

Avaliação do potencial energético do resíduo sólido urbano dos municípios de Piracicaba, Limeira, Rio Claro e Americana – interior de SP

MAZZONETTO, Alexandre Witier
CARBONI, Rafael Willians

Resumo

O resíduo sólido urbano (RSU) é o material que se encontra no estado sólido ou semissólido, originado das diferentes atividades humanas, podendo ou não apresentar riscos à saúde e ao meio ambiente. O aumento da produção de RSU se tornou um problema para o setor público e para a sociedade, em virtude do potencial de contaminação de lençóis freáticos, proliferações de insetos e animais, bem como a disseminação de doenças. A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabeleceu medidas para o tratamento e destinação adequada do RSU com a intenção de reduzir tais impactos, recomendando que sejam reciclados e/ou tratados. Tratamentos como por processos térmicos ou biodigestão anaeróbica para produção de biogás, apresentam potencial para aproveitamento energético dos resíduos. Este trabalho levantou a produção e caracterização do RSU dos municípios de Piracicaba/SP, Limeira/SP, Rio Claro/SP e Americana/SP; para calcular o potencial energético destes RSU, pelas as equações do IPCC e USEPA de produção de biogás e índices de conversões energéticas por processos térmicos – incineração, pirólise e gaseificação; e estimaram-se a geração de energia elétrica possível neste caso. Estes municípios poderiam cumprir a PNRS e tratar o RSU produzido por cada um, dando uma destinação adequada e gerando energia elétrica. A caracterização e produção dos RSU foram obtidas com a revisão de literatura. Os resultados apresentaram valores promissores, tanto através da produção de biogás quanto pelos processos térmicos – mais indicado. Concluiu-se que há potencial energético do RSU nos municípios estudados, bem como a possibilidade de gerar energia elétrica renovável aos municípios e que os processos térmicos são mais vantajosos, por apresentarem estimativas maiores, mais próximas do real, reduzirem o volume e massa do RSU, eliminarem a necessidade de grandes aterros sanitários, darem um tratamento sanitário, evitarem proliferação de insetos e animais, além de ampliarem a vida útil dos aterros.

Palavras-chave: biogás, lixo, potencial energético, biomassa residual, energia elétrica.

Abstract

Urban solid waste (MSW) is material that is in solid or semi-solid state, originated from different human activities, which may or may not present risks to health and the environment. The increase in MSW production has become a problem for the public sector and society, due to the potential for contamination of groundwater, proliferation of insects and animals, as well as the spread of diseases. The National Solid Waste Policy (PNRS) established measures for the proper treatment and disposal of MSW with the intention of reducing such impacts, recommending that they be recycled and/or treated. Treatments such as thermal processes or anaerobic biodigestion to produce biogas have potential for energy use of waste. This work surveyed the production and characterization of MSW in the municipalities of Piracicaba/SP, Limeira/SP, Rio Claro/SP and Americana/SP; to calculate the energy potential of these MSW, using the IPCC and USEPA equations for biogas production and energy conversion rates by thermal processes – incineration, pyrolysis and gasification; and estimated the possible electric power generation in this case. These municipalities could comply with the PNRS and treat the MSW produced by each one, giving an adequate

destination and generating electricity. The characterization and production of MSW were obtained through a literature review. The results showed promising values, both through the production of biogas and through thermal processes – most suitable. It was concluded that there is energy potential of MSW in the municipalities studied, as well as the possibility of generating renewable electricity to the municipalities and that thermal processes are more advantageous, as they present higher estimates, closer to the real, reduce the volume and mass of MSW, eliminate the need for large sanitary landfills, provide sanitary treatment, prevent the proliferation of insects and animals, in addition to extending the useful life of landfills.

Keywords: biogas, waste, energy potential, residual biomass, electrical energy.

Resumen

Los residuos sólidos urbanos (RSU) son materiales que se encuentran en estado sólido o semisólido, provenientes de diferentes actividades humanas, que pueden o no presentar riesgos para la salud y el medio ambiente. El aumento de la producción de RSU se ha convertido en un problema para el sector público y la sociedad, debido al potencial de contaminación de las aguas subterráneas, proliferación de insectos y animales, así como la propagación de enfermedades. La Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS) estableció medidas para el adecuado tratamiento y disposición de los RSU con la intención de reducir tales impactos, recomendando su reciclaje y/o tratamiento. Los tratamientos como los procesos térmicos o la biodigestión anaeróbica para producir biogás tienen potencial para el aprovechamiento energético de los residuos. Este trabajo investigó la producción y caracterización de RSU en los municipios de Piracicaba/SP, Limeira/SP, Rio Claro/SP y Americana/SP; calcular el potencial energético de estos RSU, utilizando las ecuaciones del IPCC y la USEPA para la producción de biogás y tasas de conversión de energía por procesos térmicos – incineración, pirólisis y gasificación; y estimó la posible generación de energía eléctrica en este caso. Estos municipios podrían cumplir con el PNRS y tratar los RSU producidos por cada uno, dándoles un destino adecuado y generando energía eléctrica. La caracterización y producción de RSU se obtuvo a través de una revisión bibliográfica. Los resultados mostraron valores prometedores, tanto a través de la producción de biogás como a través de procesos térmicos, los más adecuados. Se concluyó que existe potencial energético de los RSU en los municipios estudiados, así como la posibilidad de generar energía eléctrica renovable a los municipios y que los procesos térmicos son más ventajosos, ya que presentan estimaciones más altas, más cercanas a lo real, reducen el volumen y masa de RSU, eliminar la necesidad de grandes rellenos sanitarios, brindar tratamiento sanitario, evitar la proliferación de insectos y animales, además de alargar la vida útil de los rellenos sanitarios.

Palabras clave: biogás, residuos, energía potencial, biomasa residual, energía eléctrica.

INTRODUÇÃO

A produção de resíduo sólido urbano (RSU) se tornou uma preocupação para a sociedade. Com o aumento populacional e industrial, tal produção vêm se elevando e, conseqüentemente, gerando problemas para a destinação final adequada. O crescimento urbano dificulta a disponibilidade de grandes áreas para aterros sanitários, que exigem adequações a fim de evitar contaminações em lençóis freáticos, proliferações de insetos e roedores, bem como disseminação de doenças.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) propôs que os resíduos sejam tratados e/ou destinados ao reuso. Alguns materiais como metais, vidros e polímeros, por exemplo, possibilitam o retorno às indústrias e reuso como matéria-prima. Entretanto, outros não possibilitam a reciclagem, como os materiais orgânicos, tecidos, madeira, alguns tipos de papéis e papelões e outros que se destinem a aterros sanitários. De acordo com a PNRS, esforços devem ser feitos para que esses materiais também sejam reutilizados, sendo uma das possibilidades a produção de biogás e conseqüente aproveitamento energético (BRASIL, 2010).

Pode se considerar que uma fração do RSU tem um potencial energético, que pode produzir biogás, que além de seu valor como fonte de energia e conseqüente substituição do uso de fontes fósseis, reduz a emissão de gases que intensificam o aquecimento global. No Brasil, esse recurso é pouco explorado, tendo em vista o potencial apresentado frente ao tamanho e disponibilidade de RSU em alguns aterros. Entretanto, existem alguns projetos no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que envolvem geração de energia em aterros no Brasil, principalmente na região sudeste (IPEA, 2012).

Assim, dando utilização o RSU em processos térmicos, pode-se cumprir a PNRS e oferecer uma opção melhor que aterros sanitários, dando tratamento sanitário e ambiental ao resíduo sólido urbano; abastecendo centros de demanda de energia com menores gastos com transmissão e descartando as frequentes necessidades de grandes áreas, cada vez mais escassas, para aterros sanitários.

É importante dar um tratamento ao resíduo sólido urbano (RSU), não só para adequação ao PNRS, mas também para aproveitamento (geração) de energia renovável e redução massa e volume desse resíduo. Uma opção é a exploração do biogás dos aterros sanitários, uma vez que boa parte do RSU tem origem orgânica, porém não se reduz o volume do resíduo nem a necessidade de aterros sanitários. Outra opção são os processos térmicos, que possibilitam tanto o aproveitamento energético, reduzem o volume do RSU e oferecem um tratamento sanitário.

Este trabalho analisou e comparou as estimativas de produção de energia elétrica de biogás e de processos térmicos, para o aproveitamento energético do RSU dos municípios de: Americana/SP, Limeira/SP, Piracicaba/SP e Rio Claro/SP; a fim de identificar qual o processo produziu mais energia elétrica e apresentou maiores vantagens.

REVISÃO

Resíduos sólidos urbanos

Características e composição dos resíduos sólidos urbanos

De acordo com a Associação Brasileira de normas Técnicas (ABNT) e com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), resíduos sólidos são aqueles que se encontram nos estados sólido ou semissólido, e são originados de atividades industriais, comerciais, agrícolas, hospitalares, domésticas e de serviços de varrição, assim como de sistemas de tratamento de água e os produzidos por equipamentos de controle de poluição. Também são considerados os resíduos líquidos cujas características os tornam inviáveis ao lançamento na rede de esgotos, ou exijam soluções tecnicamente inviáveis para isso (ABNT, 2004; BRASIL, 2010).

Embora a composição do RSU no Brasil seja bastante heterogênea, as análises gravimétricas apontam uma frequência entre 40 e 60% de materiais orgânicos do total de resíduos coletados. Em regiões altamente industrializadas, como São Paulo, a quantidade de resíduos orgânicos continua elevada, em cerca de 57,5%, como registrado por Agostinho et al (2013).

As Tabelas 1 e 2 apresentam a composição média de RSU obtida por diversos autores e para diversas cidades, sendo a Tabela 2 apenas para os municípios do Estado de São Paulo.

Tabela 1. Composição média do RSU obtida por autores em diversos municípios do país

Localização	Fonte	Material Orgânico (%)	Metais (%)	Polímeros / Plásticos (%)	Vidros (%)	Papéis (%)	Outros (%)
Países com maior renda	Borges, 2017	28	6	11	7	31	17
Países com menor renda	Borges, 2017	64	3	8	3	5	17
BRASIL	EPE, 2014	59	2,10	12,30	3,10	18,50	5
Foz do Iguaçu, PR	Neves, 2013	56,92	2,77	13,23	2,46	10,15	14,47
Toledo, PR	Neves, 2013	67,57	0,75	9,75	2,34	12,68	6,91

Cascavel, PR	Neves, 2013	63	2	9	4	10	12
Belo Horizonte, MG	FEAM, 2012	62	2	9	3	11	13
Maria da Fé, MG	Alkmin e Ribeiro Júnior, 2017	55,60	5,60	12,20	2,80	11,10	12,70
Manaíra, PB	Bezerra e Campos, 2019	49,05	9,95	18,05	2,90	7,55	12,50
Santa Cruz do Sul, RS	Trentin et al, 2019	41,65	2,02	13,48	3,02	9,92	29,91

Fonte: Adaptada dos autores citados.

Tabela 2. Composição média do RSU obtida por autores em diversos municípios do Estado de São Paulo

Localização	Fonte	Material Orgânico (%)	Metais (%)	Polímeros/ Plásticos (%)	Vidros (%)	Papéis (%)	Outros (%)
São Carlos	Kim (2018)	37,48	1,73	13,76	3,10	9,72	34,21
São Carlos	Frésca, (2007)	59,08	1,31	10,47	1,67	6,44	21,03
Piracicaba	Vessalli, Favarin Neto e Oliveira (2013)	62,5	7,52	2,58	4,87	9,06	13,46
Piracicaba	SEDEMA (2015)	45,83	1,53	1,23	19,33	11,34	20,74
Piracicaba	Mazzonetto et al (2016)	79,38	1,87	9,44	1,98	2,28	5,05
Piracicaba	Mazzonetto, Gentil e Marchetti (2019)	47,16	7,88	11,10	2,52	5,79	25,55
Rio Claro	Braz (2001)	61,20	3,90	5	2,80	15	12,10
Campinas	Ensinas (2003)	46,26	4,86	13,21	3,36	29,76	2,55
Botucatu	Zanin e Mancini (2004)	74,17	3,85	8,37	1,90	7,61	4,10
Araraquara	Zanin e Mancini (2004)	82,16	2,80	12,10	0,84	2,10	0

Fonte: Adaptada dos autores citados.

Riscos e perigos

Os resíduos, se depositados de maneira incorreta ou não receber os tratamentos e manejo adequados, podem causar impactos tanto ao meio ambiente quanto à saúde da população. Isso ocorre em virtude do potencial poluidor dos produtos gerados no processo de degradação e por ser transmissor de doenças. As águas também são afetadas pelo lixiviado, podendo contaminar rios, lagos e corpos d'água, além de ser absorvido pelo solo, atingindo e contaminando águas subterrâneas. Além dos danos ao meio ambiente, os resíduos oferecem riscos à saúde pública, já que as etapas de coleta e deposição, principalmente irregular ou em aterros sanitários, podem gerar contaminantes e a proliferação de vetores de doenças. A matéria orgânica presente nos RSU atrai insetos, animais e microrganismos que acabam, pelo contato com os resíduos, por espalhar doenças, que podem ser transmitidas diretamente pelos produtos gerados ou indiretamente pelo solo, água ou ar (BORGES, 2017).

As principais fontes poluidoras são os lixiviados e o biogás. O lixiviado é o líquido produzido pela decomposição dos resíduos, formado por compostos orgânicos e inorgânicos como amônia, metais pesados e ácidos húmicos; e, se o lixiviado não for coletado e tratado, apresenta uma ameaça ao solo e águas superficiais subterrâneas. Entre os riscos ambientais, o solo pode ser afetado por fatores associados aos resíduos, como a contaminação por metais pesados, que ameaçam a qualidade do solo e alteram sua fertilidade, trazendo também consequências à saúde (ALI et al, 2014).

Política Nacional dos Resíduos Sólidos

O gerenciamento de RSU no Brasil passou por mudanças após a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Nela, foram estabelecidas diretrizes relacionadas à gestão integrada e gerenciamento dos RSU, as responsabilidades dos geradores e do poder público, assim como as ferramentas econômicas aplicáveis (BRASIL, 2010). Entretanto, mesmo que as exigências sejam à nível federal, a realidade não é a mesma entre municípios e regiões do país em relação às políticas e capacidade de investimentos na gestão de resíduos sólidos (MANNARINO et al, 2015).

Em 2018, o Brasil coletou cerca de 79 milhões de toneladas de resíduos sólidos, com cobertura nacional de 92%, o que representa 72,8 toneladas. Do total, 43,3 milhões de toneladas foram depositadas em aterros sanitários. As 29,5 milhões de toneladas restantes foram despejadas em “lixões” ou outros locais inadequados, sem sistemas de proteção para o meio ambiente. A

produção de RSU per capita ficou, para o ano, de 380 kg por habitante. A participação regional na coleta de RSU é dominada pela região sudeste, com 53,2% do total de RSU coletado, seguida pelas regiões Nordeste, Sul, Centro-Oeste e Norte, com 22%, 10,8%, 7,5% e 6,6%, respectivamente. Aproximadamente três quartos dos municípios brasileiros realizam algum tipo de coleta seletiva, embora não incluam todos os bairros (ABRELPE, 2019).

Tratamentos e destinação

Aterro sanitário

Aterro sanitário é definido como uma obra de engenharia, projetada sob critérios técnicos e específicos, com a finalidade de garantir a deposição dos RSU sem causar – ou o menor possível – danos à saúde e ao ambiente. É considerado uma das formas mais seguras para destinação de resíduos sólidos, por permitir o controle eficaz e apresentar bom custo-benefício. Podem receber diversos tipos e quantidades de resíduos, se adaptando a qualquer comunidade. Durante o processo de decomposição dos resíduos, são produzidas reações químicas e biológicas, que produzem húmus (resíduos mineralizados), resíduos líquidos e biogás (VAN ELK, 2007).

Biodigestão anaeróbia de RSU

A biodigestão anaeróbica é um processo bioquímico que ocorre na ausência de oxigênio, em que microrganismos interagem com a matéria orgânica para converter estes compostos em proporções variadas de gases, como o metano, dióxido de carbono, nitrogênio, entre outros. Alguns fatores como a concentração de substrato, umidade, pH, temperatura e composição microbiana interferem no desempenho do processo no biorreator, além da escolha do tipo de digestor, afetando o rendimento na produção de biogás. Todos os compostos orgânicos podem ser degradados por anaerobiose, sendo o processo de tratamento com melhor custo e benefício para este tipo de resíduos. Ainda, apresenta potencial redução da poluição ambiental e tem como produto compostos úteis, como o fertilizante orgânico e o biogás (REMPEL, 2014).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), referência sobre mudanças climáticas, principalmente no que se refere à emissão de gases como o dióxido de carbono e o metano, desenvolveu uma metodologia para calcular a emissão de gás metano, possibilitando estimar teoricamente o potencial da geração de energia (IPCC, 1996). Outra forma de estimar a produção de metano em locais de deposição de resíduos é pela estimativa por

aproximação simples, desenvolvido pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) (USEPA, 2002).

Processos térmicos - incineração/combustão, pirólise e gaseificação

Tratar o RSU com processos termoquímicos possui grande importância, pois reduz o volume do resíduo e a demanda por áreas de destinação e aproveita o potencial energético. Além disso, recicla compostos químicos e minerais e remove potenciais contaminantes do meio ambiente (STANTEC, 2011).

A incineração utiliza processos com elevadas temperaturas para a queima de RSU como combustíveis em fornos e na presença intensa de oxigênio. Após a queima, são obtidas cinzas (materiais inorgânicos) e material carbonáceo residual. As técnicas de incineração mais utilizadas são o *Mass Burning* e o *Refuse-derived Fuel*. No *Mass Burning*, a incineração dos resíduos ocorre na forma bruta, sem tratamentos prévios, com retirada de partes com maiores dimensões. Na *Refuse-derived Fuel*, os resíduos são previamente tratados, através da remoção de materiais recicláveis e de forma à heterogeneizar a massa a ser incinerada. A *Mass Burning*, por exigir menos esforços, é a mais utilizada (MACHADO, 2015).

A gaseificação corresponde a degradação térmica dos resíduos sólidos, na faixa de 500° C a 1300° C, na presença de um agente químico, que pode ser o oxigênio em condições sub estequiométricas, o ar ou o vapor de água. No processo, o principal produto é o gás de síntese (ou *syngas*), formado por monóxido de carbono e hidrogênio. O *syngas* pode ser convertido em diferentes produtos químicos, assim como em combustíveis renováveis e limpos (BASU, 2010).

Outro processo é a pirólise, que ocorre em temperaturas relativamente menores do que os processos anteriores, variando de 250° C a 700° C conforme o tipo de resultado final desejado, e na ausência de oxigênio. Seus produtos possuem elevada densidade energética, e podem ser o carvão, o bio-óleo (ou óleo pirolítico), e um gás formado por hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono e metano (CHITI e KEMIHA, 2013; STANTEC, 2011).

O plasma consiste em um gás ionizado, e sua composição física é distinta dos outros estágios da matéria: sólido, líquido e gasoso, por isso é denominado como o quarto estágio da matéria. Um material sólido, conforme é aquecido, se transforma em líquido e, posteriormente, em gasoso. Com a continuidade do aquecimento, obtém-se o estado de plasma, que pode variar entre 5.000° C e 50.000° C (BARTHOLOMEU et al, 2011).

A Tabela 3 apresenta a produção de energia por tonelada de RSU para cada processo térmico, utilizando resíduo sólidos urbanos.

Tabela 3. Produção de energia por tonelada de RSU para cada processo térmico

Processo Térmico	Taxa ⁽¹⁾	Taxa ⁽²⁾	Taxa ⁽³⁾	Taxa ⁽⁴⁾
Incineração	493 kW.h/ton de RSU	523 kW.h/ton de RSU	1,3 MW.h/ton de RSU	0,7 MW.h/ton de RSU
Pirólise	518 kW.h/ton de RSU	-	-	-
Gaseificação Convencional	621 kW.h/ton de RSU	-	4,2 MW.h/ton de RSU	-
Gaseificação Plasma	740 kW.h/ton de RSU	-	-	-

Fonte: Adaptado de 1. Young (2010), 2. USEPA (2002), 3. Henriques et al (2004a), 4. Sabiá et al (2005).

Após a incineração, a quantidade do material sólido, com aspecto de cinza, varia de 12 a 30% em massa e de 4 a 10% em volume em relação ao original, estando apto para ser aterrado ou utilizado na construção civil (MORGADO e FERREIRA, 2006). O processo de gaseificação tem como vantagem uma maior redução do volume de RSU, que pode variar de 75 a 90%, produzindo de 8 a 12% de cinzas (HENRIQUES, 2004b).

METODOLOGIA

Foram levantadas as produções de RSU dos municípios de Americana, Limeira, Piracicaba e Rio Claro pelos sites oficiais dos municípios. Com as informações da composição do RSU de cada município foram usadas as fórmulas estimativas do IPCC e USEPA para estimarem a produção de biogás, e os índices de conversão de RSU em energia por diferentes processos térmicos – de diferentes autores.

De acordo com a metodologia desenvolvida pelo IPCC, é possível estimar teoricamente o potencial da geração de energia através da emissão de gás metano (IPCC, 1996). Tal potencial pode ser estimado também equação desenvolvido pela USEPA, uma que utiliza a quantidade de lixo como variável única, (USEPA, 1996). Nesse sentido, deve ser usado como uma ferramenta primária, e de acordo com a Equação 1 (USEPA, 1966):

Equação 1. Geração anual de gás metano

$$GCH_4 = Gr * QL \quad (1)$$

Sendo: GCH₄: geração anual de gás metano, em m³ por ano;

Gr: taxa de geração de gás metano, em m³ por kg de resíduos por ano;

QL: quantidade de lixo depositada no local, em kg.

A Estimativa por método do Inventário, proposta pelo IPCC, calcula a quantidade de carbono orgânico degradável, estimando a quantidade de metano produzida por certa quantidade de resíduo em suas diferentes categorias. Os cálculos são feitos de acordo com as equações (IPCC, 1996):

Equação 2. Emissão anual de gás metano

$$ECH_4 = \frac{(PU * RSD * RSDf * Lo)}{pCH_4} \quad (2)$$

Sendo: ECH₄: emissão de gás metano, em toneladas de CH₄ por ano;

PU: população urbana, em número de habitantes;

RSD: taxa de geração de RSU, em toneladas de RSU por habitante por ano;

RSDf: taxa de resíduos coletados e dispostos no aterro, em porcentagem;

Lo: potencial de geração de metano, em toneladas de CH₄ por toneladas de RSU;

pCH₄: massa específica do metano, em kg por m³.

O potencial de geração de metano (Lo) é estimado conforme a Equação 3 (IPCC, 1996):

Equação 3. Potencial de geração de metano

$$Lo = MCF * COD * CODf * F * (16/12) \quad (3)$$

Sendo: Lo: potencial de geração de metano, em toneladas de CH₄ por toneladas de RSU;

MCF: fator de correção de metano (Tabela 3);

COD: carbono orgânico degradável, em toneladas de carbono por toneladas de RSU;

CODf: fração de COD disponível, em porcentagem;

F: fração de metano contido no biogás, em porcentagem;

(16/12): fator de conversão do carbono em metano.

A Tabela 4 apresenta valores para o MCF, segundo IPCC (1996).

Tabela 4. Fator de correção do metano

Local	MCF
Adequado	1,0
Inadequado profundo (> 5 metros)	0,8
Inadequado raso (< 5 metros)	0,4

Fonte: Adaptado de IPCC (1996).

A quantidade de carbono orgânico degradável (COD) e de carbono disponível para decomposição química (COD_f) são calculadas conforme as Equações 4 e 5, respectivamente. O COD é baseado na composição do resíduo e na quantidade de carbono presente em cada componente (IPCC, 1996).

Equação 4. Quantidade de carbono orgânico degradável

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

Sendo: A: fração de papéis;

B: fração de resíduos de varrição, parques, jardins, entre outros;

C: fração de alimentos e restos de alimentos;

D: fração de tecidos;

E: fração de madeira.

Equação 5. Carbono disponível para decomposição química

$$\text{COD}_f = (0,014 * T) + 0,28 \quad (5)$$

Sendo: T: temperatura da zona anaeróbica, em graus célsius.

Baseada na Tabela 2 foram calculadas as médias para as cidades do interior do Estado de São Paulo, e assim utilizadas para os Municípios de Americana e Limeira, pois não se encontrou trabalhos publicados com esses dados. O Resultados são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5. Composição média do RSU obtida por autores em diversos municípios do Estado de São Paulo

Localização	Fonte	Material Orgânico	Metais	Polímeros/ Plásticos	Vidros	Papéis	Outros
Média geral interior SP [%]	-	60,70	2,73	9,20	4,37	10,53	12,47
Piracicaba	Vessalli, Favarin Neto e Oliveira (2013)	62,50	2,58	7,52	4,87	9,06	13,47
Piracicaba	SEDEMA, 2015	45,83	1,53	1,23	19,33	11,34	20,74
Piracicaba	Mazzonetto et al, 2016	79,38	1,87	9,44	1,98	2,28	5,05
Piracicaba	Mazzonetto, Gentil e Marchetti (2019)	49,09	7,88	11,10	2,52	5,79	23,62
Média de Piracicaba [%]		59,50	4,89	7,70	6,61	7,80	13,50

Fonte: Adaptada dos autores citados na Tabela 2.

A Tabela 6 apresenta algumas informações básicas sobre os municípios do estudo.

Tabela 6. Informações básicas sobre os municípios do estudo

Município	População (hab) ⁽¹⁾	IDH ⁽¹⁾	Distância de São Paulo, capital (km) ⁽¹⁾	Área urbana (km ²) ⁽¹⁾	Área rural (km ²) ⁽¹⁾	Destinação do RSU ⁽²⁾
Americana	239.597	0,881	127	50,75	82,88	Aterros
Limeira	306.144	0,775	154	108,23	488,77	Aterros
Piracicaba	404.142	0,785	152	229,66	1147,25	Aterros
Rio Claro	206.424	0,803	173	64,32	434,102	Aterros

Fonte: Adaptado de 1. IBGE Cidades, 2. Spigolon (2015).

Para os cálculos, foram utilizadas as composições de RSU obtida por Braz (2001) para o município de Rio Claro e uma média das composições de SEDEMA (2015) e Mazzonetto et. al

(2016) para Piracicaba. Para as cidades de Americana e Limeira foi utilizada a composição média de municípios do Estado de São Paulo, de acordo com a Tabela 2, em virtude de as cidades não possuírem estudos que identifiquem a composição de RSU.

A estimativa do potencial de geração de biogás foi feita através da metodologia sugerida pelo IPCC (Método do Inventário - IPCC, 1996).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos cálculos utilizando as metodologias desenvolvidas pelo IPCC (IPCC, 1996) e pela USEPA (USEPA, 2002) foram estimados os potenciais energéticos dos resíduos sólidos urbanos nas cidades de Americana, Limeira, Piracicaba e Rio Claro, todas localizadas no interior do Estado de São Paulo.

A Tabela 7 apresenta a caracterização dos resíduos sólidos dos municípios estudados utilizadas para os cálculos. Não foi encontrado trabalho que caracterizasse o RSU dos municípios de Americana e Limeira, por isso foram utilizados valores médios, conforme explicado na Metodologia.

Tabela 7. Produção diária e composição do resíduo dos municípios de Americana, Limeira, Piracicaba e Rio Claro

Município	RSU/dia.hab (kg) ⁽¹⁾	RSU/dia (ton) ⁽¹⁾	Matéria Orgânica (%)	Metal (%)	Vidros (%)	Plásticos (%)	Papéis (%)	Outros (%)
Americana ⁽²⁾	0,85	203,32	60,70	2,73	9,20	4,37	10,53	12,47
Limeira ⁽²⁾	0,84	256,82	60,70	2,73	9,20	4,37	10,53	12,47
Piracicaba ⁽³⁾	0,85	342,06	45,83	1,53	1,23	19,33	11,34	20,74
Piracicaba ⁽⁴⁾	-	-	79,38	1,87	9,44	1,98	2,28	5,05
Média Piracicaba	0,85	342,06	62,60	1,70	5,34	10,65	6,80	12,91
Rio Claro ⁽⁵⁾	0,84	174,23	61,20	3,90	5	2,80	15	12,10

Fonte: Adaptado de 1. Spigolon (2015); 2. Média de acordo com a Tabela 2; 3. SEDEMA (2015); 4. Mazzonetto et al (2016); 5. Braz (2001).

Pelas equações do IPCC e da USEPA foram feitas estimativas da produção de biogás e consequentes gerações de energia elétrica – por moto gerador com taxa de 1,7 kW.h/m³ de biogás. Os resultados são apresentados pela Tabela 8.

Tabela 8. Estimativas de produção de biogás pelas equações do IPCC e USEPA, com respectivas gerações de energia elétrica – mensais

Município	IPCC [m ³] biogás	USEPA [m ³] biogás	IPCC MW.h/mês	USEPA MW.h/mês
Americana	2.672.866,4	1.374.687,8	4.543,9	2.337,0
Limeira	3.375.063,8	1.735.836,5	5.737,6	2.950,9
Piracicaba	4.649.599,1	2.318.764,7	7.904,3	3.941,9
Rio Claro	2.294.453,0	1.170.424,1	3.900,6	1.989,7

Fonte: Autores.

Da Rocha (2019), aplicando a metodologia do IPCC, concluiu que o aterro sanitário estudado mostrou ter resultados satisfatórios na produção de biogás e potencial para produção de energia, com característica de 65,65% de matéria orgânica, 11,11% de papéis, 2% de madeira. Os cálculos estimaram a produção energética de 2018 a 2048, com um crescimento atingindo um máximo de 101.366,8 W com a produção de 119.962,6 m³ por ano de gás metano e acúmulo de 1075,9 toneladas em 2033. Para que seja viável a recuperação energética do biogás em aterros, deve ser recebido, no mínimo, 200 toneladas de resíduos por dia, além da capacidade de 500 mil toneladas em sua vida útil (REMPEL, 2014).

Os resultados apresentados pela Tabela 8 mostram valores promissores. Entretanto, cabe lembrar que o Aterro Bandeirantes, em Perus/SP, com menos de 15 anos de exploração, está com metade dos motogeradores desligados por falta de biogás. Tal aterro é caracterizado como projeto MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo), produz energia através do biogás e comercializa crédito de carbono (CORREA e JESUS, 2017). Tal exemplo, associado às diferenças significantes de m³ de biogás gerados nos municípios, evidenciam certo risco em estimar a produção de metano e de energia elétrica através de produção de biogás. Ainda, o biogás de aterro sanitário é altamente corrosivo, implicando na necessidade de frequentes manutenções nos equipamentos.

A produção de energia por processo térmico está apresentada na Tabela 9, conforme as taxas de Young (2010) e USEPA (2002). Com base nos resultados, pode-se observar que o

potencial de energia elétrica produzida é otimizado se fosse utilizada a gaseificação a plasma, com o maior potencial de geração de MW.h. Embora a estimativa do IPCC (1996) aponte o método do biogás com a maior produção de MW.h, se comparado o potencial dos processos de incineração com a produção de biogás obtida pelo método da USEPA (2002), o processo térmico com a produção de MW.h mais baixa (incineração) apresenta vantagem.

Vale ressaltar que os resultados dos processos térmicos são muito próximos do real, ao passo que a produção de biogás é uma estimativa que pode não se confirmar na prática, além do biogás não tirar a necessidade de aterro e reduzir o volume inicial de RSU em torno de 4%, isto é, mantém-se em torno de 96% do volume e massa iniciais de RSU. No caso de processos térmicos, além de resultados mais precisos, estes processos eliminam a necessidade de grandes aterros e reduzem a massa e volume do RSU entre 6 e 15% da massa inicial, além de gerar energia.

Tabela 9. Potencial de energia elétrica produzida por processos térmicos

Processo Térmico	RSU [ton]/dia Americana	MW.h/dia	MW.h/mês	RSU [ton]/dia Limeira	MW.h/dia	MW.h/mês
Incineração (USEPA)	203,32	106,34	3.190,09	256,82	134,32	4.029,51
Incineração	203,32	100,24	3.007,10	256,82	126,61	3.798,37
Pirólise	203,32	105,32	3.159,59	256,82	133,03	3.990,98
Pirólise/ Gaseificação	203,32	126,26	3.787,85	256,82	159,49	4.784,56
Gaseificação Convencional	203,32	126,26	3.787,85	256,82	159,49	4.784,56
Gaseificação a plasma	203,32	150,46	4.513,70	256,82	190,05	5.701,40

Processo Térmico	RSU [ton]/dia Piracicaba	MW.h/dia	MW.h/mês	RSU [ton]/dia Rio Claro	MW.h/dia	MW.h/mês
Incineração (USEPA)	342,06	178,90	5.366,92	174,23	91,12	2.733,67
Incineração	342,06	168,64	5.059,07	174,23	85,90	2.576,86
Pirólise	342,06	177,19	5.315,61	174,23	90,25	2.707,53
Pirólise/ Gaseificação	342,06	212,42	6.372,58	174,23	108,20	3.245,90
Gaseificação Convencional	342,06	212,42	6.372,58	174,23	108,20	3.245,90

Gaseificação a plasma	342,06	253,12	7.593,73	174,23	128,93	3.867,91
------------------------------	--------	--------	----------	--------	--------	----------

Fonte: Autores.

CONCLUSÃO

A cidade que apresentou maior potencial de geração de energia (MW.h) foi Piracicaba, em virtude de sua maior população e consequente produção de RSU/dia, seguida de Limeira, Americana e Rio Claro. Com as estimativas feitas, pode-se considerar que os municípios apresentam um bom potencial para geração de energia, tanto através da produção de biogás quanto pelos processos térmicos – mais recomendado.

Os maiores valores de MW.h foram estimados através da produção de biogás pelo método do IPCC (1996), embora o método da USEPA (2002), também para produção de biogás, tenha apontado os menores valores. Tal diferença demonstra uma estimativa imprecisa, que pode não se confirmar na prática. Os processos térmicos também apontaram valores promissores para a produção energética, sobretudo a gaseificação a plasma. Além disso, apresentam resultados mais próximos dos reais, confiáveis e reduzem o volume e massa de RSU, eliminando a necessidade de aterro sanitário.

Conclui-se que os municípios analisados possuem potencial para geração de energia elétrica renovável usando-se o RSU, e os processos térmicos apresentaram maior vantagem em relação a produção de biogás.

REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas: NBR 1007:2004. Resíduos Sólidos Classificação. 71p. 2004.

ABRELPE. *Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019*. 68, p. 2019.

AGOSTINHO, F.; ALMEIDA, C. M. V.; BONILLA, S. H.; SACOMANO, J. B.; GIANNETTI, B. F. Urban solid waste plant treatment in Brazil: is there a net energy yield on the recovered materials? *Resources, Cons and Rec*, v. 73, p. 143-155. 2013.

ALI, S. M.; PERVAIZ, A., AFZAL, B.; HAMID, N.; YASMIN, A. Open dumping of municipal solid waste and its hazardous impacts on soil and vegetation diversity at waste dumping sites of Islamabad city. *Journal of King Saud University – Science*, 26, p. 59-65. 2014.

ALKMIN, D. V.; RIBEIRO JUNIOR, L. U. Determinação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos (RSU) do lixão do município de Maria da Fé, Estado de Minas Gerais. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia. v. 18, n. 61, p. 65 – 82. 2017.

BARTHOLOMEU, D. B. et al. *Logística ambiental de resíduos sólidos*. São Paulo: Atlas S.A. 2011. 250 p.

BASU, P. *Biomass Gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Burlington: Elsevier, 2010.

BEZERRA, C. B.; CAMPOS, K. F S. Avaliação da gestão e composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares do município de Manaira - PB. *Revista de Geografia e Interdisciplinaridade*. V. 5, n. 16, p. 01-23. 2019.

BORGES, B. R. *Análise e avaliação de riscos em sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos*. Contribuição para a implementação de um plano de segurança. Tese de Doutorado. Portugal: Universidade do Minho, 2017. 229 p.

BRASIL, Lei Nº 12.305 de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS); altera a Lei n. 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2010.

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.

BUTT, T. E.; GOUDA, H. M.; BALOCHD, M. I.; PAUL, P.; JAVADI, A. A.; ALAM, A. Literature review of baseline study for risk analysis — *The landfill*. *Environment International*, 2014. P. 149-162.

CHHITI, Y.; KEMIHA, M. Thermal Conversion of Biomass, Pyrolysis and Gasification: A Review. *The Int Journal of Eng and Science*, v. 2, n.3 p. 75-85. 2013.

CORREA, R. E.; JESUS, E. L. DE. *Geração de créditos de carbono em aterro sanitário provenientes de resíduos sólidos urbanos no município de Piracicaba - SP*. Trabalho de Graduação. FATEC: Piracicaba, 2017.

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.

EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Nota Técnica DEA 18/14. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos urbanos. *Série Recursos Energéticos*. Ministério de Minas e Energia, Rio de Janeiro. 50 p. 2014.

FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. *Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientações para governos municipais de Minas Gerais*. Belo Horizonte: FEAM, 2012. 163 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.

HENRIQUES, R. M; OLIVEIRA, L. B.; COSTA, A. O. da. *Geração de energia com resíduos sólidos urbanos: análise custo benefício*. IVIG-COPPE/UFRJ. 2004a.

HENRIQUES, R. M. *Aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos: uma abordagem tecnológica*. Tese, COPPE/UFRJ. 2004b. 189 p.

HOORNWEG, D.; BHADA-TATA, P. What a Whaste - A Global Review of Solid Waste Management. Washington: Urban Development & Local Government Unit - World Bank. 2012. Em: Borges, B. R. *Análise e avaliação de riscos em sistemas de gestão de resíduos sólidos urbanos*. Contribuição para a implementação de um plano de segurança. Tese (Doutorado). Portugal: Univ. do Minho. 2017. 229 p.

IBGE Cidades. Disponível em : <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/piracicaba/panorama>. Acessado em: 23 de maio de 2020.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos urbanos*. Relatório de pesquisa. Brasília, 2012. 82 p.

IPCC - INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual Vol. 3. 1996. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch6ref1.pdf> . Acessado em: 23 de maio de 2020.

JACOBI, P. R.; BESEN, G. R. *Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios de sustentabilidade*. Estudos Avançados, v. 25, n. 71. 2011.

KIM, V. J. H. *Análise da composição gravimétrica dos resíduos domiciliares de São Carlos (SP)*. Dissertação (Mestrado). São Carlos: UFSCar. 196 p. 2019.

MACHADO, C. F. *Incineração: uma análise do tratamento térmico dos resíduos sólidos urbanos de Bauru/SP*. Rio de Janeiro: UFRJ. Escola Politécnica. 2015.

MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A.; GANDOLLA, M. Contribuições para a evolução do gerenciamento de resíduos sólidos urbanos no Brasil com base na experiência européia. *Eng Sanitária e Ambiental*, 2015. 7 p.

MAZZONETTO, Alexandre Witier; GENTIL, Maria Cláudia Garcia; MARCHETTI, Rebeca. Gestão do aproveitamento de resíduos recicláveis e não recicláveis de um condomínio – estudo de caso. *Bioenergia em revista: diálogos*, ano 9, n. 1, p. 62-86, 2019.

MAZZONETTO, A. W.; ROCHA, D. C.; OLIVEIRA, D. F. G. DE S.; SILVA, P. L. DA. Avaliação do potencial energético do resíduo sólido urbano de Piracicaba para produção de biogás. *Bioenergia em Revista: Diálogos*, ano 6, n. 1, p. 47-75. 2016.

MORGADO, T. C., FERREIRA, O. M. *Incineração de resíduos sólidos urbanos, aproveitamento na co-geração de energia*. Estudo para a região metropolitana de Goiânia. PUC Goiás. 2006. Disponível em: http://web-resol.org/textos/incineracao_de_residuos_solidos_urbanos.pdf. Acessado em 12 de junho de 2020.

NEVES, F. DE O. *Gestão pública de resíduos sólidos urbanos: problemática e práticas de gestão no oeste paranaense*. Tese (Doutorado). UFPR: Curitiba, 2013. 279 p.

PIEIDADE, M.; AGUIAR, P. *Opções de gestão de resíduos urbanos - Série Guias Técnicos 15*. Lisboa: Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. 2013.

REMPEL, N. *Biodigestão anaeróbica da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos consorciado com glicerina*. Dissertação (Mestrado). Unisinos 2014. 107 p.

ROCHA, R. R. da. *Potencial de geração de energia elétrica procedente do biogás oriundo dos resíduos sólidos urbanos no município de São Luiz Gonzaga/RS*. Tese (Graduação). UNIJUÍ: Ijuí. 2019. 59 p.

SABIÁ, R. J.; DUARTE, P. H. G.; MARTINS, M. C. B.; JÚNIOR, F. T. A. Estudo da geração de energia a partir de resíduos sólidos. *23º Congresso Bras de Eng Sanitária e Ambiental*. 2005.

SEDEMA. Revisão PMGIRS-2019. Anexo 19. Gravimetria dos Resíduos Sólidos Urbanos. Versão Completa. 76 p. 2015. Disponível em: https://130d0c4c-ab3e-edc8-1080-4d80417aba96.filesusr.com/ugd/9804b1_c3c16b9944874c4dbb6552b9f0c578ef.pdf. Acessado em: 23 de maio de 2020.

SPIGOLON, L. M. G. *A otimização da rede de transporte de RSU baseada no uso do SIG e análise de decisão multicritério para a localização de aterros sanitários*. (Doutorado) USP: São Carlos. 2015. 217 p.

STANTEC . *A technical review of municipal solid waste thermal treatment practices* - final report. Bumbaby, BC. 2011. Disponível em: https://static1.squarespace.com/static/57f5a79e6a49633bcbec59be/t/5867c767d2b857fd0d17fb04/1483196275650/Etude_technique.pdf Acessado 19 de maio de 2020.

TRENTIN, A. W. S.; BRAUN, A. B. RODRIGUES, A. L.; LOPES, D. A. R. Estudo da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos em Santa Cruz do Sul, Brasil. *Revista de Ciências Ambientais. Canoas*, v. 3, n. 1, p. 07-14. 2019.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Solid Waste Management and Green House Gases – A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks. USEPA. 2002.

VAN ELK, A. G. H. P. *Mecanismo de desenvolvimento limpo aplicado a resíduos sólidos: redução de emissões na disposição final*. Coordenação de Karin Segala – Rio de Janeiro: IBAM, 2007. 40 p.

VESSALLI, B. A.; NETO, H. F.; OLIVEIRA, L. H. A. *Caracterização do Potencial Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos do Município De Piracicaba*. TCC (Graduação – Tecnologia) - Faculdade de Tecnologia de Piracicaba, Tecnologia em Biocombustíveis, junho de 2013.

YOUG, G. C. *Municipal Solid Waste to energy conversion processes: economic, technical and renewable comparison*. John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, 2010. 304 p.

ZANIN, M.; MANCINI, S. D. *Resíduos plásticos e reciclagem: aspectos gerais e tecnologia*. EdUFSCar, São Carlos: SP. 2004.

1 MAZZONETTO, Alexandre Witier. Possui Graduação em Engenharia Agrícola pela Universidade Estadual de Campinas - FEAGRI/UNICAMP. Mestrado em Engenharia Agrônômica - Máquinas Agrícolas/Biomassa - Colheita Integral de Cana Crua, pela Universidade de São Paulo - ESALQ/USP. Doutorando pela Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas - Departamento de Energia - FEM/UNICAMP (Caracterização e potencial energético de biomassas residuais da região de Piracicaba - SP). Na Graduação envolveu-se em Pesquisa/Desenvolvimento de processos térmicos, desenvolvendo um secador rotativo de sementes e outro de leito fluidizado. Desde o Mestrado vem trabalhando com fontes renováveis de energia e biomassas residuais (tratamento e geração de energia); levando-o a cursar Química na Universidade Mackenzie (Bacharel, Licenciatura e Industrial). Processos térmicos para obtenção de biocombustíveis, gaseificação, pirólise e combustão/incineração, e combustíveis sustentáveis, gás de síntese (Syngas), produção e uso do biogás - biodigestão anaeróbia de diversas biomassas residuais. Professor na FATEC Piracicaba (Biocombustíveis e Gestão Empresarial).

2 CARBONI, Rafael Willians. Possui graduação em Tecnologia em Biocombustíveis pela Faculdade de Tecnologia de Piracicaba Dep. “Roque Trevisan” (2020) e graduação em Engenharia de Controle e Automação pela Faculdade Anhanguera de Piracicaba (2013). Atualmente é analista de programação agroindustrial junior - RAÍZEN Energia.