gestão dos resíduos sólidos no estado, contando com a validação do documento a partir da participação popular (PERNAMBUCO, 2012).

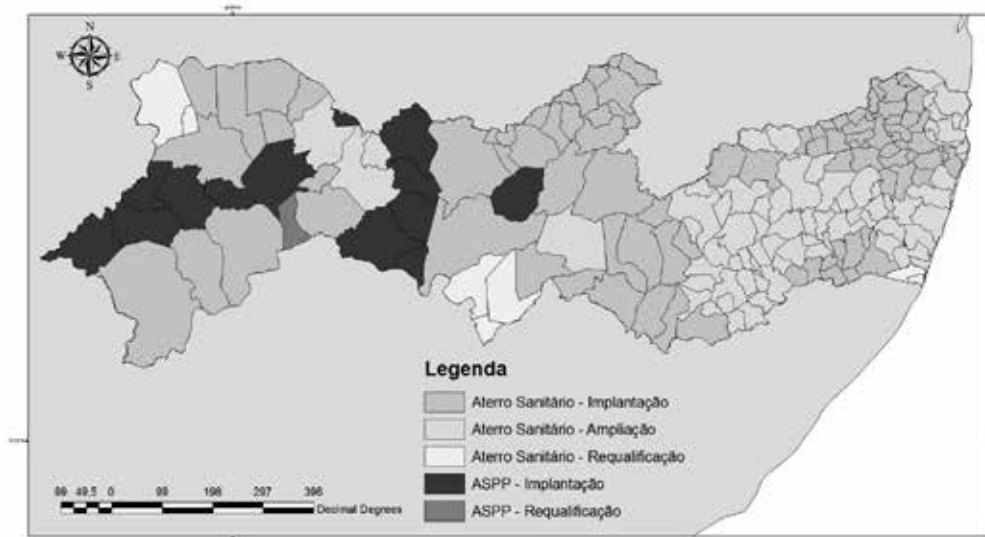
A partir dos dados obtidos, observou-se que apesar de grande parte dos municípios ainda utilizar os lixões para destinar seus resíduos (80%), a mesma proporção não se mantém quando avaliada a disposição em termos quantitativos. Cerca de 58% dos resíduos produzidos no estado são destinados a aterros sanitários. A possibilidade de reunir os municípios sob a forma de consórcio público reduziria o desafio de eliminar os lixões até o ano de 2014, por meio da implantação de aterros sanitários regionalizados, diminuindo a quantidade de áreas a serem

disponibilizadas para o tratamento dos resíduos sólidos (PERNAMBUCO, 2012).

Apesar da evolução no que tange à destinação adequada dos resíduos sólidos em Pernambuco, há ainda uma necessidade de implantação de um conjunto de novos aterros, como forma de solucionar definitivamente o problema da destinação final e se adequar ao que estabelece a Lei nº 12.305, por meio do seu art. 54, determinando que “a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, observado o disposto no § 1º do art. 9º, deveria ser implantada em até 4 (quatro) anos após a data de publicação desta Lei”.

Dessa forma, foi criada uma proposta de regionalização da gestão dos resíduos sólidos em Pernambuco, construída a partir dos condicionantes técnicos, políticos e legais anteriormente citados (Figura 3). Dentre os aterros a serem instalados, 7 (sete) seriam aterros sanitários de pequeno porte individualizados, 2 (dois) seriam arranjos consorciados de aterros sanitários de pequeno porte, 5 (cinco) seriam aterros sanitários individuais pelos mesmos motivos anteriores e 18 (dezoito) aterros sanitários seriam implantados de forma consorciada, totalizando 32 (trinta e dois) novos equipamentos de destinação final no Estado (PERNAMBUCO, 2012).

Figura 3 – Proposta de regionalização da destinação dos resíduos sólidos.



Fonte: Adaptado de Pernambuco (2012)

Com a instalação dos 32 novos aterros sanitários e ampliação dos já existentes, Pernambuco possuirá 54 aterros em operação. Se em todos eles forem instalados um sistema de tratamento e aproveitamento do biogás advindo da degradação dos resíduos, Pernambuco poderá apresentar um relevante potencial de geração de energia, e captar recursos financeiros por meio da comercialização dos créditos de carbono, por meio do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL.

Os cálculos de geração de metano e seu possível aproveitamento terão como base a possível instalação desses aterros no ano de 2014, como previsto no PERS.

3.2 Levantamento de dados para aplicação no modelo

O método utilizado nesta pesquisa para a estimativa das emissões provenientes dos aterros foi o decaimento de primeira ordem, do *Guidelines 1996*, e do *Good Practice Guidance 2000*. Esse método de decaimento, também conhecido por *Tier 2*, caracteriza-se por considerar que a emissão de CH₄ persiste ao longo de uma série de anos, após a disposição do resíduo. Para a sua aplicação, são necessários dados relativos à população, clima (médias anuais de temperatura e chuva), quantidade de resíduo aterrada, composição do resíduo, qualidade de operação do aterro e quantidades de CH₄ recuperada e oxidada, conforme mostra a Equação 1 (CETESB, 2009).

Dados populacionais

Os dados relativos à população de todos os municípios do Estado de Pernambuco foram obtidos no censo do IBGE para o ano de 2010, sendo realizada uma projeção populacional para os anos de 2011 a 2032.

A metodologia utilizada para estimar a população em um tempo t qualquer, segundo Rios-Neto e Riani (2004), consiste em estimar a taxa média de crescimento (r) da população entre dois pontos conhecidos. Essa taxa de crescimento entre as duas datas de referência pode ser calculada por aproximação geométrica ou exponencial, representadas, respectivamente, nas equações 1 e 2:

$$r_g = \left(\sqrt[t]{\frac{p_{\text{final}}}{p_{\text{inicial}}}} \right) - 1 \quad (\text{Eq. 01})$$

$$r_e = \frac{1}{t} \cdot \ln \left(\frac{p_{\text{final}}}{p_{\text{inicial}}} \right) \quad (\text{Eq. 02})$$

Onde:

r_g = taxa de crescimento geométrico;

r_e = taxa de crescimento exponencial;

t = tempo transcorrido entre as duas datas de referência dos censos;

p_{inicial} = população no início do período e

p_{final} = população no fim do período.

A partir das equações 1 e 2 deduzem-se as equações 3 e 4, para a estimativa de uma população em um tempo t qualquer:

$$p^t = p_{\text{inicial}} * (1 + r_g)^t \quad (\text{Eq. 03})$$

$$p^t = p_{\text{inicial}} * e^{r_e t} \quad (\text{Eq. 04})$$

Onde:

P_t = população em um momento t .

Condições climáticas

As informações utilizadas das condições climáticas do estado de Pernambuco foram as médias obtidas no “Inventário de Emissões de Metano pelo Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos no Estado de Pernambuco no Período de 1990 a 2005”, de Firmo e Rodrigues (2009).

Para a aplicação do modelo do IPCC (2000) se faz necessário o levantamento de dados da pluviometria anual acumulada (mm.ano^{-1}) considerando, no mínimo, uma série histórica de 30 anos. Para tal, Firmo e Rodrigues (2009) pesquisaram no Banco de Dados Hidrológicos disponibilizados no site da Agência Nacional de Águas (ANA). Para compilar os dados obtidos das estações referentes a 83 municípios, foi utilizado o programa *HidroWeb* (Sistema de Informações Hidrológicas), que permite o gerenciamento das informações, transformando os dados dos pluviômetros diários em médias anuais da série histórica desejada. Os dados dos 101 municípios não cadastrados no banco de dados da ANA foram obtidos a partir de uma série histórica de no mínimo 7 anos disponibilizada no site do Laboratório de Meteorologia de Pernambuco (LAMEPE) do Instituto de Tecnologia de Pernambuco (ITEP).

Os dados climatológicos são utilizados para o cálculo da constante cinética de decaimento (k), seguindo a condição *default* definida pelo IPCC (2000) e utilizada pelo MCT (2010):

- Se precipitação $< 1.000 \text{ mm.ano}^{-1}$, então k é igual a 0,065;
- Se precipitação $\geq 1.000 \text{ mm.ano}^{-1}$, então k é igual a 0,17.

Taxa de geração de RSU por habitante

Os dados da taxa de geração de RSU de cada município foram obtidos no Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Pernambuco (PERNAMBUCO, 2012) por apresentar informações de todos os municípios do estado, diferente de outras bases de dados como as do SNIS, ABRELPE e IBGE. Esses valores foram mantidos constantes ao longo dos anos, pelo fato de não ser possível prever mudanças neste valor dentre o período estudado. O

valor da taxa de geração para as RDs é mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Taxa de geração per capita de resíduos das Regiões de Desenvolvimento de Pernambuco.

Região de Desenvolvimento	Taxa de geração per capita (kg/hab.dia)
RD Agreste Central	0.95
RD Agreste Meridional	1.38
RD Agreste Setentrional	1.23
RD Metropolitana	1.20
RD Sertão do Araripe	0.85
RD Sertão Central	0.83
RD Sertão de Itaparica	0.80
RD Sertão do Moxotó	1.44
RD Sertão do Pajeú	0.79
RD Sertão do São Francisco	0.83
RD Mata Norte	1.30
RD Mata Sul	1.11

Fonte: Pernambuco (2012)

Taxa de coleta de RSU

A taxa de coleta de RSU consiste na relação entre os resíduos gerados pela população e os que são depositados nos locais de disposição final. Esse parâmetro também foi obtido no Plano Estadual de Resíduos Sólidos (PERNAMBUCO, 2012). Assim como a taxa de geração de resíduos, a taxa de coleta foi mantida constante para todos os anos. A Tabela 2 mostra os dados de taxa de coleta média para as RDs.

Tabela 2 - Taxa de coleta média dos resíduos das Regiões de Desenvolvimento de Pernambuco.

Região de Desenvolvimento	Taxa de coleta %
RD Agreste Central	88.04
RD Agreste Meridional	82.62
RD Agreste Setentrional	91.05
RD Metropolitana	89.73
RD Sertão do Araripe	70.40
RD Sertão Central	85.63
RD Sertão de Itaparica	86.14
RD Sertão do Moxotó	80.86
RD Sertão do Pajeú	85.29
RD Sertão do São Francisco	93.00
RD Mata Norte	87.37
RD Mata Sul	81.88

Fonte: Pernambuco (2012)

Composição gravimétrica de RSU

OA composição gravimétrica consiste na obtenção dos percentuais em peso dos principais componentes dos RSU, tais como: papel, papelão, plástico, vidro, matéria orgânica, metais dentre outros. Tal composição dos resíduos é muito variável entre os municípios e ao longo do tempo, pois depende de fatores tais como a situação econômica da po-

pulação, estações do ano, clima, hábitos culturais e outros (FIRMO e RODRIGUES, 2009).

Os dados de composição gravimétrica utilizados neste trabalho foram obtidos a partir do Plano Estadual de Resíduos Sólidos de Pernambuco (PERNAMBUCO, 2012) e mantidos constantes ao longo dos anos. A Tabela 3 apresenta a composição gravimétrica média das RDs.

Tabela 3 - Composição gravimétrica média dos resíduos da Regiões de Desenvolvimento de Pernambuco.

Região de Desenvolvimento	Composição Gravimétrica - 2010 (%)						
	Vidro	Metal	Papel	Plástico	Recicláveis	Rejeitos	Matéria orgânica
RD Agreste Central	3.01	3.36	8.64	10.69	25.24	15.77	58.31
RD Agreste Meridional	1.72	2.84	7.61	10.48	22.67	16.31	61.02
RD Agreste Setentrional	2.76	3.10	8.99	10.98	25.78	18.25	55.60
RD Metropolitana	3.50	2.40	10.00	8.90	24.80	21.00	50.92
RD Sertão do Araripe	1.93	3.71	9.33	9.67	24.64	21.48	53.88
RD Sertão Central	4.17	3.27	9.38	10.22	27.04	20.48	52.48
RD Sertão de Itaparica	2.54	4.03	11.61	12.75	30.92	16.41	52.67
RD Sertão do Moxotó	1.37	1.62	11.0	13.59	27.59	14.89	57.52
RD Sertão do Pajeú	2.89	3.52	7.96	9.43	23.80	16.13	60.07
RD Sertão do São Francisco	2.32	3.37	8.05	11.20	24.93	25.62	49.59
RD Mata Norte	4.24	3.78	8.51	12.19	28.72	15.27	56.01
RD Mata Sul	1.54	1.71	4.62	9.99	17.86	19.59	62.55

Fonte: Pernambuco (2012)

Destinação final dos RSU

A pesquisa consiste em estimar a geração de metano pelos aterros sanitários que deverão ser instalados no estado de Pernambuco. Dessa forma, foi considerado que todos os municípios estariam dispendo seus resíduos de forma adequada em aterros sanitários a partir de 2014.

Para a estimativa da geração de metano, utilizaram-se dois cenários: o primeiro considerando o Fator de Correção de Metano (MCF) igual a 1, para aterros bem operados, e o segundo utilizando MCF igual a 0,5, aproximação recomendada pelo IPCC (2006) para aterros mal operados em termos de projetos de aproveitamento energético do biogás, conforme apresentado na Tabela 4. Quanto melhor se opera o aterro, maior é a geração de

metano, pois os resíduos estarão adequadamente cobertos com terra, o que facilita a degradação pelas bactérias anaeróbias e pode-se ter um sistema de drenagem desse gás mais eficiente.

Tabela 4 - Fator de correção do metano para as condições de operação do aterro em termos de projetos de aproveitamento energético do biogás.

Local de destinação	MCF (fator de correção do metano)
Adequado*	1,0
Inadequado – profundo (> 5 m de lixo)	0,8
Desconhecido	0,6
Adequado* – Mal operado	0,5
Inadequado – raso (< 5 m de lixo)	0,4

* Aterro sanitário
Fonte: IPCC (2006)

3.3 Cálculo da geração de metano em Pernambuco

Para utilizar o modelo do IPCC (2000), foi necessário adaptá-lo aos dados pesquisados. Assim, em 2014, ano inicial a ser estimado, a emissão de metano do setor de RSU para cada município ($Q_{CH_4(2014)}$) foi obtida pela aplicação da Equação 5.

$$Q_{CH_4(2014)}(t=1) = \left\{ [1 - e^{-k}] * [(Tx_{RSD(2014)} * Pop_{(2014)} * Tx_{col(2014)} * MCF)] * [(0,4 * A) + (0,15 * C) + (0,2 * E)]. COD_f * e^{-k*(t-1)} * F * (16/12) \right\} \quad (Eq.5)$$

Onde:

$Q_{CH_4(2014)}$ é a emissão de metano no ano de 2014 ($tCH_4 \cdot ano^{-1}$);

K é a constante cinética de decaimento (ano^{-1});

$Tx_{RSD(2014)}$ é a taxa de geração de RSU per capita no município em 2014 ($kgRSD \cdot hab \cdot dia^{-1}$);

$Pop_{(2014)}$ é a população do município em 2014 (hab);

$Tx_{col(2014)}$ é a taxa de coleta de RSU na área urbana no município em 2014 (adimensional);

MCF é o fator de correção do metano (adimensional);

A é a fração do resíduo correspondente a papel nos RSU (adimensional);

C é a fração do resíduo correspondente a resíduos orgânicos alimentares (adimensional);

E é a fração do resíduo correspondente a outros tipos de materiais que sejam compostos por ma-

téria orgânica, sejam não alimentares putrescíveis, madeiras ou podas (adimensional);

COD_f é a fração de carbono orgânico degradável que é decomposto anaerobiamente (adimensional);

t é o tempo que relaciona o ano de disposição do resíduo e o ano do cálculo de emissão (ano);

F é a concentração volumétrica do metano no biogás (adimensional);

$16/12$ é o fator de conversão de carbono em metano ($tonCH_4 \cdot tonC^{-1}$).

Para o cálculo da emissão de CH_4 no ano de 2015, é necessário considerar a fração de resíduo que foi depositada em 2014 (que continua gerando gás em 2015) e a fração de resíduos que foi depositada neste ano. O mesmo processo de cálculo se repete até o ano de 2032, quando se encerra a estimativa de geração de metano, como é apresentado na Equação 6.

$$Q_{CH_4(2032)}(t=19) = Q_{CH_4(2014)}(t=1) + Q_{CH_4(2015)}(t=2) + \dots + Q_{CH_4(2031)}(t=19) + Q_{CH_4(2032)}(t=20) \quad (Eq. 6)$$

4 RESULTADOS

Após todo o cálculo utilizando os dados de entrada anteriormente citados, obteve-se os resultados de geração de CH_4 em cada município no Estado de Pernambuco. Somando-se as gerações de metano devido à disposição dos RSU nos anos de 2014 a 2032, desconsiderando as gerações realizadas nos anos anteriores, foi estimada a geração em 2014 de $21.790 t \cdot ano^{-1}$ de CH_4 e em 2032 serão gerados $23.452 t \cdot ano^{-1}$ somente com as emissões

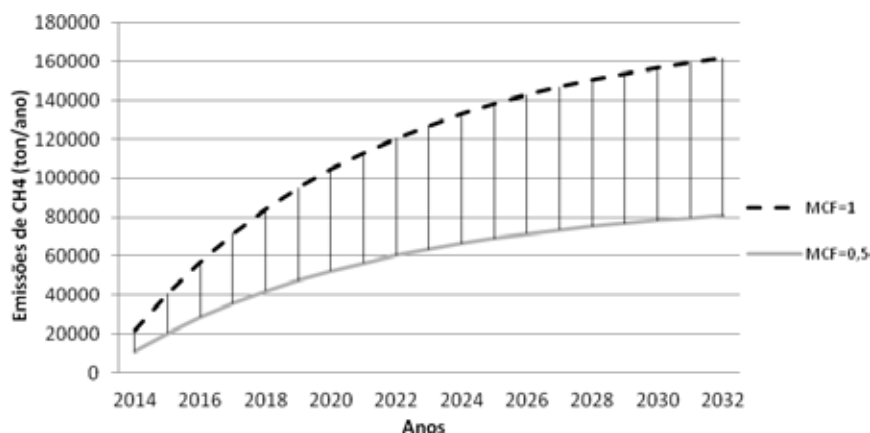
desse ano, totalizando $161.986,5 t \cdot ano^{-1}$ ao considerar as emissões dos anos anteriores. Houve um aumento de 7,6%, devido ao crescimento populacional, porém a maior quantidade é devido à existência da geração de biogás advindo das parcelas de resíduos depositadas em anos anteriores.

Na Figura 4 pode-se observar o comportamento crescente da geração de CH_4 em todo o estado, nos períodos de 2014 a 2032. Considerando o somatório

rio das gerações durante todo o período, o estado de Pernambuco poderá gerar aproximadamente 2.179.234,6 t de CH₄, considerando o cenário dos

aterros serem bem operados (MCF=1) e aproximadamente 1.089.617,3 t considerando que os aterros instalados sejam mal operados (MCF=0,5).

Figura 4 - Resultados de geração de CH₄ pelo manejo de RSU em todo o estado.

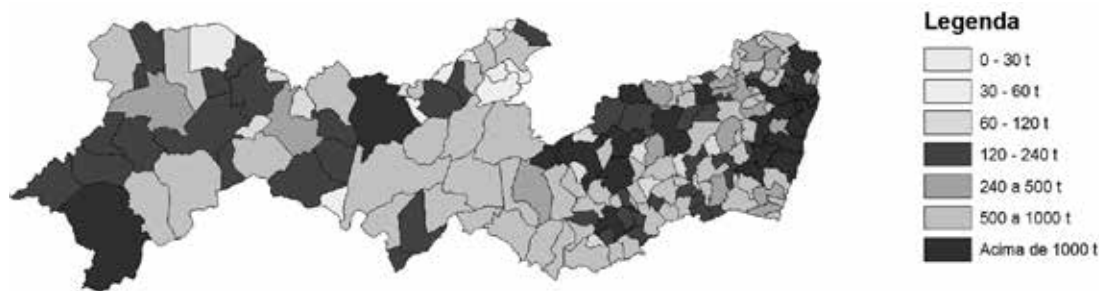


As Figuras 5 e 6 apresentam mapas da geração de CH₄ em cada município de Pernambuco nos anos de 2014 e 2032, ano inicial e final considerado na pesquisa. É possível observar que houve um aumento considerável na geração de CH₄ durante o período avaliado devido principalmente ao (i) aumento da quantidade de RSU e (ii) pela ideologia de encerramento dos lixões a partir de 2014 e disposição dos RSU em aterros sanitários. Diferente do

que acontece em aterros sanitários bem operados, no qual a biodegradação acontece principalmente de forma anaeróbia resultando em um biogás com elevado teor de CH₄, em lixões a degradação de RSU acontece principalmente de forma aeróbia, resultando em um biogás com baixo teor de CH₄. Em suma, quanto melhor a operação do aterro, maior a emissão de CH₄ e maiores as probabilidades de tratamento e aproveitamento energético do biogás.

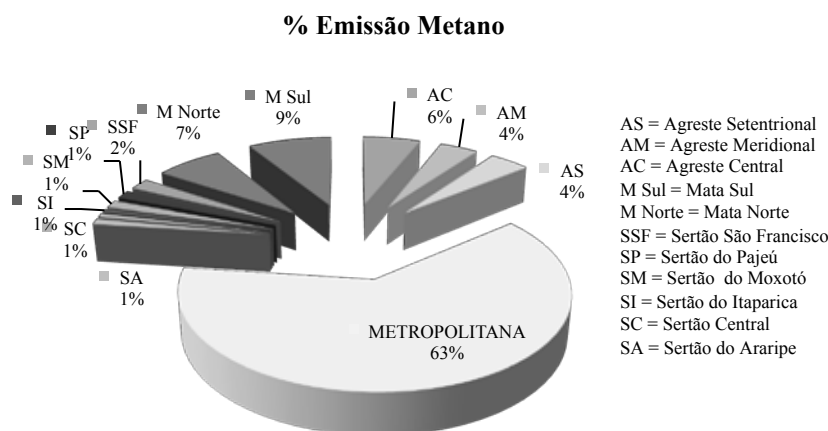
Figura 5 - Faixa de geração de metano pelos municípios pernambucanos em 2014 (t.ano⁻¹).



Figura 6 - Faixa de geração de metano pelos municípios pernambucanos em 2032 (t.ano⁻¹).

Como é apresentado na Figura 7, a Região Metropolitana responde a cerca de 63% da geração de CH₄ do estado, pelo fato de possuir um clima mais favorável à geração de gases (maior precipitação), e principalmente pela grande densidade popula-

cional (1.207 hab/km²) e elevada quantidade de resíduos destinadas aos aterros, resultando em aterros de grande porte. Somente a cidade do Recife, capital do estado, é responsável por 28% do total de geração de metano no estado.

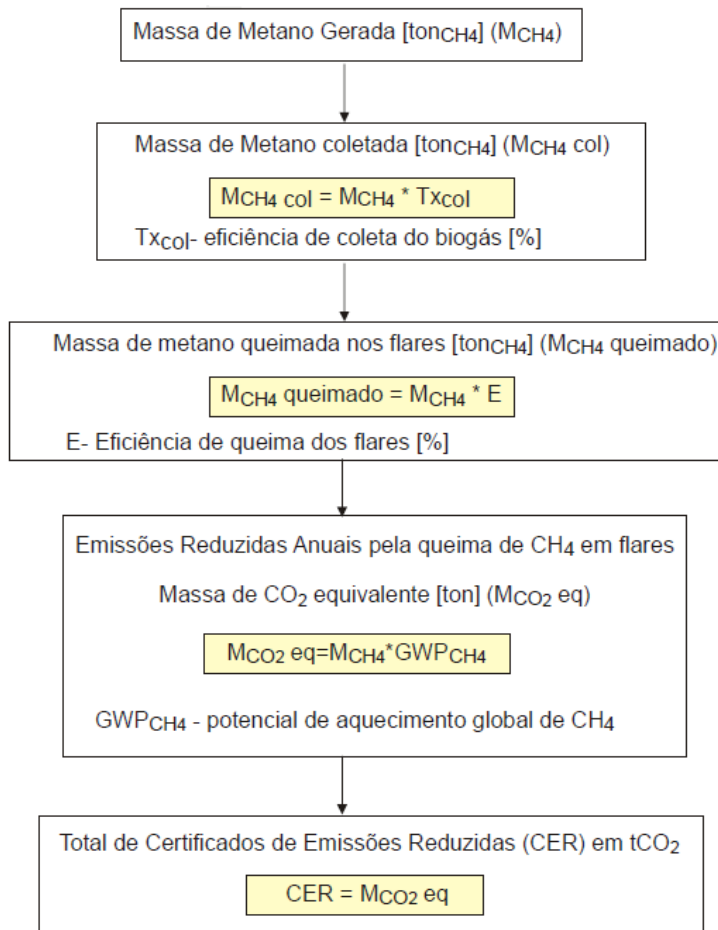
Figura 7 - Geração de metano acumulado no período de 2014-2032 de cada RD de Pernambuco.

Para estimar quanto o estado de Pernambuco pode receber de incentivos financeiros com apenas comercialização dos créditos de carbono advindos do tratamento do biogás dos aterros, mesmo no período de crise, foi utilizada a metodologia de estabelecimento da linha de base ACM0001 versão 5.0, definida em FELIPETTO (2007). A sequência utilizada para cálculo de gerações reduzidas é apresentada na Figura 8.

De acordo com as estimativas realizadas para os aterros bem operados (MCF=1), serão gerados ao longo dos anos de 2014 a 2032 (18 anos) cerca de 2.179.235 t de CH₄ (M_{CH4}). Levando-se em conta

que 70% do biogás gerado seja coletado (Tx_{col}) nos aterros, então **1.525.464** ton de CH₄ seriam coletados e encaminhados aos queimadores. Em média, segundo Felipetto (2007), um queimador tem a eficiência de 98% (E), assim a massa de CH₄ que realmente é queimada e oxidada a CO₂ (M_{CH4queimado}) é de **1.494.955** ton de CH₄. Desta forma, considerando o potencial de aquecimento global do metano igual a 21, pode-se obter uma quantidade de CO₂ equivalente gerado igual a **31.394.054** toneladas, que pode corresponder às Emissões Reduzidas durante os 18 anos de geração considerados (2014 a 2032).

Figura 8 - Sequência utilizada para o cálculo dos créditos de carbono.



Fonte: Firmo (2009)

Para Firmo (2008), o potencial de aproveitamento energético de RSU em aterros sanitários vem enfrentando desafios com relação às questões financeiras, técnicas, regulatórias e institucionais, principalmente quanto à incerteza do mercado de créditos de carbono, às competências e responsabilidades nos sistemas de gerenciamento dos resíduos e também a uma melhor estimativa do potencial de geração de energia advinda dos resíduos. No ano de 2012, frente à crise econômica mundial, foi realizado o terceiro leilão na BM&F Bovespa equi-

valente a um lote de 531.642 toneladas de crédito de carbono proveniente dos aterros Bandeirantes e São João em São Paulo, no qual as negociações variaram de US\$ 7 a US\$ 3 por tonelada.

Dessa forma, supondo que as 31.394.054 toneladas de CO_{2,eq} fossem comercializadas no mercado mundial de créditos de carbono por US\$ 3 por t de carbono equivalente e sem considerar os custos utilizados para a implantação do tratamento e redução dessas emissões, aproximadamente 94 milhões de dólares poderiam ter contribuído para

a economia dos municípios de Pernambuco, podendo obter um valor médio de 5,2 milhões de dólares por ano durante o período de 19 anos estudado, podendo esse valor ser inferior ou superior em cada ano.

Utilizando-se o mesmo processo considerando um cenário pessimista, em que todos os aterros sejam mal operados (MCF=0,5), foi possível estimar uma quantidade de CO₂ equivalente gerado igual a 15.697.026 toneladas, que sendo comercializado pelo mesmo valor, aproximadamente 47 milhões de dólares poderiam ter contribuído para a economia dos municípios de Pernambuco durante o período considerado, podendo obter um valor médio de 2,6 milhões de dólares por ano du-

rante o período estudado, podendo este valor ser inferior ou superior ao longo dos 19 anos.

A mesma metodologia também pode ser aplicada para cada aterro sanitário a ser implantado no estado, sendo possível dessa forma calcular o potencial de aproveitamento de biogás desses aterros e os incentivos financeiros advindos da possível comercialização no mercado de carbono, desconsiderando os incentivos financeiros que ainda poderiam ser obtidos pela comercialização de energia.

A Tabela 5 apresenta os resultados referentes à geração de CH₄ e incentivos financeiros na RD Metropolitana enquanto que a Figura 9 apresenta a distribuição dos incentivos financeiros para cada aterro desta região.

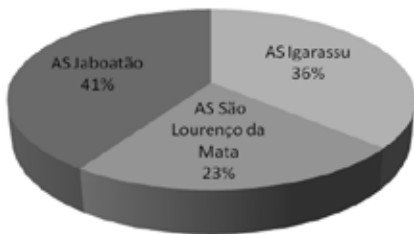
Tabela 5 – Potencial de aproveitamento de biogás na RD Metropolitana.

Aterro Sanitário	Municípios	Geração média de Resíduos (ton.dia ⁻¹)	Geração total de CH ₄ (ton)	Incentivos financeiros (R\$.ano ⁻¹)
Igarassu (Ampliação)	Igarassu, Recife (1/3), Olinda, Itamaracá, Abreu e Lima, Araçoiaba, Paulista e Itapissuma	1789,6	MCF = 1 451.276,5	MCF = 1 3.611.716,2
			MCF = 0,5 225.638,2	MCF = 0,5 1.805.858,1
São Lourenço da Mata (Implantação)	São Lourenço da Mata, Moreno, Camaragibe e Recife (1/3)	1095,2	MCF = 1 282.384,4	MCF = 1 2.260.016,7
			MCF = 0,5 141.192,2	MCF = 0,5 1.130.008,3
Jaboatão dos Guararapes (Ampliação)	Jaboatão dos Guararapes, Recife (1/3), Cabo de Santo Agostinho e Ipojuca	2066,83	MCF = 1 503.383,0	MCF = 1 4.028.741,6
			MCF = 0,5 251.691,4	MCF = 0,5 2.014.370,8
TOTAL	-	4951,63	-	-

A partir do levantamento da produção de metano ao longo dos anos, é possível quantificar a potência elétrica útil disponível para a geração de energia elétrica (DOMINGUES et al., 2008). Para a realização da estimativa da potência elétrica disponível para o biogás, considerou-se que este

passará por um processo de separação e purificação para que somente o gás metano seja aproveitado, fornecendo assim um combustível de Poder Calorífico Inferior de 35,53 MJ.m⁻³ (ENSINAS, 2003). O cálculo da potência elétrica disponível é realizado através da Equação 7.

Figura 9 – Distribuição dos incentivos financeiros nos aterros sanitários da RD Metropolitana



$$Pot_{ano} = \frac{Q_{CH_4} \cdot PCI_{CH_4} \cdot E \cdot n}{31.536.000} \quad (Eq.7)$$

Sendo: **Pot_{ano}** é a Potência disponível a cada ano (KW)

Q_{CH₄} é a vazão do metano anual (m³ CH₄.ano⁻¹);

PCI_{CH₄} é o poder calorífico inferior (KJ.m⁻³ CH₄);

E é a eficiência de coleta de gases (%);

n é o rendimento elétrico;

31.536.000 é o fator de conversão (s.ano⁻¹).

Considerando-se a densidade do metano de 0,717 kg.m⁻³, com uma eficiência de coleta de 85% e um rendimento elétrico de (40%), a potência de geração elétrica para o MCF=1 é de **3.080 KW.ano⁻¹**, com um total de **55,4 MW** e para MCF=0,5 é de **1.540 KW.ano⁻¹**, com um total de **27,7 MW**, considerando apenas o potencial durante a operação dos aterros.

5 CONCLUSÕES

A estimativa da geração de gás metano no estado de Pernambuco nos anos de 2014 a 2032 pode servir como base de dados para estudos de aproveitamento de biogás nos aterros, que pode contribuir para a viabilidade de implantação destes aterros.

Com os resultados obtidos em cada município, foi observado que Recife é o principal gerador de biogás, responsável por cerca de 28% da geração total de Pernambuco devido ao maior número de habitantes, maior velocidade de decomposição

dos resíduos devido à elevada precipitação, comparada com outros municípios.

Com a comercialização de CER de CO₂ no mercado mundial de créditos de carbono, sem considerar os custos utilizados para a implantação do tratamento e a redução dessas gerações e considerando MCF=1, aproximadamente 5,2 milhões de dólares por ano poderão contribuir para a economia dos municípios de Pernambuco durante o período considerado. Entretanto, o valor se reduz à metade ao utilizar-se o MCF=0,5 gerando receita em torno de 2,6 milhões de dólares.

É possível notar que os municípios que instalem aterros sanitários e manejarem adequadamente os mesmos serão os que têm maior potencial de geração de metano e também teriam uma maior possibilidade de implantação de estações de aproveitamento energético do biogás nos aterros. Caso os aterros a serem instalados não forem gerenciados adequadamente, o potencial de geração de biogás e energia também se reduz pela metade.

O aproveitamento de biogás pode ser viável no estado, não só para geração de energia, mas para a comercialização CER no mercado mundial. É preciso, porém, realizar um estudo mais aprofundado, considerando os custos de implantação do aterro e do sistema de aproveitamento de biogás para que seja possível confirmar sua viabilidade. É provável que não haja viabilidade econômica de implantação de sistemas de aproveitamento de biogás em aterros de pequeno porte, pois a geração de metano não é suficiente.

REFERÊNCIAS

ABRELPE - Associação brasileira de empresas de limpeza pública e resíduos especiais. **Atlas brasileiro de emissões de GEE e potencial energético na destinação de resíduos sólidos**. São Paulo-SP. 2013

BRASIL. *Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009*. Institui a Política Nacional sobre mudança no clima – PNMC e dá outras providências.

cias. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm>. Acesso em: 11 dez. 2012.

BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010*. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 11 dez.2012.

BRASIL. *Lei nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010*. Regulamenta os arts. 6º, 11 e 12 da Lei nº 12.987, de 29 de dezembro de 2009, que institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima – PNMC, e dá outras providências.

CETESB. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de gases de efeito estufa – Emissões de gases de efeito estufa no tratamento e disposição de resíduos sólidos**. São Paulo- SP. 2009.

DOMINGUES, E.G.; SILVA, L.R.; BRADL, H. Evaluation of the methane and electrical energy potential and carbon credits revenues from the Goiânia landfill. In: Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008, Bogotá. *Anais...* Latin America: IEEE/PES, 2008.

ENSINAS, A.V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas-SP**. 2003. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003.

FELIPETTO, A.V.M. **Mecanismos de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos: Conceito, planejamento e oportunidades**. Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p.

FIRMO, A.L.B. **Análise numérica de aterros de resíduos sólidos urbanos: calibração de experimentos em diferentes escalas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2008.

FIRMO, A.L.B. **Diagnóstico de emissões de metano pelo manejo de resíduos sólidos urbanos na Região Metropolitana do Recife/PE**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Gestão Ambiental) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco. Recife, 2009.

FIRMO, A.L.B.; RODRIGUES, T.S.N. **Inventário de emissões de metano pelo manejo de resíduos sólidos urbanos no Estado de Pernambuco no período de 1990 a 2005. Relatório técnico**.

Universidade Federal de Pernambuco. Grupo de Resíduos Sólidos – GRS. Recife, 2009.

FIRMO, A.L.B. **Estudo numérico e experimental da geração de biogás a partir da biodegradação de resíduos sólidos urbanos**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2013.

GRS - Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE. **Análise das diversas tecnologias de tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. Jaboação dos Guararapes-Pernambuco, 2014.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo Demográfico Brasileiro**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions – Guideline for National Greenhouse Gas Inventories**. United Nations For Environmental Program. The Organization for Economic Cooperation and Development and The International Energy Agency. London, UK. 2000.

IPCC. **Solid Waste Disposal – Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Report produced by Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) on the invitation of the United Nations Framework Convention on Climate Change. 2006.

LIMA, I.V.; BOFF, M.L.; SCARPIN, J.E. Utilização do biogás como instrumento de desenvolvimento sustentável: um estudo de caso. In: Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 3, 2006, Resende/RJ. *Anais...* AEDB, 2006.

MCT – Ministério da Ciência e Tecnologia. Emissões de gases de efeito estufa no tratamento e disposição de resíduos. **Segundo Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. Brasília – DF. 2010.

PERNAMBUCO. Plano Estadual de Resíduos Sólidos. Secretaria de Meio Ambiente e Sustentabilidade. 2012. Disponível em: <<http://www.cprh.pe.gov.br>>. Acesso em: 20/01/2013.

RIOS-NETO, E.L.G.; RIANI, J.L.R (org). **Introdução à demografia da educação**. Campinas: Associação Brasileira de Estudos Populacionais – ABEP, 2004.