

Avaliação do potencial energético do resíduo sólido urbano de Piracicaba para produção de biogás

MAZZONETTO, Alexandre Witier
ROCHA, Diane Caroline
OLIVEIRA, Diego Francis Gonçalves de
SILVA, Priscilla Lopes da

RESUMO

O Brasil teve um aumento da geração de resíduo muito maior do que o crescimento populacional, sendo que de 2003 a 2014, a população cresceu 6% enquanto a produção de resíduos aumentou 29% (LENHARO, 2015). A gestão de resíduos sólidos urbanos é um problema que muitos países têm enfrentado, alguns países processam e/ou tratam os resíduos; no Brasil as destinações mais comuns são aterros sanitários e Lixões. Grande parte desse “lixo” (Resíduo Sólido Urbano - RSU) vai parar em aterro, onde sua decomposição pode gerar gases de alta periculosidade ao meio ambiente (metano é considerado 21 vezes pior do o dióxido de carbono para o efeito estufa). Porém, esses gases podem ser reaproveitados energeticamente e suas emissões mitigadas nesse processo. Este trabalho teve como objetivo fazer a caracterização física dos componentes do resíduo sólido urbano (RSU) do município de Piracicaba a fim estimar seu potencial de geração de metano (CH_4) quando dispostos em aterros. O potencial energético desse gás para produção de eletricidade utilizando-se as equações de estimativas do IPCC e Método do Inventário. Para tanto, foram coletadas amostras em seis bairros do município, durante seis semanas, separados (orgânico, papel, polímeros, metais, vidros, têxteis, tetra pak e outros) e pesados cada componente dessas amostras, possibilitando estimar a composição do resíduo do município. O método aplicado para a avaliação do potencial de produção de metano e energético foi baseado no Método do Inventário, com auxílio de software elaborado pela CETESB, através dos resultados obtidos, pôde-se concluir que o resíduo sólido de Piracicaba tem potencial energético que pode ser aproveitado usando-se o biogás para geração de energia elétrica ou gaseificando o RSU para geração de gás de baixo poder calorífico, dando assim uma melhor destinação ao RSU e gerando energia.

Palavras-chave: biogás, resíduo sólido urbano, lixo, potencial energético, eletricidade.

ABSTRACT

Brazil had an increase in the generation of solid waste that was much larger than population growth. From 2003 to 2014, the population grew 6% while solid waste generation increased by 29% (G1, 2015). Urban solid waste management is a problem that many countries have faced, some countries process and/or treat waste. In Brazil the most common destinations are solid waste landfills and garbage dumps. Much of this "trash" (Urban Solid Waste - USW) will end up in landfills, where their decomposition can generate gases that are highly dangerous to the environment (methane is considered 21 times worse than carbon dioxide to the greenhouse effect). However, these gases can be energetically reused and emissions can be mitigated in the process. This study aimed to characterize the physical composition of the components of urban solid waste (USW) in the municipality of Piracicaba in order to estimate the potential of methane generation (CH_4) once it is landfilled. The energy potential of this gas to produce electricity was calculated using IPCC estimate equations and the Inventory Method. In order to do that, samples were collected in six districts of the municipality for six weeks. They were separated (organic, paper, polymers, metals, glass, textiles, Tetra Pak cartons and others) and each component of these samples was weighted, so as to have an estimation of the urban solid waste composition. The method applied for the evaluation of the methane production and energy potential was based on the Inventory Method with the aid of software developed by

CETESB. Through the results obtained, it was possible to conclude that the solid waste of Piracicaba has energy potential that can be exploited by using its biogas for electric power generation or by gasifying the USW for the generation of low heat gas, thereby providing a better destination to USW and generating electric power.

Keywords: biogas, urban solid waste, trash, energy potential, electricity.

RESUMEN

Brasil tuvo un incremento en la generación de residuos mucho más grande que el crecimiento de la población, y de 2003 a 2014, la población aumentó en un 6%, mientras que la generación de residuos aumentó un 29% (Lenharo, 2015). La gestión de residuos sólidos urbanos es un problema que muchos países se han enfrentado, algunos países proceso y / o el tratamiento de los residuos; en Brasil los destinos más comunes son inodoros y vertederos de relleno sanitario. Gran parte de esta "pérdida" (Residuos Sólidos Urbanos - RSU) se detendrá en los vertederos, donde su descomposición puede generar gases altamente peligrosos para el medio ambiente (metano se considera 21 veces peor que el dióxido de carbono al efecto invernadero). Sin embargo, estos gases pueden ser reutilizados energía y las emisiones mitigadas en el proceso. Este estudio tuvo como objetivo hacer que la caracterización física de los componentes de los residuos sólidos urbanos (RSU) en la ciudad de Piracicaba para estimar su potencial de generación de metano (CH₄), cuando en vertederos. El potencial energético de este gas para producir electricidad a partir de las estimaciones del IPCC de ecuaciones y método del inventario. Por lo tanto, se recogieron muestras en seis distritos de la municipalidad durante seis semanas, separados (, papel, polímeros, metales, vidrio, textiles, pak orgánica tetra y envolviendo otros) y pesado cada componente de estas muestras, la estimación de la composición de los residuos municipales. El método se aplica a la evaluación del potencial de producción de metano y la energía se basa en el método del inventario, con la ayuda de software desarrollado por la CETESB a través de los resultados obtenidos, se puede concluir que los residuos sólidos Piracicaba tiene el potencial de energía que puede ser ventaja de utilizar el biogás para la generación de energía o la gasificación de la generación de RSU de gas de bajo poder calorífico, por lo tanto una mejor asignación de los RSU y la generación de energía.

Palabras clave: biogás, residuos sólidos urbanos, residuos, energía potencial, energía eléctrica.

INTRODUÇÃO

O aumento populacional e as mudanças nos hábitos das pessoas trouxeram consigo intenso processo de urbanização e desenvolvimento industrial. Junto a isso há a produção e descarte de resíduos, que se tornou um problema de caráter socioambiental devido ao grande excesso e à crescente dificuldade em se gerir seu tratamento e disposição final, que é feita geralmente em aterros à céu aberto. Além disso, há a escassez de aterros sanitários, devido à falta de espaço físico para que sejam construídos. A deterioração desses resíduos em lixões ou aterros causa a emissão de vários gases, dentre eles dois dos principais causadores do efeito estufa, o gás metano (CH_4) e o dióxido de carbono (CO_2). A decomposição anaeróbia da parte orgânica dos resíduos sólidos urbanos em aterros gera gases compostos principalmente por CO_2 (gás carbônico) e CH_4 (gás metano), contribuem intensamente para o agravamento do Efeito Estufa, além de serem altamente tóxicos, inflamáveis e perigosos. Porém esse gás, o biogás ($\text{CH}_4 + \text{CO}_2$), pode ser aproveitado na produção de energia elétrica, evitando que o metano seja lançado na atmosfera.

O município de Piracicaba, localizado no interior do estado de São Paulo, é um importante polo de desenvolvimento industrial e agrícola, com destaques para o setor sucroalcooleiro e metal-mecânico, implicando na geração de grandes quantidades de resíduos sólidos. Além do poder econômico, o aumento populacional e o avanço da tecnologia também são causas da grande geração de resíduos sólidos em áreas urbanas.

A importância do aproveitamento desses gases para retirá-los dos aterros e convertê-los em energia, impedindo que sejam lançados na atmosfera, se ressalta. Outro fator que torna interessante nesse aproveitamento são os ganhos econômicos que ele pode proporcionar pela sua utilização na geração de energia elétrica. A sociedade também ganha com isso já que a emissão descontrolada de biogás é prejudicial à saúde humana e os projetos implantados para o aproveitamento energético podem gerar empregos e disponibilizar maior oferta de energia próxima aos centros consumidores. Assim sendo, os resíduos sólidos urbanos deixam de ser “um problema” e passam “para” potenciais geradores de energia, além de os processos de reaproveitamento serem mitigadores aos impactos causados pela má disposição.

O objetivo desse trabalho foi caracterizar e analisar os resíduos sólidos urbanos de seis bairros representativos de Piracicaba para a avaliação do potencial energético dos gases gerados por eles em aterros sanitários.

REVISÃO DE LITERATURA

Classificação e caracterização dos resíduos sólidos

Segundo definição da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas - 2004), resíduo sólido é todo aquele resíduo que se encontra nos estados sólido ou semissólido, resultantes de atividades industriais, comerciais, agrícolas, hospitalares, domésticas, de serviços de varrição e de sistemas de tratamento de água. A classificação dos resíduos sólidos é definida a partir da identificação do processo que lhes deu origem, de sua composição e características, como consta na norma NBR 10.004:2004 (ABNT, 2004).

Resíduos Classe I: Perigosos

São resíduos que apresentam periculosidade e riscos à saúde pública, provocando mortalidade e doenças, além de efeitos negativos ao meio ambiente. Isso se dá devido a características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade (ABNT, 2004). São resíduos biológicos, sangue e hemoderivados, restos cirúrgicos, perfurantes ou cortantes e animais contaminados (POLETTI, 2008).

Características dos resíduos sólidos

As características dos resíduos sólidos, segundo Monteiro *et al* (2001), podem variar em função de aspectos sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos. Países mais desenvolvidos ou industrializados tendem a produzir menos matéria orgânica devido à incidência de alimentos semi-preparados disponíveis no mercado consumidor.

A tabela 1 compara a composição do resíduo brasileiro com o americano, em percentual de peso.

Tabela 1. Comparação entre a composição dos RSU do Brasil e dos EUA.

| Componentes do Lixo | Mat. Orgânica | Vidro | Metal | Plástico | Papel |
|---------------------|---------------|-------|-------|----------|-------|
| Brasil | 65 | 3 | 4 | 4 | 25 |
| EUA | 35,6 | 8,2 | 8,7 | 6,5 | 4,1 |

Fonte: Adaptado de MONTEIRO *et al* (2001).

No que diz respeito à caracterização física dos resíduos sólidos, a norma NBR 10.004, da ABNT (2004), classifica-os pelas seguintes variáveis:

- *Geração per capita*: relaciona a quantidade de resíduos urbanos gerada diariamente e o número de habitantes de uma determinada região.
- *Composição gravimétrica*: traduz o percentual de cada componente em relação ao peso total da amostra de lixo analisada.
- *Peso específico aparente*: é o peso do lixo solto em função do volume ocupado livremente, sem compactação, expresso em kg.m^{-3} .
- *Teor de umidade*: representa a quantidade de água presente no lixo, medida em percentual do seu peso.
- *Compressividade*: grau de compactação ou redução do volume que uma massa de lixo pode sofrer quando compactada.

Com relação às características químicas, o lixo pode ser classificado através do seu poder calorífico, do potencial hidrogeniônico (pH), da composição química e da relação carbono/nitrogênio (C:N), de acordo com o Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do Governo Federal (MONTEIRO *et al*, 2001).

- *Poder calorífico*: característica química que indica a capacidade potencial de um material desprender determinada quantidade de calor quando submetido à queima. O poder calorífico médio do lixo domiciliar se situa na faixa de $20,92 \text{ MJ.kg}^{-1}$.
- *Potencial hidrogeniônico (pH)*: indica o teor de acidez ou alcalinidade dos resíduos e situa-se, geralmente, na faixa de 5 a 7.
- *Composição química*: baseia-se na determinação dos teores de cinzas, matéria orgânica, carbono, nitrogênio, potássio, cálcio, fósforo, resíduo mineral total, resíduo mineral solúvel e gorduras.
- *Relação carbono/nitrogênio (C:N)*: indica o grau de decomposição da matéria orgânica do lixo nos processos de tratamento e disposição final. Em geral, essa relação encontra-se na ordem de 35/1 a 20/1.

Frésca (2007) determinou em seu estudo as características físicas dos resíduos sólidos, de acordo com sua composição gravimétrica, encaminhados ao aterro da cidade de São Carlos - SP. O processo de amostragem abordou os resíduos sólidos domiciliares da população da área urbana. Os resultados obtidos foram que 59,08% da composição desses resíduos era material orgânico, 10,47% eram plásticos, 6,44% correspondiam a papel e papelão, 0,9% eram embalagens tetrapak, 1,67% eram vidro e metais e alumínio representavam 1,31%. Têxteis e outros materiais corresponderam a 20,09% da composição do lixo do município.

Para a cidade de Rio Claro, também no interior de São Paulo, Braz (2001) determinou as características físicas dos resíduos sólidos domiciliares depositados no aterro da cidade e obteve os seguintes resultados: 61,2% de matéria orgânica, 5% de plásticos, 15% de papel e papelão, 3,9% de metais, 4,5% de vidro, 2,8% de têxteis e 8,8% correspondentes à categoria “outros”, que também incluiu as embalagens tetrapak. O pico máximo de geração de biogás representou uma produção de 5.626.106 m³ no ano, correspondendo, em termos de energia, a 6,38 MW.

Geração e manejo de RSU no mundo

Mensurar a quantidade de resíduos gerada mundialmente é um processo complexo e depende de diversos fatores, como a imensa quantidade de lixo que é gerada quando se trata do assunto em âmbito mundial, levando em consideração a escassez de dados devido à falta de controle de geração e coleta desses resíduos em países que não possuem políticas eficientes de gerenciamento do lixo (ABRELPE, 2007).

Segundo OLIVEIRA (2006) estima-se que a população mundial esteja gerando por volta de 570 milhões de toneladas de lixo por ano, sendo os Estados Unidos o maior gerador, com aproximadamente 210 milhões de toneladas por ano, seguido por Japão, com 100 milhões de ton.ano⁻¹, Inglaterra, com 40 milhões de ton/ano, França e Alemanha, ambas com 30 milhões de ton.ano⁻¹.

A Figura 1 apresenta a comparação das quantidades de RSU coletadas anualmente nos diferentes países e regiões.

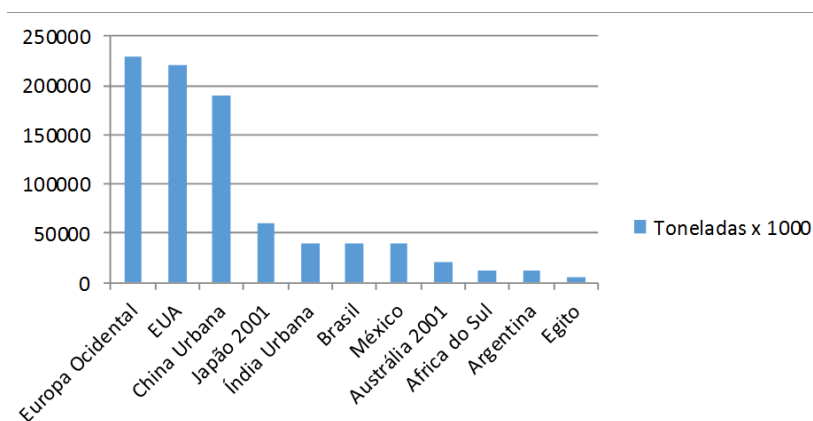


Figura 1. RSU coletados anualmente pelo mundo

Fonte: ABRELPE (2007).

Os países mais ricos e desenvolvidos são os que mais consomem materiais e produzem mais resíduo. Juntos, representam 20% da população mundial e utilizam mais de 60% da matéria-prima industrial consumida globalmente (FERRAZ, 2008).

A Figura 2 apresenta a geração *per capita* por ano de alguns países europeus segundo a European Commission (2003) *apud* LOPES (2007).

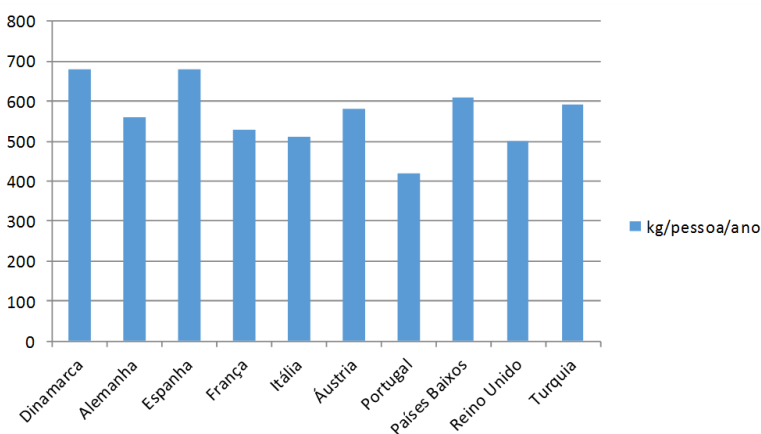


Figura 2. Resíduos sólidos urbanos gerados em países europeus.

Fonte: European Commission (2003) *apud* LOPES (2007).

Observando-se a tabela 2, nota-se que o maior percentual de produção de resíduos orgânicos (principal gerador de biogás) se encontra em países de renda mais baixa.

Tabela 2. Composição dos RSU classificada por faixas de renda da população.

| Composição dos RSU (%) | Países com Baixa Renda (Índia, Egito, Países Africanos) | Países com Média Renda (Argentina, Brasil, Singapura, Tailândia) | Países com Alta Renda (EUA, Europa Ocidental, Hong Kong) |
|------------------------|---|--|--|
| Orgânicos | 50 – 80 | 20 – 65 | 20 – 40 |
| Papel e Papelão | 4 – 15 | 15 – 40 | 15 – 50 |
| Plásticos | 5 – 12 | 7 – 15 | 10 – 15 |
| Metais | 1 – 5 | 1 – 5 | 5 – 8 |
| Vidro | 1 – 5 | 1 – 5 | 5 – 8 |

Fonte: Adaptado de ABRELPE (2007).

O resíduo gerado deve ter um tratamento e disposição final, que varia de acordo com a história, cultura e a geografia de cada país. Nos EUA, por exemplo, cerca de 57% do lixo gerado vai para aterros, 28% é reciclado, recuperado e 15% é incinerado. (ABRELPE, 2007).

No mundo as duas principais rotas de destinação final dos resíduos são os aterros sanitários e a incineração, sendo a última bastante utilizada nos países desenvolvidos, apesar do esforço feito na reciclagem (LOPES, 2007). A Figura 3 mostra as formas de gerenciamento de resíduos adotadas nos países europeus.

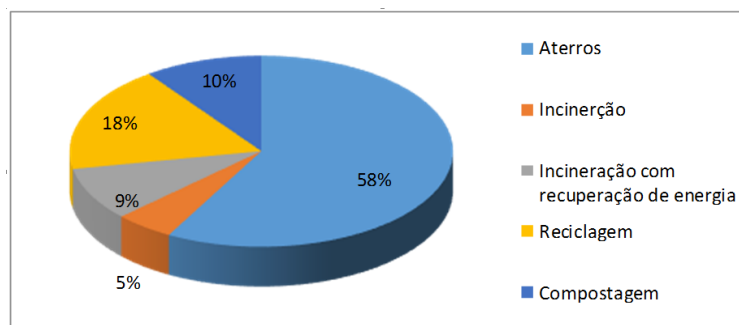


Figura 3. Gerenciamento dos RSU em países europeus.

Fonte: Williams (2005) *apud* LOPES (2007).

A maior parte dos resíduos sólidos gerados globalmente é destinada a aterros, muitas vezes inadequados, propiciando a liberação descontrolada de gás metano (CH_4) na atmosfera. Este, resultante do processo de decomposição do material orgânico presente no lixo, é cerca de 20 vezes mais poluente que o dióxido de carbono (CO_2) (RODRIGUES, 2008). O metano (CH_4) resultante do processo de decomposição é 21 vezes mais poluente que o dióxido de carbono (CO_2), segundo a Agenda 21 (COMPERJ,2011).

Se captado, o gás metano pode ser utilizado para geração de energia elétrica através de sua combustão como solução para o problema de sua emissão em aterros, além de substituir o uso de combustíveis fósseis usados para tal fim (PNUD. 2005).

Geração e manejo de RSU no Brasil

De acordo com fontes, tais como Perez (2004) e Monteiro *et al* (2001), pode-se notar que os brasileiros produzem em média 700g de lixo por dia, podendo chegar a aproximadamente 1 kg dependendo do local onde moram ou do seu poder aquisitivo. Segundo o IBGE, a produção *per capita* no Brasil em 2000 era de 0,74 kg/hab/dia e a produção diária total de lixo era de 125.300 toneladas. Em 2009, a ABRELPE determinou que a geração *per capita* média brasileira foi de 1,01 kg/hab/dia.

A destinação final do lixo no Brasil é de 50,8% em lixões, 22,5% em aterros controlados, 27,7% em aterros sanitários, conforme a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (IBGE, 2008), como observado na Figura 4.

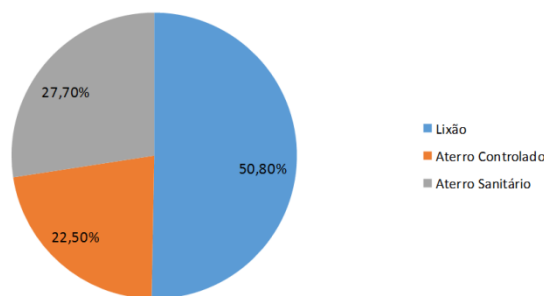


Figura 4. Disposição final dos RSU no Brasil.

Fonte: IBGE (2008).

Nos lixões, os resíduos são depositados diretamente sobre o solo, sem medidas sanitárias nem preparação do solo, representando nocividade ao ambiente e à população. Nos aterros controlados, apesar de haver certa preparação e gerenciamento, ainda não há cuidado com os líquidos e gases gerados pela decomposição do lixo, sendo também considerada uma alternativa inadequada (FERRAZ, 2008; RODRIGUES, 2008).

Na maioria dos municípios brasileiros, a disposição do lixo é feita de maneira inadequada e não recebe tratamento, sendo poucos os que possuem aterro sanitário (LOPES, 2007).

Panorama dos RSU no município de Piracicaba

O município de Piracicaba, localizado no interior do estado de São Paulo, fica a aproximadamente 170 km da capital e sua população é de 364.571 habitantes, segundo dados do IBGE (2010), e a taxa de crescimento populacional de 1,38% ao ano (IPPLAP, 2010).

Em 2010, foram coletadas 100.832 toneladas de resíduos domiciliares, o que caracteriza um aumento de aproximadamente 20.000 toneladas de lixo com relação ao ano de 2001 (IPPLAP, 2010). Isso fica claro quando se observa o aumento populacional de 334.402 habitantes em 2001 para 364.571 em 2010 (IBGE, 2010).

Quanto ao modelo de gestão de resíduos sólidos de Piracicaba, até 1976 os resíduos eram depositados em um lixão no bairro Pau Queimado, fossem urbanos, industriais ou até mesmo advindos de serviços de saúde. Então, a CETESB interviu para que o lixão sofresse obras de adequação ambiental. Em janeiro de 2007, todos os resíduos da cidade passaram a ser enviados para um aterro privado em Paulínia, cidade vizinha, devido ao esgotamento físico e falta de condições operacionais do aterro de Piracicaba. A despesa anual do município com a disposição dos resíduos no aterro sanitário em Paulínia é de aproximadamente R\$ 5.976.000,00. A despesa anual total com a limpeza urbana atinge a ordem de R\$ 19.640.864,00 (PIRACICABA, 2011).

No Quadro 1, constam as entidades que assumem a responsabilidade por cada tipo de resíduo gerado no município de Piracicaba (SEDEMA, 2011).

Quadro 1. Gestão de resíduos sólidos de Piracicaba.

| TIPO DE RESÍDUO | ORIGEM | RESPONSABILIDADE |
|---------------------|--|--|
| Doméstico | Residências | Prefeitura Municipal e empresa licitada |
| Coleta Seletiva | Materiais recicláveis descartados pelas residências | Prefeitura Municipal e Cooperativa Reciclador Solidário |
| Comercial | Descarte do comércio em geral | Prefeitura Municipal e empresa licitada |
| Público | Limpeza urbana, poda, etc. - Construção civil | Prefeitura Municipal e empresas licitadas |
| Domiciliar especial | - Pneus - Pilhas e baterias - Lâmpadas fluorescentes | Prefeitura Municipal, empresas de caçambas, parceria com a ACIPI |
| Fontes especiais | Serviços de saúde e terminais rodoviários | Prefeitura Municipal e empresas licitadas |

Fonte: SEDEMA (2011).

Alternativas de manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos

A forma como os resíduos são descartados no meio ambiente pode causar danos e perdas irreparáveis e seus efeitos podem ser considerados crescentes em relação ao tempo. Tendo isso em mente, nota-se a grande necessidade em se desenvolver tecnologias de gerenciamento de RSU para sanar esse problema (SILVA, 2008). Segundo SABIÁ (2005), várias são as rotas a serem tomadas pelos resíduos sólidos, dependendo do tratamento empregado. Todas as possibilidades apresentadas levam à produção de energia, como pode ser observado na Figura 5.

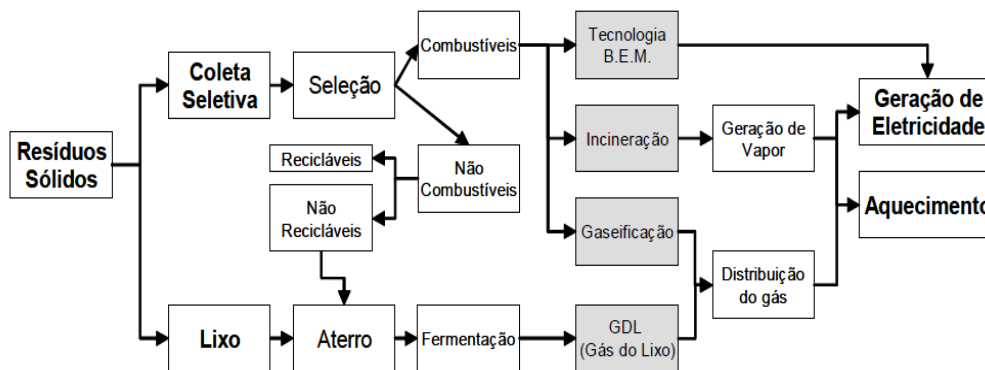


Figura 5. Rotas energéticas dos resíduos sólidos.

Fonte: SABIÁ (2005).

Coleta seletiva e Reciclagem

A coleta seletiva é um processo de separação e recolhimento de resíduos conforme sua constituição de forma a desviá-los das áreas de disposição final para as centrais de triagem. Essa separação pode ocorrer tanto na fonte geradora quanto nos centros de triagem ou reciclagem (LOPES, 2007).

Papéis, vidros e plásticos, que compõem 40% do lixo doméstico, podem ser reciclados, prolongando a vida útil dos aterros e implicando numa redução significativa da poluição ambiental (OLIVEIRA, 2006).

Gaseificação

A gaseificação, de acordo com SÁNCHEZ (2003), é definida como a conversão da biomassa, ou de qualquer combustível sólido, em um gás energético, através da oxidação parcial a temperaturas elevadas.

A gaseificação é um processo termoquímico em que se converte biomassa em gás combustível por oxidação com ar, oxigênio ou vapor de água em altas temperaturas, na faixa de 800 a 900° C (RODRIGUEZ, 2007).

Segundo Martins (2006), “o poder calorífico dos gases combustíveis derivados da biomassa são baixos, entre 5 e 6 MJ/Nm³, quando comparados ao de outros combustíveis, como destilados e o gás natural, entre 35 e 40 MJ/Nm³.” Parte do combustível entra em combustão como em uma fornalha qualquer e a característica principal da gaseificação é que o fornecimento de ar é controlado de modo a evitar que a combustão se estenda a toda a carga.

Os resíduos sólidos são descarregados e armazenados em ambiente com pressão negativa para a redução da emissão de odores e os líquidos são drenados para uma estação de tratamento de efluentes. (RODRIGUEZ, 2007).

As etapas desse processo são descritas por Martins (2006) e Rodriguez (2007), sendo elas:

- *Secagem da biomassa:* apresenta um controle de temperatura para garantir a secagem da biomassa e não a sua decomposição.

- *Pirólise:* é a decomposição química por calor na ausência de oxigênio que resulta num resíduo carbonoso. Os resíduos que alimentam o reator pirolítico podem ser provenientes do lixo doméstico, do processamento de plásticos e industriais. O processo consiste da trituração destes resíduos, previamente selecionados. Após esta etapa, os resíduos são destinados ao reator pirolítico, onde através de uma reação endotérmica ocorrerão as separações dos subprodutos em cada etapa do processo que fornecem a energia necessária para os processos seguintes. As reações de pirólise começam a ocorrer a temperaturas em torno de 400° C.

- *Combustão:* combinação de uma fonte combustível com o oxigênio, sendo esse processo em geral exotérmico e autossustentável. A reação de combustão ocorre em torno de 900 e 1300°C. Nesta etapa, o resíduo carbonoso reage com oxigênio, vapor de água, gás carbônico e hidrogênio, que por sua vez reagem entre si, resultando numa mistura final de gás.

- *Redução*: Os gases quentes da zona de combustão passam em seguida para a zona de redução, sempre adjacente, acima ou abaixo, onde na ausência de oxigênio ocorre o conjunto de reações típicas que originam os componentes combustíveis do gás produzido.

Esse gás produzido tem várias aplicações práticas, desde a combustão em motores ou em turbinas para a geração de potência, energia elétrica, bombas de irrigação, para a geração direta de calor, ou para matéria prima na síntese química da amônia e do metano. E quando produzindo eletricidade, calor ou gás (também chamado de *gás producer – gás produto*), deve competir com a combustão direta de biomassa, combustíveis fósseis e outros combustíveis alternativos (SÁNCHEZ, 2003).

A figura 8 apresenta as reações que ocorrem durante o processo de gaseificação, bem como as zonas térmicas dentro de um reator.

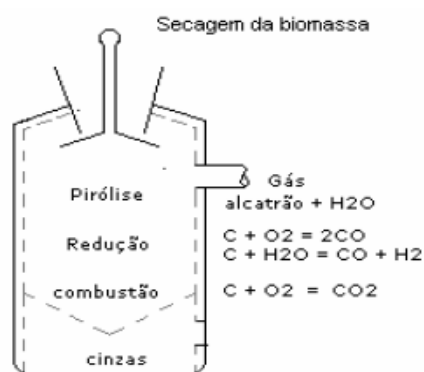


Figura 8. Esquema de reações do processo de gaseificação.

Fonte: MARTINS (2006).

As principais vantagens da gaseificação são a alta eficiência térmica, variando de 60% a 90%, dependendo do sistema implementado, energia limpa produzida com a queima dos gases, e controle sobre a demanda de energia e taxa de gaseificação (MARTINS, 2006).

Aterros

Os aterros são a forma mais utilizada atualmente de disposição final de resíduos sólidos urbanos devido ao baixo custo e simplicidade de execução, além da capacidade de acolher grandes quantidades de lixo (ENSINAS, 2003).

Porém, na maioria das vezes, esses aterros funcionam de forma inadequada, os conhecidos lixões, onde os resíduos são descartados de forma descontrolada e sem medidas de proteção ambiental e à saúde pública. Isso pode causar problemas ambientais como a contaminação de águas subterrâneas e do ar, pela infiltração do chorume e pela emissão de gases

advindos da degradação do lixo. Outro problema constante diz respeito à disponibilidade de áreas onde possam funcionar os aterros (ENSINAS, 2003; FERRAZ, 2008; RODRIGUES, 2008).

Lixões - Nos lixões, forma mais comum de disposição final de lixo na maioria das cidades de países em desenvolvimento, são depositados a céu aberto e de forma inadequada todos os tipos de resíduos coletados nas cidades. Esse tipo de disposição acarreta prejuízos à sociedade, tanto em questões de saúde pública, como sociais, além do elevado potencial poluidor devido à decomposição da matéria orgânica contida nos resíduos (RODRIGUES, 2008).

Aterros controlados - Os aterros controlados geralmente são lixões reformados onde o lixo é tecnicamente confinado sem poluir o ambiente externo e faz cobertura destes com material inerte no fim de cada dia (RODRIGUES, 2008), porém não dispõem de impermeabilização da base para evitar infiltrações no solo e águas subterrâneas, nem de sistemas de tratamento de percolado e do biogás gerado (ENSINAS, 2003). Mesmo que atenda a legislação, também é considerada inadequada devido, principalmente, ao potencial poluidor do solo e das águas subterrâneas, já que o chorume, líquido tóxico e altamente poluente, não é coletado e tratado (FERRAZ, 2008).

Aterros sanitários - Segundo a ABNT (1992), os aterros sanitários são a forma mais adequada de disposição do lixo no solo e tem por função não causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. É um método baseado em princípios da engenharia, que consiste em confinar os resíduos em uma área o menor possível e reduzir seu volume ao máximo permitido, sendo cobertos por uma camada de terra no final de cada jornada de trabalho, que irá proteger os resíduos do espalhamento pelo vento e da ação de ratos e moscas. Também são drenados e tratados todos os efluentes (chorume, gases) através de sistemas de drenagem e impermeabilização do fundo e laterais. Tudo isso ocorre dentro da legislação ambiental e se fundamenta em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permitindo um confinamento seguro do resíduo e visando ao máximo a proteção da saúde pública e do ambiente.

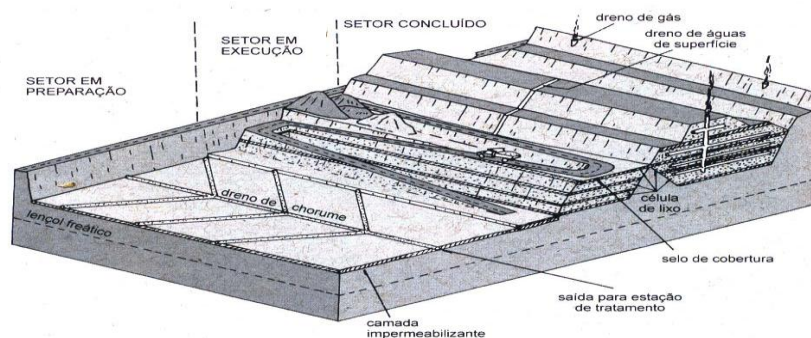


Figura 9. Esquema de operação de um aterro sanitário.

Fonte: D'Almeida & Vilhena (2000).

Biogás

O biogás é um gás incolor, insolúvel em água e de baixa densidade resultante da fermentação dos resíduos orgânicos depositados no aterro, e seu principal componente é o metano, gás poluente que contribui fortemente para o efeito estufa e que possui alto poder calorífico, podendo ser usado como combustível (PIEROBON, 2007).

O biogás deve ser captado para aproveitamento energético ou, quando a sua produção for inferior ao economicamente rentável, queimado a temperaturas superiores a 1000° C para reduzir a sua periculosidade na atmosfera. Devido ainda às altas concentrações de metano no biogás, existe o risco de incêndios e até mesmo explosões em instalações próximas aos aterros, como ocorreu com o Osasco Plaza Shopping em 1996, na Grande São Paulo, que foi construído encima de um aterro encerrado. O limite explosivo do metano encontra-se entre 5 e 15 % no ar à pressão atmosférica e à temperatura ambiente (RUSSO, 2005).

Composição do biogás

O biogás de aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos é composto por vários gases, sendo o gás metano (CH₄) e o dióxido de carbono (CO₂) seus principais constituintes. Outros componentes são o gás sulfídrico (H₂S), o hidrogênio (H₂), o oxigênio (O₂), a amônia (NH₃) e o nitrogênio (N₂), além de outros gases (CETESB, 2011). Tchobanoglous *et al* (1993) elaboraram uma tabela (3) e (4) com a composição média do biogás, baseados em estudos com resíduos.

Tabela 3. Composição básica do biogás de aterro.

| Composição | Porcentagem (Base seca) |
|-----------------------------|-------------------------|
| Metano | 45-60 |
| Dióxido de Carbono | 40-60 |
| Nitrogênio | 2-5 |
| Oxigênio | 0,1-1 |
| Enxofre. Mercaptanas | 0-1 |
| Amônia | 0,1-1 |
| Hidrogênio | 0-0,2 |
| Monóxido de Carbono | 0-0,2 |
| Gases em menor concentração | 0,01-0,6 |

Fonte: Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993) *apud* Ensinas, 2003.

Tabela 4. Gases “Traços”.

| Composto | Concentração Máxima (ppbV) |
|-------------------|----------------------------|
| Diclorometano | 620.000 |
| Tolueno | 280.000 |
| Acetona | 240.000 |
| Acetato de Vinila | 240.000 |
| Tetracloroetileno | 180.000 |
| Metil Etil Cetona | 130.000 |
| Etil Benzeno | 87.500 |
| Estirenos | 87.000 |
| Benzeno | 39.000 |
| Xilenos | 38.000 |

Fonte: Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993) adaptado por Erler (2010).

As principais características do gás metano foram apresentadas por Castilhos (2000) e são demonstradas na tabela 5.

Tabela 5. Principais características do gás metano.

| Propriedade | Valor | Unidade |
|-------------------------|---------------|---------------------|
| Massa Molar | 16 | g/mol |
| Densidade Específica | 0,744 | Kg/Nm ³ |
| Massa do gás seco | 645 | g/m ³ |
| Massa do gás liquefeito | 350 | g/l |
| Inflamabilidade no ar | 5 a 15 | % em volume |
| Poder calorífico | 8.900 a 9.700 | Kcal/m ³ |

Fonte: Castilhos (2000).

Potencial de produção de biogás em aterros

Algumas metodologias para estimativa teórica da produção de gás metano em locais de deposição de resíduos sólidos urbanos são encontradas na literatura. (ENSINAS, 2003).

Estimativa por Aproximação Simples - Uma aproximação grosseira da produção de biogás pode ser estimada facilmente utilizando-se a quantidade de lixo no local como a única variável. Esse procedimento é derivado da relação entre a quantidade de lixo e o fluxo de gás observado (USEPA, 1996). São sugeridas taxas de geração de 0,312 a 1,249 m³/(kg lixo x ano) com geração média de 0,624 m³/(kg lixo x ano) (ENSINAS, 2003).

Geração anual de gás metano:

$$G_{CH_4} = Gr \times Q_L \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

G_{CH_4} : geração anual de gás metano (m³/ano)

Gr: taxa de geração de gás metano (m³/kg lixo x ano)

Q_L : quantidade de lixo depositada no local (kg)

Esse método apresenta grande imprecisão, pois considera o potencial de geração de biogás de um resíduo como uma média pré-estabelecida sem considerar os outros fatores que influenciam nessa geração (ERLER, 2010).

Portanto, esse método só dever ser usado primariamente como uma ferramenta de triagem para determinar se uma avaliação mais detalhada é necessária (USEPA, 1996).

Estimativa por Método do Inventário - Método proposto pelo IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) estima a quantidade de carbono orgânico degradável presente no lixo, calculando assim a quantidade de metano que pode ser gerada por determinada quantidade de resíduo depositado, considerando diferentes categorias de resíduos sólidos domésticos (USEPA, 1996). Esse modelo foi desenvolvido com a finalidade de estimar a emissão de gases do efeito estufa em cidades e centros urbanos, por isso seu uso para a estimativa de geração de metano em aterros é limitado (ERLER, 2010).

Emissão anual de gás metano:

$$E_{CH_4} = \frac{(PU \times RSD \times RSDf \times Lo)}{p_{CH_4}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

E_{CH_4} : emissão de gás metano (ton de CH₄ / ano);

PU: população urbana (nº de habitantes);

RSD: taxa de geração de resíduos sólidos urbanos por pessoa por ano (ton de RSU/habitante/ano);

RSDf: taxa de resíduos coletados e dispostos no aterro (%);

Lo: potencial de geração de metano (ton de CH₄/ton de RSU);

R: metano reaproveitado (ton de CH₄/ano);

p_{CH_4} : massa específica do metano (kg/m³)

O potencial de geração de metano, L_0 , pode ser calculado pela seguinte equação, conforme a metodologia do IPCC (1996):

Potencial de geração de metano:

$$L_0 = FCM \times COD \times COD_f \times F \times (16/12) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

L_0 : potencial de geração de metano (ton de CH_4 /ton de RSU);

FCM: fator de correção de metano;

COD: carbono orgânico degradável (ton de C/ton de RSU);

COD_f : fração de COD disponível (%);

F: fração de metano contido no biogás (%);

(16/12): fator de conversão do carbono em metano (ton de CH_4 /ton de C);

O fator de correção (Tabela 6) de metano avalia a qualidade da disposição e aterramento do lixo considerando o fato de que esta interfere na quantidade de metano produzido. Se o resíduo é aterrado de forma inadequada, produz menos metano que aquele disposto em locais adequados.

Tabela 6. Fatores de correção de metano.

| Tipo de local | FCM |
|-------------------------------------|-----|
| Adequado | 1,0 |
| Inadequado – profundo (>5m de lixo) | 0,8 |
| Inadequado – raso (<5m de lixo) | 0,4 |
| Não conhecido | 0,6 |

Fonte: CETESB, 2003.

Calcula-se a quantidade de carbono orgânico degradável (COD – Tabela 7) através da equação elaborada pelo IPCC (1996) que se baseia na composição do lixo de na quantidade de carbono em cada componente dos RSU.

Tabela 7. Teor de COD para cada componente do lixo.

| Componente | Porcentagem COD (em massa) |
|----------------------------------|----------------------------|
| A. Papel e papelão | 40 |
| B. Resíduos de parques e jardins | 17 |
| C. Restos de alimentos | 15 |
| D. Tecidos | 40 |
| E. Madeira | 30 |

Fonte: Birgerner & Crutzen (1987).

Carbono orgânico degradável:

$$COD = (0,4 \times A) + (0,17 \times B) + (0,15 \times C) + (0,40 \times D) + (0,3 \times E) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

A: fração de papel e papelão no lixo

B: fração de resíduos de parques e jardins no lixo

C: fração de restos de alimentos no lixo

D: fração de tecidos no lixo

E: fração de madeira no lixo

A fração de carbono disponível para decomposição química, COD_f, pode ser calculada pela seguinte equação:

Carbono disponível para decomposição química:

$$\text{COD}_f = 0,014 \times T + 0,28 \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

T: temperatura da zona anaeróbica (°C) (30°C a 35°C)

Método do Decaimento de Primeira Ordem - O Método de Decaimento de Primeira Ordem (USEPA, 1997; IPCC, 1996) considera a geração de metano por uma quantidade de resíduo depositada no aterro durante os anos posteriores. A cada ano uma nova quantidade de resíduo é depositada no aterro, portanto a quantidade de metano gerada em um ano T será igual à geração do resíduo depositado no ano x somado às gerações dos resíduos ainda não degradados depositados nos anos anteriores (ERLER, 2010).

Quantidade de metano gerada no ano T:

$$Q_t = F \times R_x \times k \times L_o \times e^{-k(T-x)} \quad \text{Equação 6:}$$

Onde:

Q_t: metano gerado no ano T (m³ / ano);

F: fração de metano no biogás (%);

R_x: quantidade de resíduo depositada no ano x (kg);

k: constante de decaimento (1/ano);

L_o: potencial de geração de biogás (m³ / kg de resíduo);

T = ano atual;

x = ano de deposição do resíduo;

Esse método utiliza uma constante denominada constante de decaimento (k), que é função de fatores como disponibilidade de nutrientes, pH, temperatura e umidade (MENDES *et al*, 2007).

Constante de decaimento:

$$k = \ln 2 / t_{1/2} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

k: constante de decaimento (1/ano);

t_{1/2}: tempo necessário para a massa de COD_f decair pela metade (anos);

Os valores sugeridos para k podem variar de 0,01 a 0,09/ano (MENDES *et al*, 2007) conforme sugerido por World Bank (2003).

METODOLOGIA

Adotou-se metodologia baseada em amostragem apresentada por Carvalho (2005), objetivando a valorização orgânica e energética dos resíduos através da obtenção de dados quantitativos e de sua composição física. A partir daí, pode-se avaliar a possibilidade de aproveitamento energético eficiente desses resíduos e operações de reciclagem que podem ser aplicadas. Neste método, a amostra é retirada diretamente dos fluxos dos resíduos e triada manualmente em categorias, sendo depois pesadas. Deve-se observar que este método fornece apenas uma visão parcial da totalidade de resíduos. A coleta das amostras foi realizada em âmbito local, em seis bairros do município de Piracicaba. Os pontos de coleta foram aleatórios e não repetidos. Como proposto por Oliveira (1999), conforme o Quadro 2.

Para uma maior abrangência e representatividade foram selecionados seis bairros com índice médio à alto de concentração populacional, considerando-se também suas características socioeconômicas, segundo dados do IPPLAP (2003), sendo: um bairro residencial de classe baixa, um de classe média, dois de classe média-baixa, um de classe alta e um bairro comercial.

Quadro 2 -. Bairros, setor gerador e níveis socioeconômicos da população.

| Bairro | Setor | Nível socioeconômico |
|--------|-------------|----------------------|
| A | Residencial | Alto |
| B | Residencial | Médio |
| C | Residencial | Médio - Baixo |
| D | Residencial | Médio - Baixo |
| E | Residencial | Baixo |
| F | Comercial | - |

Fonte: Adaptado de Oliveira (1999).

A separação dos componentes das amostras se deu nas seguintes categorias: matéria orgânica, papel (papel e papelão), metal (alumínio e aço), plástico, vidro, têxteis, embalagens tetrapak e outros. Na categoria “outros” foram considerados materiais como pilhas, baterias, eletrônicos, espuma e isopor, lâmpadas, seringas, lâminas de barbear, borracha, aerossol, produtos tóxicos e materiais inertes.

A triagem dos componentes das amostras foi realizada em cada dia posterior à data da coleta e feita manualmente sobre uma chapa metálica, utilizando-se de luvas de borracha por baixo de luvas reforçadas e aventais de PVC para proteção individual. Tendo sido feita a separação, cada componente foi pesado em balança eletrônica, dentro de sacos plásticos, cujo peso foi tarado, para posterior determinação da percentagem em peso e quantificação dos componentes.

Para o cálculo do potencial de geração de biogás no aterro, foi escolhida a metodologia sugerida pelo IPCC, o Método do Inventário, e usado o Simulador de Potencial de Biogás desenvolvido pela CETESB. Utilizando-se do mesmo software, e dos dados obtidos através da metodologia do IPCC, calculou-se a vazão de biogás e a potência gerada em kWh.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Caracterização física dos resíduos sólidos urbanos

Analisando os resíduos sólidos urbanos dos seis bairros, notou-se que em todos eles há predominância de matéria orgânica em relação aos outros componentes. Dessa parcela, quando decomposta no aterro, resultará o biogás, que poderá ser usado para gerar eletricidade. Papeis (quando não contaminados ou sujos), plásticos, vidros, metais e embalagens tetrapak podem ser reaproveitados em processos de coleta seletiva e reciclagem, ou ainda, com exceção dos metais, utilizados na geração de energia por processos de gaseificação. Materiais especiais, considerados na categoria “outros”, devem receber tratamento adequado e a população conscientizada sobre o descarte e políticas de logística reversa.

As características físicas dos RSU de cada bairro estudado são apresentadas na tabela 11.

Tabela 11. Características físicas dos RSU de cada bairro estudado.

| Composição do RSU [%]/ Bairro | Bairro A | Bairro B | Bairro C | Bairro D | Bairro E | Bairro F | Média |
|-------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|--------------|
| Orgânico | 73,04 | 81,02 | 85,20 | 80,53 | 79,23 | 74,49 | 78,92 |
| Plástico | 9,22 | 10,01 | 5,80 | 11,02 | 9,48 | 12,23 | 9,63 |
| Papel | 5,37 | 0,44 | 0,75 | 1,51 | 0,77 | 6,21 | 2,51 |
| Metal | 2,04 | 1,40 | 1,92 | 2,22 | 1,95 | 1,73 | 1,88 |
| Vidro | 7,12 | 2,36 | 1,61 | 0,16 | 0,56 | 0,67 | 2,08 |
| Têxteis | 1,97 | 1,18 | 0,96 | 1,67 | 2,11 | 2,04 | 1,65 |
| Tetra Pak | 0,44 | 0,76 | 0,99 | 1,09 | 1,96 | 1,36 | 1,10 |
| Outros | 0,80 | 2,82 | 2,77 | 1,82 | 3,94 | 1,26 | 2,24 |

Como se observa na tabela anterior, a parcela de material orgânico (78,92%) é superior à do restante dos componentes (21,08%), revelando o grande potencial de geração de biogás em aterros onde esse lixo possa ser depositado. É importante destacar que essa análise fornece apenas uma visão parcial da totalidade dos resíduos devido ao número limitado de amostras e ao curto tempo de estudo. Para a implantação de um projeto de reaproveitamento energético do

biogás devem ser feitos estudos mais aprofundados e abrangentes dos resíduos gerados pelo município, levando em conta diversos outros fatores não tratados nesse trabalho.

A comparação entre os resultados obtidos neste trabalho com os resultados obtidos por Ensinas (2003), Braz (2001) e Frésca (2007) para as cidades de Campinas, Rio Claro e São Carlos, respectivamente, é demonstrada na Tabela 12.

Tabela 12. Comparação das características dos RSU de Piracicaba com outras três cidades.

| Componente do Resíduo | Percentual em massa (%) | | | |
|-----------------------|-------------------------|----------|-----------|------------|
| | PIRACICABA | CAMPINAS | RIO CLARO | SÃO CARLOS |
| Matéria orgânica | 79,38 | 46,26 | 61,20 | 59,08 |
| Plástico | 9,44 | 13,21 | 5,00 | 10,47 |
| Papel | 2,28 | 29,76 | 15,00 | 6,44 |
| Metal | 1,87 | 4,86 | 3,90 | 1,31 |
| Vidro | 1,98 | 3,36 | 4,50 | 1,67 |
| Têxteis | 1,61 | * | 2,80 | * |
| Tetra Pak | 1,11 | * | * | 0,94 |
| Outros | 2,33 | 2,55 | 7,6 | 20,09 |

*os componentes foram considerados na categoria "outros".

Cálculo do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos

Cálculo da estimativa da vazão de biogás através do Método do Inventário:

- *Cálculo de carbono orgânico degradável, COD:*

$$\text{COD} = (0,40 \times 0,0228) + (0,16 \times 0,7938)^* + (0,40 \times 0,0161)$$

$$\text{COD} = 0,1425 \text{ kg de C/kg de RSU}$$

*Restos de parques e jardins, madeira e restos de alimentos foram considerados na mesma categoria: matéria orgânica.

- *Cálculo da fração de carbono disponível para decomposição química, CODf:*

$$\text{CODf} = 0,014 \times 35 + 0,28$$

$$\text{CODf} = 0,77$$

- *Cálculo do potencial de geração de metano, Lo:*

$$\text{Lo} = 1,0 \times 0,1425 \times 0,77 \times 0,55 \times (16/12)$$

$$\text{Lo} = 0,080465 \text{ kg de CH}_4/\text{kg de RSU}$$

O fator de correção de metano, FCM, foi considerado 1,0 (lixo disposto de forma adequada no aterro sanitário privado em Paulínia); a fração de metano no biogás, F, foi considerada 55% (não purificado).

- *Cálculo da emissão total de metano, E_{CH4}:*

$$E_{\text{CH}_4} = \frac{364571 \times (0,74 \times 365) \times 0,88 \times 0,080465}{0,74}$$

$$0,74$$

$$E_{\text{CH}_4} = 9.422.468 \text{ m}^3\text{CH}_4/\text{ano}$$

5.2.2 Cálculo da estimativa da vazão de biogás através do software “Simulador de Potencial de Biogás” da CETESB:

Dada a precipitação anual de Piracicaba como sendo maior que 1000 mm, o valor da constante de decaimento, k , é de 0,09.

Para determinar o fluxo de resíduos (ton/ano), considerou-se um período de vinte anos de funcionamento do aterro (2010 a 2030), uma taxa de crescimento populacional de 1,38% ao ano, a população atual do município de 364.571 habitantes, que geram 0,74kg de resíduos por dia por habitante, sendo 0,27 toneladas ao ano. A taxa de coleta de resíduo foi considerada 88%, como sugerido pelo simulador. O resultado foi de 91.589 ton.ano⁻¹.

Para a estimativa da vazão de biogás, os valores da linha de base de queima, energia elétrica evitada, eficiência de coleta de biogás e eficiência de queima de biogás foram usados como sugerido pelo simulador, apresentados na figura a seguir:

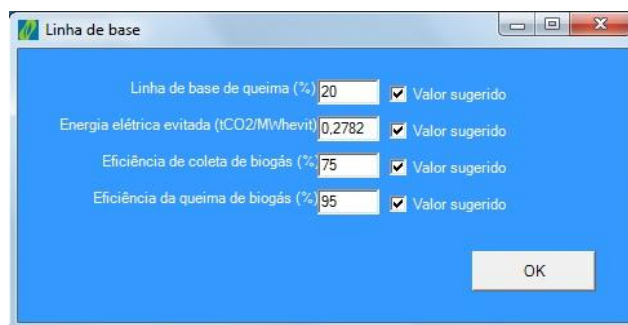


Figura 14. Valores para cálculo da vazão de biogás

Fonte: Simulador de Potencial de Biogás, CETESB.

A partir desses valores, o simulador calculou a vazão do biogás no período determinado, gerando o seguinte gráfico apresentado na Figura 15.

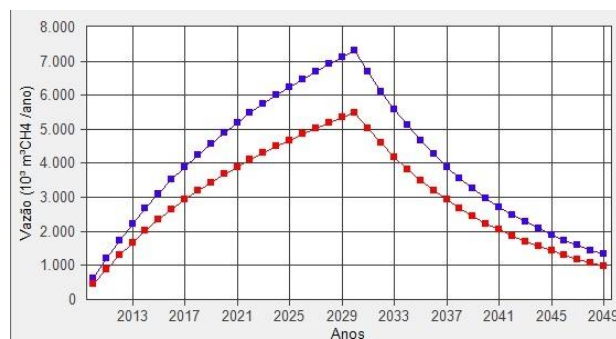


Figura 15. Vazão de metano ao longo do tempo.

Fonte: Simulador de Potencial de Biogás, CETESB.

A linha azul representa a vazão de metano (10³ m³/ano) e a linha vermelha representa o volume coletado a uma taxa de coleta de 75%. O valor máximo estimado pelo simulador foi de

aproximadamente 7.326.000 m³CH₄/ano, que é inferior ao valor obtido pelo método proposto pelo IPCC, que foi de 9.422.468 m³CH₄/ano. A mesma simulação foi feita para os resíduos das cidades de Campinas, Rio Claro e São Carlos, a partir dos dados da Tabela 12.. A Tabela 13 apresenta uma comparação entre os valores obtidos para Piracicaba e os valores de outras três cidades.

Tabela 13. Vazão de biogás ao longo do tempo.

| Ano | Vazão (10 ³ m ³ /ano) | | | |
|------|---|----------|-----------|------------|
| | PIRACICABA | CAMPINAS | RIO CLARO | SÃO CARLOS |
| 2010 | 619 | 2.490 | 376 | 189 |
| 2013 | 2.222 | 8.902 | 1.344 | 689 |
| 2017 | 3.898 | 15.510 | 2.338 | 1.238 |
| 2021 | 5.199 | 20.537 | 3.089 | 1.697 |
| 2025 | 6.247 | 24.479 | 3.673 | 2.100 |
| 2029 | 7.126 | 27.683 | 4.144 | 2.472 |
| 2030 | 7.326 | 28.399 | 4.249 | 2.563 |
| 2033 | 5.593 | 21.679 | 3.243 | 1.956 |
| 2037 | 3.902 | 15.125 | 2.263 | 1.365 |
| 2041 | 2.722 | 10.552 | 1.579 | 952 |
| 2045 | 1.899 | 7.362 | 1.101 | 664 |
| 2049 | 1.325 | 5.136 | 768 | 464 |

Fonte: Simulador de Potencial de Biogás, CETESB.

Como pode ser observado, ao longo do período em que o aterro está ativo recebendo quantidades diárias de resíduos sólidos urbanos, a produção de biogás aumenta. Isso devido à parcela de matéria orgânica que compõe o lixo depositado no aterro. A partir do momento em que o aterro é encerrado, supostamente em 2030, a taxa de geração de biogás passa a decrescer, já que não há mais disposição de resíduos no mesmo.

Observa-se que a vazão de metano é superior na cidade de Campinas e isso se dá devido à sua maior população e conseqüente maior geração de lixo. Piracicaba, Rio Claro e São Carlos apresentam valores mais próximos em função de os valores de suas populações serem parecidos.

Com relação à potência elétrica gerada, pode-se observar que ela é diretamente proporcional à vazão de biogás no aterro e decai a partir do momento em que o aterro é encerrado. A estimativa da potência gerada a partir do biogás formado dos resíduos de Piracicaba pode ser observada na Figura 16, também gerado pelo simulador da CETESB.

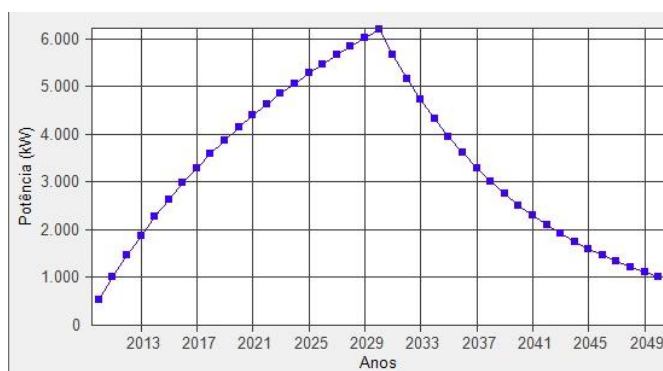


Figura 16. Potência gerada ao longo do tempo

Fonte: Simulador de Potencial de Biogás, CETESB.

Os valores do potencial energético obtidos estão expressos na Tabela 14.

Tabela 14. Potência gerada ao longo do tempo.

| Ano | Potência (kWh) | Potência (MWh) | Valor (R\$/h) |
|------|----------------|----------------|---------------|
| 2010 | 85,68 | 0,085 | 28,17 |
| 2013 | 305,59 | 0,305 | 100,49 |
| 2017 | 536,93 | 0,537 | 176,56 |
| 2021 | 716,85 | 0,717 | 235,72 |
| 2025 | 861,08 | 0,861 | 283,15 |
| 2029 | 981,04 | 0,981 | 322,59 |
| 2030 | 1009,60 | 1,009 | 331,99 |
| 2033 | 769,69 | 0,769 | 253,10 |
| 2037 | 536,93 | 0,537 | 176,56 |
| 2041 | 375,56 | 0,375 | 123,49 |
| 2045 | 261,32 | 0,261 | 85,93 |
| 2049 | 182,78 | 0,183 | 60,10 |

Fonte: Simulador de Potencial de Biogás, CETESB.

No ano de 2030, onde a vazão de metano atinge o ponto máximo, a receita gerada será de R\$ 331,99 por hora, totalizando R\$ 2.908.232,40 neste período. Esse valor poderia ser abatido dos estimados R\$ 19.640.864,00 anuais que a Prefeitura de Piracicaba gasta com a limpeza pública do município. Além disso, mais receita pode ser gerada através da gaseificação dos materiais que não contribuem efetivamente na geração de biogás nos aterros, mas possuem poder calorífico elevado.

A Tabela 15 compara o potencial energético do biogás de Piracicaba com os potenciais das cidades de Campinas, Rio Claro e São Carlos.

Tabela 15. Comparação do potencial energético do biogás de Piracicaba com o de outras três cidades.

| Ano | Potência (kWh) | | | |
|------|----------------|----------|-----------|------------|
| | PIRACICABA | CAMPINAS | RIO CLARO | SÃO CARLOS |
| 2010 | 85,68 | 342,72 | 51,41 | 25,70 |
| 2013 | 305,59 | 1226,65 | 185,64 | 94,25 |
| 2017 | 536,93 | 2136,29 | 322,73 | 169,93 |
| 2021 | 716,85 | 2828,87 | 425,54 | 234,19 |
| 2025 | 861,08 | 3371,51 | 505,51 | 289,88 |
| 2029 | 981,04 | 3812,76 | 571,20 | 339,86 |
| 2030 | 1009,60 | 3911,29 | 585,48 | 352,72 |
| 2033 | 769,69 | 2985,95 | 446,96 | 269,89 |
| 2037 | 536,93 | 2083,45 | 311,30 | 188,50 |
| 2041 | 375,56 | 1453,70 | 217,06 | 131,38 |
| 2045 | 261,32 | 1013,88 | 151,37 | 91,39 |
| 2049 | 182,78 | 706,86 | 105,67 | 64,26 |

Fonte: Simulador de Potencial de Biogás, CETESB.

Como esperado a cidade de Campinas apresenta maiores valores em comparação com as demais, porém, como já observado, isso se dá devido a sua maior população e geração de resíduo.

CONCLUSÕES

Os resíduos sólidos urbanos de Piracicaba foram caracterizados fisicamente, o que permitiu concluir que o lixo piracicabano tem grande potencial energético, ficando na frente das outras cidades analisadas, perdendo apenas para a cidade de Campinas, com população muito maior. A estimativa do potencial energético, obtida através da simulação pelo software da CETESB, confirma a importância do reaproveitamento energético dos resíduos sólidos de Piracicaba. Como demonstrado neste trabalho, a receita que pode ser gerada pela produção de energia elétrica a partir do lixo, seja pelo reaproveitamento do biogás em aterros ou por processos de gaseificação de materiais com poder calorífico expressivo que compõem esse lixo, pode abater parte das despesas geradas pela gestão de limpeza pública. O método proposto pelo IPCC gerou um resultado superior ao obtido pelo simulador, porém esse valor é menos confiável, uma vez que não considera a composição real do resíduo produzido no município e são muitas “considerações/estimativas” que aumentam o resultado teórico sem considerar as dificuldades reais.

REFERÊNCIAS

GÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Tarifas da Classe de Consumo Residencial de uma Concessionária – CPFL Paulista*. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/tarifaAplicada/index.cfm>>. Acesso em: 28/05/2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil*. São Paulo, 2007. Disponível em:

<<http://www.abrelpe.org.br>>. Acesso em: 30/03/2011.

bioenergia em revista: diálogos, ano 6, n. 1, p. 47-75, jan./jun. 2016.

MAZZONETTO, Alexandre Witier ; ROCHA, Diane Caroline; OLIVEIRA, Diego Francis Gonçalves de SILVA, Priscilla Lopes da;

Avaliação do potencial energético do resíduo sólido urbano de Piracicaba para produção de biogás

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. *NBR 10004: resíduos sólidos: classificação*. Rio de Janeiro, 2004. 71 p.

BRAZ, J. A.; Silva, C. L. **Avaliação do potencial energético de aterro gerado pelos resíduos sólidos domésticos do município de Rio Claro**. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

CARVALHO, E. M. F. D. B. **Metodologias para a quantificação e caracterização física dos resíduos sólidos urbanos**. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2005, 341 p.

CASTILHOS, A. B. B. **Gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos**. PROSAB, 2000. Disponível em <<http://www.finep.gov.br/prosab/produtos.htm>>. Acesso em: 14/03/2011.

CENTRO DE PESQUISAS METEOROLÓGICAS E CLIMÁTICAS APLICADAS A AGRICULTURA – CEPAGRI. *Clima dos municípios paulistas*. Disponível em: <<http://www.cpa.unicamp.br/>>. Acesso em: 30/05/2011.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. *Biogás – Definição*. 2011. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/mudancas-climaticas/biogas/Biog%C3%A1s/17-Defini%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 03/02/2011.

ENSINAS, A. V. *Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas SP*. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP, 2003. 129 p.

ERLER, R. *Estimativa de produção energética a partir de resíduos sólidos urbanos com auxílio de software computacional*. Faculdade de Tecnologia de Piracicaba – Centro Tecnológico Paula Souza, Piracicaba – SP, 2010. 74 p.

FERRAZ, J. L. *Modelo para avaliação da gestão municipal integrada de resíduos sólidos urbanos*. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 2008. 241 p.

FRÉSCA, F. R. C. *Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2007. 134 p.

INDEX MUNDI. Disponível em: <http://www.indexmundi.com/pt/estados_unidos/>. Acesso em: 31/03/2011

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Estimativas da população para 1º de julho de 2009*. 2009. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 29/11/2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico – 2008*. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Diretoria de Pesquisas – Departamento de População e Indicadores Sociais, Rio de Janeiro, 2010 Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 14/01/2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. *XII Censo Demográfico*. Brasil, 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br/index.php>>. Acesso em: 11/05/2011.

INSTITUTO DE PESQUISAS E PLANEJAMENTO DE PIRACICABA – IPPLAP. *Densidade demográfica por bairro - 2000*. Diretoria de estudos socioeconômicos, informações e desenvolvimento urbano e rural – Departamento de sistema de informações – Piracicaba, 2000. Disponível em: <<http://www.ipplap.com.br/docs/Densidade%20Demografica%20por%20Bairro%20-%202000.pdf>>. Acesso em: 11/05/2011.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. *Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual Vol. 3*. 1996. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch6ref1.pdf>>. Acesso em: 14/03/2011.

bioenergia em revista: diálogos, ano 6, n. 1, p. 47-75, jan./jun. 2016.

MAZZONETTO, Alexandre Witier ; ROCHA, Diane Caroline; OLIVEIRA, Diego Francis Gonçalves de SILVA, Priscilla Lopes da;

Avaliação do potencial energético do resíduo sólido urbano de Piracicaba para produção de biogás

JORNAL CIDADE – RIO CLARO. *Dados são subutilizados pelo poder público*. Ednéia Silva. Notícia de 06/05/2011. Disponível em: <<http://jornalcidade.uol.com.br/rioclaro/dia-a-dia/dia-a-dia/75557--Dados-sao-subutilizados--pelo-poder-publico-->>. Acesso em: 30/05/2011.

LIXO e meio ambiente. Usina Verde S/A. Disponível em: <<http://usinaverde.com.br>>. Acesso em: 22/11/2010.

LOPES, A. A. *Estudo da gestão integrada dos resíduos sólidos urbanos na Bacia Tietê-Jacaré (UGRHI-13)*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MARTINS, L. S. *Geração de energia através de biomassa*. Departamento de Energia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória – ES, 2006. 83 p.

MONTEIRO, J. H. P., FIGUEIREDO, C. E. M., MAGALHÃES, A. F, MELO, M. A. F. de, BRITO, J. C. X. de, ALMEIDA, T. P. F. de, MANSUR, G L. *Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos do Governo Federal*, 1. Ed. Rio de Janeiro, 2001.

OLIVEIRA, A. B. *Projeto de gerenciamento de resíduos sólidos na comunidade Jocum*. Porto Velho, 2006. Disponível em: <<http://br.monografias.com/trabalhos/projeto-residuos/projeto-residuos.shtml>>. Acesso em: 21/11/2010.

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

PÉREZ, P. C. C. *Análise técnico econômica para aproveitamento energético do gás gerado em aterros sanitários utilizando pilhas a combustível*. 2004. 183 p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2004.

PIEROBON, L. R. P. *Sistema de geração de energia de baixo custo utilizando biogás proveniente de aterro sanitário*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. 154 p.

POLETTTO Filho, J. A.. *Viabilidade energética e econômica da incineração de resíduo sólido urbano considerando a segregação para reciclagem*. Faculdade de Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Bauru – SP, 2008.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE PIRACICABA. *Plano de Saneamento de Resíduos Sólidos Urbanos*. Piracicaba – SP, 2011. Disponível em: <<http://www.piracicaba.sp.gov.br>>. Acesso em: 29/05/2011.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO CARLOS. *Dados da cidade (geográfico e demográfico)*. Disponível em: <http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/conheca-sao-carlos/115442-dados-da-cidade-geografico-e-demografico.html>. Acesso em: 30/05/2011.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO - PNUD. Ranking decrescente do IDH-M dos municípios do Brasil. *Atlas do Desenvolvimento Humano*. 2000. Disponível em: <<http://www.pnud.org.br/>>. Acesso em: 29/11/2010.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO – PNUD. *Tratado pretende reduzir poluição em 5,2%*. Notícia. 2005 Disponível em: <http://www.pnud.org.br/meio_ambiente/reportagens/index.php?id01=989&lay=mam>. Acesso em: 31/03/2011.

RORIGUEZ, C. J. C. *Análise técnica-econômica de um gaseificador de biomassa de 100 kg/h para acionamento de um motor de combustão interna*. Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Guaratinguetá, 2007. 195 p.

RUSSO, M. A. T. *Avaliação dos processos de transformação de resíduos sólidos urbanos em aterro sanitário*. Universidade do Minho, 2005, 298 p.

SABIÁ, J. R. *Estudo da geração de energia a partir dos resíduos sólidos*. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 2005.

bioenergia em revista: diálogos, ano 6, n. 1, p. 47-75, jan./jun. 2016.

MAZZONETTO, Alexandre Witier ; ROCHA, Diane Caroline; OLIVEIRA, Diego Francis Gonçalves de SILVA, Priscilla Lopes da;

Avaliação do potencial energético do resíduo sólido urbano de Piracicaba para produção de biogás

SÁNCHEZ, C. G. *Tecnologia da Gaseificação*. Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Campinas, 2003.

SECRETARIA MUNICIPAL DE DEFESA DO MEIO AMBIENTE DO MUNICÍPIO DE PIRACICABA – SEDEMA. *Limpeza Urbana*. Disponível em:

<<http://www.sedema.piracicaba.sp.gov.br/conteudo.php?info=limpeza>>. Acesso em: 29/05/2011.

SILVA, R. C. *Estudo do potencial energético dos resíduos depositados no aterro sanitário de Macaé com o uso da tecnologia de digestão anaeróbica acelerada*. Centro Federal de Educação Tecnológica de Campos, Macaé – RJ, Setembro, 2008. 86 p.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H; VINIL, S. *Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues*. Irwin MacGraw-Hill. 1993.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA. *Turning a liability into an asset: A landfill-gas-to energy Project development handbook*. Disponível em: <<http://epa.gov/lmop/publications-tools/handbook.html>>. Acesso em: 14/03/2011

bioenergia em revista: diálogos, ano 6, n. 1, p. 47-75, jan./jun. 2016.

MAZZONETTO, Alexandre Witier ; ROCHA, Diane Caroline; OLIVEIRA, Diego Francis Gonçalves de SILVA, Priscilla Lopes da;

Avaliação do potencial energético do resíduo sólido urbano de Piracicaba para produção de biogás

1 MAZZONETTO Alexandre Witier possui Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Campinas – FEAGRI/UNICAMP. Mestrado em Agronomia – Máquinas Agrícolas/Biomassa – Colheita Integral de Cana Crua, pela Universidade de São Paulo – ESALQ-USP. É doutorando pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas –Departamento de Energia –FEM/UNICAMP, com previsão de defesa em 2016. Na graduação envolveu-se em Pesquisa/Desenvolvimento de processos térmicos. Desde o Mestrado trabalha com fontes renováveis de energia e resíduos agroindustriais; energia da biomassa e resíduos urbanos, processos térmicos para obtenção de biocombustíveis, gaseificação e pirólise e combustíveis sustentáveis, gás de síntese (Syngas), produção e uso do biogás, bem como condicionamento do biogás. Envolvido em vários projetos (pesquisa, desenvolvimento, inovação) de processos e produção de tratamento de resíduos com geração de energia renovável, produção de biocombustíveis, gases combustíveis, utilizando-se processos térmicos e anaeróbicos. É professor da FATEC – Centro Paula Souza – Piracicaba e Tatuapé - awmazzo@yahoo.com.br

2 ROCHA Diane Caroline, é Tecnóloga em Biocombustíveis pela Faculdade de Tecnologia de Piracicaba do Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”. >

3. OLIVEIRA, Diego Francis Gonçalves de, é Tecnólogo em Biocombustíveis pela Faculdade de Tecnologia de Piracicaba do Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”. >

4. SILVA, Priscilla Lopes da é Tecnóloga em Biocombustíveis pela Faculdade de Tecnologia de Piracicaba do Centro Estadual de Educação Tecnológica “Paula Souza”. >