



## **ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA CIDADE DE CAMPINAS**

Jair Faraone Janaga Neto <sup>1</sup>  
Jorge Luiz da Paixão Filho <sup>2</sup>  
Suelene Silva Piva <sup>3</sup>

### **Reaproveitamento, Reutilização e Tratamento de Resíduos.**

#### *Resumo*

Nos últimos anos, no Brasil, houve um aumento populacional e diante deste cenário, ocorreu um crescimento significativo quanto ao descarte de resíduos sólidos urbanos (RSU), provocando uma grande preocupação ambiental. Além disso, a principal matriz energética (a hidrelétrica) passou a não suprir as necessidades, tornando necessária a busca por outras fontes de energia. O presente trabalho teve como objetivo o estudo detalhado do reaproveitamento energético dos RSU em aterros sanitários e foi realizado por meio da análise da caracterização gravimétrica de RSU numa célula experimental do aterro sanitário Delta A de Campinas. Para a quantificação de metano foram empregados os modelos do IPCC e *Scholl Canyon* para dois períodos referentes ao tempo de deposição atual (no último dia) e após 30 (trinta) anos do encerramento da célula. O resultado da geração de metano, utilizando o modelo IPCC foi de 1.079.039,61kW e utilizando o modelo *Scholl Canyon* foi de 1.048.930,84kW. Conclui-se que a quantidade de metano gerada pode ser convertida em energia elétrica e ser empregada como estratégia para o suprimento energético da rede nos horários de pico, com a finalidade de suprimir os racionamentos ou poupar as fontes geradoras existentes, se tornando economicamente viável. O biogás produzido em aterros é rico em dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>), no qual o metano é um gás extremamente confiável, com um alto poder calorífico e sendo possível a incorporação como combustíveis em motorgeradores de energia.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos; Aterro Sanitário; Gás Metano; Matriz Energética; Aquecimento Global.

---

<sup>1</sup>Engenheiro Jair Faraone Janaga Neto, [jairzanaga@hotmail.com](mailto:jairzanaga@hotmail.com).

<sup>2</sup>Prof. Dr. Jorge Luiz da Paixão Filho, Universidade Presbiteriana Mackenzie – Centro de Ciências e Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, [jorge.paixao@mackenzie.br](mailto:jorge.paixao@mackenzie.br).

<sup>3</sup>Profa. Dra. Suelene Silva Piva, Universidade Presbiteriana Mackenzie – Centro de Ciência e Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, [suelene.piva@mackenzie.br](mailto:suelene.piva@mackenzie.br).



## INTRODUÇÃO

O saneamento foi comprovado como sendo uma barreira de proteção entre a população e as doenças e, portanto, tal barreira, deve ser agregada ao abastecimento de água, coleta e tratamento de esgoto, além do gerenciamento dos resíduos. Tais resíduos sólidos, por sua vez, são considerados tudo que é descartado pelo homem, podendo ser encontrados em dois estados: no sólido (papéis, caixas, plástico, madeiras, entre outros) e semissólido (esgotos, tintas e líquidos). Esses resíduos compreendem uma vasta classe de materiais das mais diversas composições e quantidades, sendo necessário um estudo aprofundado para a classificação dos resíduos de forma específica (SANTOS, 2004).

Na prática, os termos resíduos e lixo podem ser compreendidos como sinônimos. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010) apresenta um novo termo, sendo este denominado “rejeito” (BRASIL, 2007). O rejeito é entendido como um tipo de resíduo, no qual as chances de se reaproveitar foram esgotadas, devendo ser armazenado em aterros sanitários licenciados ou incinerados. Por sua vez, os resíduos sólidos urbanos são materiais reversíveis que, ao serem descartados, passam por um processo no qual se agregue valor ao resíduo e este possa ser utilizado novamente (FRAGMAQ, 2015).

Devido ao aumento da população, alteração no padrão de consumo, juntamente com a falta de interesse em preservar o meio ambiente, ocorreu uma produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) desenfreada. Essa prática possui como consequência diversos riscos à saúde, bem como provocação da degradação no meio ambiente. De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública (ABRELPE, 2011), no Brasil, cerca de 6,7 milhões de toneladas de RSU não foram coletados em 2010 e quase 23 milhões de toneladas foram despejadas em lixões ou aterros controlados (VALLE; BRAZ; SANTOS, 2013).

Não é somente o setor de resíduos sólidos que vem preocupando o mundo. O setor energético é outro aspecto que é constantemente lembrado em toda discussão, sendo uma

delas que o tal setor terá que passar por uma mudança radical e necessária na matriz energética mundial, possuindo como grande foco as fontes renováveis (VICHI e MANSOR, 2009).

O Brasil é um dos líderes em potencial energético hídrico. Porém, quanto aos recursos naturais, o país vem sofrendo nos últimos anos com a seca e com a falta de chuvas nos sistemas de captação e nas barragens geradoras de energia. Uma das fontes alternativas de energia limpa que pode ser aproveitada é a que utiliza os resíduos sólidos (VICHI e MANSOR, 2009).

Os aterros sanitários podem ser uma fonte de energia limpa e renovável, com a produção de gás gerado através da degradação natural dos compostos orgânicos, de origem animal e vegetal, que geram biogás composto por metano e dióxido de carbono, sendo o metano ( $\text{CH}_4$ ) um gás altamente inflamável, que é muitas vezes usado como fonte de calor (BOSCOV, 2008; ZANETTE, 2009), causando vários impactos, a saúde pública e a natureza, sendo o efeito estufa uma das consequências.

Com visão de longo prazo, alguns aterros sanitários passaram por uma estruturação para que seja possível a captação dos gases produzidos naturalmente e com isso, investindo em estruturas de captação dos gases que são levados para uma usina, sendo processados e podendo ser utilizados como combustível em motogeradores de energia, onde ocorre a queima do biogás e a geração de energia elétrica (ESTRE, 2017).

Sendo assim, objetiva-se com este trabalho o estudo do aproveitamento energético a partir da decomposição dos RSU descartados, os quais possuem como principal destino os aterros sanitários, mostrando os impactos ambientais da destinação inadequada, por meio de estudos realizados em locais que sofreram degradação. Para que fosse possível ser feita a destinação correta dos resíduos sólidos urbanos, foi necessário fazer um estudo mais detalhado dos resíduos, como, por exemplo, a identificação da classe até que restasse apenas o rejeito. Foi realizado um estudo do comportamento desse rejeito e se ocorre



geração de gases neste processo. O estudo detalhado do reaproveitamento energético dos RSU em aterros sanitários foi realizado por meio da análise da caracterização gravimétrica de RSU numa célula experimental do aterro sanitário Delta A de Campinas.

## METODOLOGIA

O desenvolvimento do presente trabalho teve como base o artigo da Miguel et al. (2016) que apresenta a composição detalhada dos resíduos sólidos na cidade de Campinas, com aproximadamente 1.154.617 habitantes, área de 794.433 km<sup>2</sup> e capacidade de geração de resíduos de 1.000t dias<sup>-1</sup>. No estudo da Miguel et al. (2016), foi construída uma célula experimental no aterro sanitário Delta A na cidade de Campinas com dimensões de 80m x 70m x 5m desenvolvida para receber resíduos sólidos domésticos e comerciais, da categoria II-A, na qual se refere a classe não inertes e não perigosos, sendo obtidos da coleta regular. A capacidade volumétrica total da célula é de aproximadamente 15.000m<sup>3</sup>, que foi preenchida em 20 dias e os resíduos selecionados na célula são apresentados na tabela 01.

Tabela 01: RSU coletados na célula para caracterização gravimétrica (MIGUEL et al, 2016)

CATEGORIA	DESCRIÇÃO
Material orgânico	Restos de comida, excrementos de animais e resíduos vegetais.
Papel	Papel, revistas e jornais.
Papelão	Papelão ondulado, caixa de papelão e caixas para ovos de papelão.
Plástico duro	Embalagem de plástico duro e plástico duro em geral.
Plástico mole	Sacolas plásticas, sacos de lixo, copos de plástico e filme plástico.
Metal	Metais ferrosos e não ferrosos.
Vidro	Garrafas, vidro plano e vidro em geral.
Tetra Pak	Embalagem Tetra Pak
Fraldas e absorventes	Fraldas e absorventes
Diversos	Produtos como borracha, espuma, sapatos, material misturado com mais de uma categoria e resíduos perigosos como latas de tinta, lâmpadas, baterias.

Madeira	Madeira e pelotas de madeira.
Tecido	Roupa e tecido em geral.
Resíduo higiênico	Usual papel higiênico.
Entulho	Resíduos de construções e demolições, tal como: brita, concreto, areia e solo.
Poda	Resíduos vegetais separados em sacolas plásticas.

Outro material utilizado como base para este trabalho foi a dissertação de mestrado da Fernandes (2009), que faz uma estimativa do potencial de geração de gás metano em um aterro experimental, trazendo informações relevantes sobre o Aterro Delta da cidade de Campinas, tal como o potencial de geração de metano do resíduo ( $L_0$ ), os fatores de correção de metano (FCM) e a constante de geração de metano ( $k$ ), também sendo utilizado os parâmetros adotados e reais do mesmo aterro.

Os modelos que foram utilizados para se determinar o índice de geração do gás metano nos aterros foram os modelos empíricos amplamente aceitos do IPCC e do *Scholl Canyon*, relativamente simples de serem aplicados, por indústrias e pelas agências reguladoras. Com esses fatores, foi possível encontrar os parâmetros necessários para se calcular a geração de metano da seguinte forma: primeira etapa, cálculos da célula experimental; segunda etapa, cálculo do recebimento de um dia do RSU da cidade de Campinas, no Aterro Delta; terceira etapa, simulação de um aterro de rejeito.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na primeira parte dos cálculos da célula experimental do aterro sanitário Delta A foram utilizados parâmetros adotados como valores padrões, sendo os mais utilizados, o potencial de geração de metano ( $L_0$ ) igual a  $170\text{m}^3$  e a constante de decaimento ( $k$ ) igual a  $0,05/\text{ano}$ . A quantidade de resíduos depositada na célula experimental durante o tempo de 28 dias ( $0,0767$  ano) foi de  $9.427,43\text{ton}$ , resumidos na tabela 02.

Tabela 02: Parâmetros adotados para os cálculos do potencial de geração de metano da célula experimental.



PARÂMETRO	VALOR
Lo	170 m <sup>3</sup>
Mi	9 427,43 t
k	0,05 / ano
t	0,0 - aterro ativo
t (30 anos)	28 dias – 0,0767 ano
T	28 dias – 0,0767 ano
T (30 anos)	30 anos

Os resultados dos cálculos com os parâmetros adotados de metano gerado pelos resíduos são apresentados na tabela 03.

Tabela 03: Parâmetros calculados

MODELO	ÚLTIMO DIA	APÓS 30 ANOS
IPCC 1996	18609,37 M <sup>3</sup> /ANO	7961,88 M <sup>3</sup> /ANO
SCHOLL CANYON	18569,02 M <sup>3</sup> /ANO	7944,62 M <sup>3</sup> /ANO

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2018, a população da cidade de Campinas no último censo (2010) foi de 1.080.113 pessoas, e de acordo como o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduo Sólido Urbano de 2012, a população de Campinas em 2009, gerava aproximadamente 272 kg de resíduo sólido urbano per capita. Com isso a geração de RSU diário da cidade de Campinas é de aproximadamente 293.790.736 kg. Para um Lo de 84m<sup>3</sup> do Aterro Delta A (Fernandes, 2009), os resultados são apresentados na tabela 04.

Tabela 04: Parâmetros adotados para os cálculos da geração de metano

PARÂMETRO	VALOR
Lo	84 m <sup>3</sup>
Mi	293790,735 t /dia
k	0,0283
x	1 dia
T	0 – aterro ativo

Foi calculada a geração de gás metano no período de um dia, obtendo resultados dos cálculos de Metano Gerado pelos Resíduos, os quais estão apresentados na tabela 05.

Tabela 05: Resultado da vazão de Metano Gerado pelos Resíduos

MODELO	UM DIA
IPCC 1996	718466,366 M <sup>3</sup> /DIA
SCHOLL CANYON	698399,337 M <sup>3</sup> /DIA

Como o fator eficiência elétrica do motor (n) varia de acordo com o motogerador, é preciso buscar um motogerador como exemplo. O motogerador que foi utilizado como base para este trabalho foi o LANDSET, sendo desenvolvido pela Brasmetano. De acordo com a fabricante, o motogerador (utilizado em aterro) é capaz de gerar energia elétrica a partir do biogás oriundo de aterros sanitários, tendo uma potência nominal de 230kW, tendo uma vida útil de 40 a 80 mil horas, possuindo uma eficiência elétrica de 28% e sabendo que o poder calorífico do biogás (PCI) é de 4.613 kcal/m<sup>3</sup> (NECKER e ROSA, 2013). A quantidade de watts gerada a partir do RSU depositados em um dia no Aterro Delta, está apresentada na Tabela 06.

Tabela 06: Resultado de equivalência

MODELO	kW
IPCC 1996	1079039,61
SCHOLL CANYON	1048930,84

De acordo com a Prefeitura Municipal de Campinas e com os dados do SEADE, o consumo de energia na cidade de Campinas no ano de 2010 foi de 1.646.763MWh, sendo 953.539MWh do consumo anual das residências, 20.208MWh do consumo anual rural e 673.016MWh do consumo anual industrial. O número de consumidores por residências na



cidade de Campinas no ano de 2010, foi de 371.859, o número de consumidores rurais no mesmo ano foi de 806, e o número de consumidores industriais no mesmo ano foi de 2.811. Baseado nestes dados pode-se estimar que cada residência consome em média 7,03 kWh por dia, cada área rural consome em média 68,7kWh e o consumo diário médio de cada indústria é aproximadamente de 656kWh por dia.

Nos cálculos referentes a equivalência energética do Biogás, não foram levadas em consideração as perdas, sendo considerado 100% do biogás gerado no aterro. Na prática, não é possível utilizar 100% do gás oriundo de aterro sanitário, por conta das perdas laterais, na cobertura e no sistema de captação do biogás. Com os resultados obtidos pelo cálculo de metano gerado pelos resíduos pode-se gerar energia diariamente para aproximadamente 149.200 residências, ou suprir toda a necessidade energética da área rural de Campinas e empregar 993.558kW em outras áreas, ou gerar energia diariamente para aproximadamente 1.598 indústrias.

Os resultados obtidos através dos modelos empíricos, IPCC e o *Scholl Canyon*, foram muito próximos, comprovando a eficiência dos modelos e sua grande utilização por empresas e por pesquisadores para estimar a quantidade de gás metano gerado pela degradação dos resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários, mostrando também, que a quantidade é suficiente para ser utilizada com a finalidade estratégica do suprimento energético.

Como foi dito anteriormente, o rejeito é composto por resíduos que não constituem em suas características a reprocessabilidade, ou melhor, não podem ser reciclados. Com a publicação da Política Nacional de Resíduo Sólido (PNRS) o aterro somente poderia receber rejeitos. Assim é importante verificar o comportamento dos aterros de rejeitos. Foi suposto que cada resíduo sólido urbano, categorizado por MIGUEL et al. (2016), seja disposto de acordo com a PNRS, como por exemplo, o material orgânico sendo destinado para a compostagem ou vermicompostagem; o papel, o papelão, o plástico, o metal, o vidro e a embalagem Tetra Pak, sendo destinados para reciclagem; a

poda e madeira, sendo destinados para agricultura, incineração, paisagismo e/ou para a compostagem; restando os resíduos que iriam para o aterro de rejeito como fraldas e absorventes, resíduos diversos (produtos como borracha, espuma, sapatos, material misturado com mais de uma categoria e resíduos perigosos como latas de tinta, lâmpadas, baterias), tecido e entulho. Os resíduos perigosos, como latas de tinta, lâmpadas, baterias e outros devem ter a destinação correta de acordo com o CONAMA. Os aterros de rejeito apenas recebem resíduos considerados como rejeito, sendo eles, por exemplo, o entulho, as fraldas e entre outros citados nesse trabalho, geram nenhum ou pouco biogás, não sendo suficiente para ser aproveitado como uma estratégia para a geração de energia.

De acordo com os dados apresentados nesse trabalho, alguns fatores referentes a população, interferem resíduo, como por exemplo, o aumento do PIB faz com que aumente o volume do RSU. Porém, de acordo com a MIGUEL et al. (2016) ocorre também uma variação do tipo de resíduos descartado com a classe social em qual a pessoa está inserida. Como pode ser visto na Tabela 07, a Classe D (menos de 10 salários mínimos) gera muito material orgânico, por se tratar de uma classe predominante no cenário atual da cidade de Campinas. Por esse motivo o pouco volume gerado por cada pessoa se transforma em um grande volume, no todo. Já na Classe A (mais de 20 salários mínimos), que se trata de uma minoria da sociedade de Campinas, cada indivíduo gera muito resíduo, fazendo com que o todo seja consideravelmente grande.

Um dos principais fatores para se tornar possível a utilização do gás gerado em aterros sanitários para energia, é o grande volume de matéria orgânica depositado nos aterros sanitários, sendo que este volume varia muito de acordo com a classe social, a geração de resíduos e com o passar do tempo.

Tabela 07: Geração de Resíduos por Classe Social

CATEGORIA	CLASSE SOCIAL		
	A	B	D



MATERIAL ORGÂNICO	37,58	31,15	48,99
PAPEL	9,86	12,90	5,43
PAPELÃO	4,40	4,10	3,28
PLÁSTICO DURO	3,72	3,39	3,56
PLÁSTICO MOLE	6,84	7,99	9,09
METAL	1,48	0,94	1,12
VIDRO	3,38	0,99	1,30
TETRA PAK	0,85	0,80	1,40
FRALDAS E ABSORVENTES	2,15	2,10	5,14
DIVERSOS	3,50	5,90	6,40
MADEIRA	0,38	0,47	0,57
TECIDO	0,74	2,26	4,27
RESÍDUOS HIGIÊNICO	3,57	4,57	4,57
ENTULHO	0,68	0,62	1,49
PODA	16,70	14,10	0,00

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

De acordo com esse trabalho conclui-se que, para se obter resultados mais exatos dos cálculos, é essencial que ocorra uma separação do RSU de acordo com classe, o tipo e a origem, sendo de extrema importância para a determinação do cálculo da fração de carbono orgânico degradável (COD), pois a classe determina o destino ideal para ao resíduo, no qual os aterros recebem apenas resíduos de Classe II. Já o tipo e a origem vão determinar a fração para o cálculo do COD.

Os modelos utilizados nesse trabalho foram os mais empregados pelas empresas e por pesquisadores, mostrando que são adequados para se estimar a geração de biogás da cidade de Campinas. Com os cálculos, neste trabalho pode-se concluir que é totalmente

viável o aproveitamento energético do RSU, mostrando valores expressivos da geração do biogás no resíduo depositado em aterros sanitários da cidade de Campinas.

A composição dos resíduos de Campinas mostrou um potencial de geração de metano de aproximadamente, 698.399,337 m<sup>3</sup>/dia de acordo com o modelo Scholl Canyon e de 718.446,366 m<sup>3</sup>/dia pelo modelo do IPCC. Esse potencial pode ser elevado caso seja aumentada a proporção de matéria orgânica, papéis e papelões nos aterros (já que estes são fontes de carbono, fator que influencia diretamente na geração de metano, aumentando assim a produção de metano por tonelada de resíduo) e que seja realizada a reciclagem dos resíduos que tenha na sua composição o plástico, o vidro e os metais, e assim, evitando a deposição em aterros.

A equivalência energética do biogás obtida a partir do potencial de geração de metano da cidade de Campinas, no qual foi utilizando os resultados da Tabela 06, sendo que no modelo *Scholl Canyon*, foi de aproximadamente 1.079.039,61kW e pelo modelo do IPCC foi de aproximadamente 1.048.930,84kW, mostrando que é possível suprir as necessidades diárias de aproximadamente 149 mil residências.

Como visto, na hipótese de aterro de rejeito, pode-se concluir que a produção de biogás gerado nesse aterro é pequena ou quase inexistente. Com isso conclui-se que o destino mais adequado, quando se refere ao aproveitamento energético, é o aterro sanitário.

## REFERÊNCIAS

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2010**. São Paulo: ABRELPE, 2011.

BOSCOV, M. E. G. **Geotécnica Ambiental**. 1a ed., São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

BRASIL. Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico**; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de



1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 8 jan. 2007.

ESTRE. **Energia**. 2017. Disponível em: <http://www.estre.com.br/solucoes-para-empresas/energia/> > acessado em: 25 agosto 2018.

FERNANDES, J. G. **Estudo da Emissão de Biogás em um Aterro Sanitário Experimental**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 116 p., 2009.

FRAGMAQ. **O que são resíduos sólidos?**, 2015. Disponível em: <https://www.agmaq.com.br/blog/sao-residuos-solidos/> > Acessado em: 25 agosto 2018.

MIGUEL, M. G.; FILHO, J. L. P.; BENATTI, J. C. B.; LEME, M. A. G. **Gravimetric composition of municipal solid waste disposed in a large-scale experimental cell in Southeastern Brazil**. International Journal of Environment and Waste Management, vol. 17, Nº 2, 2016.

NECKER, H. S.; ROSA, A. L. D. **Estimativa teórica da geração de biogás do futuro aterro sanitário de Ji-Paraná – RO**, Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – EFSM e Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental – REGET, v. 17, n. 17, p. 3417-3424, 2013.

SANTOS, C. S. **Resíduos Sólidos – Classificação** - ABNT NBR 10004, 2004. (Nota técnica).

VALLE, J.; BRAZ, E. M. Q.; SANTOS, C. L. **Resíduos sólidos urbanos**. Revista Ceciliana Dez 5(2): 1-4, 2013. Disponível em: < [http://sites.unisanta.br/revistaceciliana/edicao\\_10b/1.pdf](http://sites.unisanta.br/revistaceciliana/edicao_10b/1.pdf) >. Acesso em: 30 set. 2018.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C. **Energia, Meio Ambiente e Economia: O Brasil, no Contexto Mundial**. v. 32, n. 3, p. 757-767, 2009.

ZANETTE, A. L. **Potencial de aproveitamento energético do biogás no Brasil**, André Luiz Zanette, Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.