

# Potencial de geração de energia a partir do resíduo sólido domiciliar (RSD) de Piracicaba: estimativas por rotas anaeróbias e térmicas

MAZZONETTO, Alexandre Witier  
SANTOS, Maria Vilma dos

## Resumo

Na última década a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) sofreu uma marcante evolução, em virtude do desenvolvimento industrial, crescimento de áreas urbanas, avanços econômicos e modificação do sistema de consumo, houve uma ampliação demasiada na geração de resíduos por todo o mundo. Desde 2010, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) atua com mudanças no descarte, tratamento e destinação dos resíduos gerados por toda a sociedade, com isto os aterros sanitários recebem uma boa parte desses insumos os quais podem ser um grande gerador de biogás, sendo um dos grandes desafios para a sociedade moderna é a destinação adequada para os resíduos provenientes das atividades humanas, pois o consumo cresce junto com o desenvolvimento econômico e demográfico. Pela Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (2010), o resíduo passará a ser um problema com custo para seus geradores, pois os geradores serão responsáveis pelo tratamento e destinação adequada do resíduo para os 30% que não forem recicladas ou tratadas. Este artigo teve por objetivo estimar e comparar o potencial de geração de energia a partir do resíduo sólido urbano (RSU) de Piracicaba/SP pelas tecnologias anaeróbias e térmicas – incineração, pirólise e gaseificação. Esses oferecem um aproveitamento energético, mas apenas os processos térmicos fazem tratamento, reduzem volume, eliminam riscos sanitários e geram energia. Foram usados os dados históricos da secretaria de meio ambiente de Piracicaba/SP para estimar pelas equações do IPCC e USEPA para estimar a produção de biogás e taxas de conversões de tonelada de RSU para kW.h obtidas na literatura. O resultado mostrou maior produção de energia pelas tecnologias térmicas de gaseificação.

**Palavras-chaves:** resíduos sólidos, biomassas residuais, potencial energético, tratamento de resíduo, energia.

## Abstract

In the last decade, the management of municipal solid waste (RSU) has undergone a marked evolution, due to industrial development, growth of urban areas, economic advances and modification of the consumption system, there has been a significant expansion in waste generation worldwide. Since 2010 the National Solid Waste Policy (PNRS), works with changes in the disposal, treatment and disposal of waste generated by society throughout society, with this landfills receive a good part of these sources which can be a major generator of biogas, being one of the major challenges for modern society is the proper disposal for waste from human activities, as consumption grows along with economic and demographic development. By the National Solid Waste Policy (PNRS (2010), the waste will become a problem with cost for its generators, because the generators will be responsible for the treatment and proper disposal of the waste for the 30% that are not recycled or treated. This article aimed to estimate and compare the potential of energy generation from the urban solid waste (US) of Piracicaba/SP by anaerobic and thermal technologies – incineration, pyrolysis and gasification. These offer an energy use, but only thermal processes are treated, reduce volume, eliminate health **risks** and generate energy. Historical data from the Environment Secretariat of Piracicaba/SP were used to estimate the IPCC and USEPA equations to estimate biogas production and conversion rates of Ton of RSU to kW.h obtained in the literature. The result showed higher energy production by thermal gasification technologies.

**Keyword:** solid waste, residual biomass, energy potential, waste treatment, energy.

## **Resumen**

En la última década la gestión de residuos sólidos urbanos (RSU) ha experimentado una marcada evolución, debido al desarrollo industrial, el crecimiento de las áreas urbanas, los avances económicos y la modificación del sistema de consumo, hubo una expansión excesiva en la generación de residuos en todo el mundo. Desde 2010, la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS) trabaja con cambios en la disposición, tratamiento y destino de los residuos generados por la sociedad en su conjunto, con esto, los rellenos sanitarios reciben buena parte de estos insumos, que pueden ser un gran generador de biogás. Uno de los grandes desafíos de la sociedad moderna es el destino adecuado de los residuos de las actividades humanas, ya que el consumo crece junto con el desarrollo económico y demográfico. De acuerdo con la Política Nacional de Residuos Sólidos - PNRS (2010), los residuos se convertirán en un problema costoso para sus generadores, ya que los generadores serán los encargados del tratamiento y disposición adecuada de los residuos del 30% que no sean reciclados ni tratados. Este artículo tuvo como objetivo estimar y comparar el potencial de generación de energía a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) en Piracicaba / SP mediante tecnologías anaeróbicas y térmicas: incineración, pirólisis y gasificación. Estos ofrecen aprovechamiento energético, pero solo los procesos térmicos los tratan, reducen volumen, eliminan riesgos para la salud y generan energía. Los datos históricos del departamento ambiental de Piracicaba / SP se utilizaron para estimar mediante las ecuaciones del IPCC y USEPA para estimar la producción de biogás y las tasas de conversión de toneladas de RSU a kW.h obtenidas en la literatura. El resultado mostró una mayor producción de energía mediante tecnologías de gasificación térmica.

**Palabras clave:** residuos sólidos, biomasa residual, potencial energético, tratamiento de residuos, energía.

## INTRODUÇÃO

Na última década a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) sofreu uma marcante evolução, em virtude do desenvolvimento industrial, crescimento de áreas urbanas, avanços econômicos e modificação do sistema de consumo, houve uma ampliação demasiada na geração de resíduos por todo o mundo.

No Brasil, partes significativas dos resíduos sólidos e líquidos produzidos são lançados em rios, córregos, bacias hidrográficas urbanas, terrenos baldios e demais áreas que com o passar do tempo tem gerado impactos ambientais negativos de diferentes magnitudes. Uma possibilidade adequada em aterros sanitários é o tratamento dos resíduos sólidos urbanos, que após a separação de matéria inorgânica e orgânica, o material orgânico pode se tornar insumo para a produção de biogás, uma fonte renovável de energia. A Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010) é bastante atual e contém instrumentos importantes para permitir o avanço necessário ao País no enfrentamento dos principais problemas ambientais, sociais e econômicos decorrentes do manejo inadequado dos resíduos sólidos.

Pereira Neto (1993) constatou que apenas 0,01% é incinerado, 1,0% tratado em usinas de compostagem, 9,0% são destinados a aterros sanitários, 12% são dispostos em aterros controlados e 78,0% são lançados em lixões.

Segundo Mota et al (2009), os resíduos são gerados a partir de lixo classificados em: lixo doméstico (gerados em casas, apartamentos, condomínios e demais edificações residenciais); lixo comercial (gerados em estabelecimentos comerciais); lixo público (resíduos presentes em logradouros públicos); lixo domiciliar especial (entulho de obras, pilhas e baterias, lâmpadas e pneus); e lixo de fontes especiais como o lixo industrial; lixo radioativo; lixo de portos, aeroportos e terminais rodoferroviários; lixo agrícola (gerados a partir de restos de embalagens impregnados com pesticidas e fertilizantes químicos, etc.); e resíduos de serviços de saúde (farmácias, hospitais, clínicas, laboratórios, dentre outros).

De acordo com a responsabilidade em gerenciamento, agrupam-se em dois extensos grupos. Resíduos Sólidos Urbanos (RSU): denominam-se domésticos ou residenciais; comerciais e públicos e Resíduos Especiais: entendem-se como os de caráter industriais; da construção civil; radioativos; de portos; aeroportos; serviços de saúde; agrícolas e rodoferroviários (ABNT NBR 10004, 2004). No Brasil, os resíduos sólidos urbanos são constituídos, basicamente, por umidade, matéria orgânica putrescível, plástico, papel e papelão. Para Leite et al (2009) o percentual de umidade gira em torno de 50% (em peso), dependendo da época do ano e dos hábitos e costumes da população, enquanto os 50% restantes que correspondem à fração sólida, estão presentes nos

demais constituintes físico-químicos. Conforme Augusto (2007), a biodigestão anaeróbia é definida como processo biológico onde a matéria orgânica é degradada em ambiente anaeróbio e sem luz, e transformada em metano e dióxido de carbono.

Para Chernicharo (1997), a digestão da matéria orgânica em ambientes anaeróbios se dá por processos metabólicos complexos de fermentação e respiração, que ocorrem em etapas sequentes com pelo menos três grupos de microrganismos, bactérias acidogênicas, bactérias acetogênicas, e microrganismos metanogênicos, onde que as bactérias fermentativas acidogênicas convertem por hidrólise e fermentação os compostos orgânicos complexos em compostos mais simples. Os produtos resultantes do processo de hidrólise, como açúcares, aminoácidos e ácidos graxos, são metabolizados no interior das células, por fermentação, produzindo diversos compostos mais simples como ácidos orgânicos, cetonas, dióxido de carbono e hidrogênio, além de novas células bacterianas. Os compostos orgânicos intermediários são oxidados pelas bactérias acetogênicas e convertidos de propionato e butirato, por exemplo, por substratos apropriados para os organismos metanogênicos, como acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Por fim, os microrganismos metanogênicos anaeróbios estritos convertem estes compostos em metano

Para Augusto (2007), a digestão anaeróbia é natural de diversos ambientes, pântanos, sedimentos de rios, lagos e mares, minas, trato digestivos e esta pode ocorrer dentro de reatores onde apresenta maiores taxas de geração de metano e maior facilidade operacional para recuperação do biogás (AMARAL, 2004). De acordo com Filizola, Leite e Prasad (2006), biodigestão anaeróbia da fração orgânica putrescível em biodigestores, quando bem operados, não causa problemas com odores e fornece melhores condições operacionais, quando comparados aos aterros sanitários.

Este trabalho realizou uma estimativa do potencial energético do resíduo sólido produzido pelo município de Piracicaba/SP, comparando os processos anaeróbios (produção de biogás) e térmicos – incineração, pirólise e gaseificação. Também observando as vantagens e desvantagens de cada processo, de acordo com a política nacional de resíduo sólido (PNRS) – reduzindo a necessidade de aterro sanitário.

## **REVISÃO DE LITERATURA**

De acordo com a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), NBR 10.004:2004, resíduos sólidos são resultados das atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Também são incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água (ETA), aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu

lançamento na rede pública de esgotos (ETE) ou corpos de água. Os resíduos sólidos são aqueles em estado sólido e semissólido resultantes de atividades de origem doméstica, industrial, hospitalar, agrícola, comercial de serviços e varrição, bem como os lodos resultantes do tratamento de água, equipamento e instalações de controle de poluição e alguns líquidos cuja propriedade torne viável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou cursos de água.

A Lei nº 12.305/2010, que instrui a Política Nacional de Resíduos Sólidos os resíduos sólidos têm a seguinte classificação (MMA, 2010):

- a) Resíduos Domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) Resíduos de Limpeza Urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) Resíduos Sólidos Urbanos: os englobados nas alíneas "a" e "b";
- d) Resíduos de Estabelecimentos Comerciais e Prestadores de Serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas "b", "e", "g", "h" e "j";
- e) Resíduos dos Serviços Públicos de Saneamento Básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea "c";
- f) Resíduos Industriais;
- g) Resíduos De Serviços De Saúde;
- h) Resíduos Da Construção Civil;
- l) Resíduos Agrossilvopastoris;
- j) Resíduos De Serviços De Transportes;
- k) Resíduos De Mineração.

Os resíduos podem ser classificados de acordo com suas características, conforme a NBR 1004, como apresenta Quadro 1.

**Quadro 1. Classificação dos resíduos sólidos**

Característica Física		Característica Química	
Secos	Molhados	Orgânico	Inorgânico
Papeis	Restos de comida	Restos de alimentos	Plástico
Plásticos	Casca de frutas	Ovos	Vidro
Espuma	Verduras	Ossos	Borracha
Tecido	Legumes	Cabelos	Tecido
Vidro	Alimentos estragados	Pó de café	Metal
Madeira	Ovos	Podas de Jardim	Isopor

Fonte: Adaptado da NBR 1004 (ABNT 2004).

Desde 2010, o Brasil possui uma Política Nacional de Resíduos Sólidos, que estabelece o prazo até 2020 para que o país tenha toda estrutura necessária para destinação adequada dos resíduos sólidos, conhecido como lixo. Para isso será preciso agir nas áreas políticas, econômicas ambientais, culturais e sociais, para que essa meta seja cumprida. Com isso, a palavra lixo, não serve mais para definir o material descartado pelas residências, empresas e órgãos públicos, passando a ser chamado atualmente de resíduo sólido (SEBRAE, 2017).

### **Gestão dos Resíduos no Brasil**

De acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2019), em 2017 o Brasil coletou 71,6 milhões de toneladas de resíduos sólido, com um índice de cobertura de 91,2% para o país; cerca de 42,3 milhões de toneladas de RSU, ou 59,1% do coletado foram dispostos em aterros sanitários. O restante, que corresponde a 40,9% dos resíduos coletados, foi despejado em locais inadequados, assim, mais de 29 milhões de toneladas de resíduos em lixões ou aterros controlados, sem sistemas e medidas para proteção do meio ambiente contra danos e degradações.

A geração de RSU aumentou 1% em relação a 2016 e passou para uma geração de RSU per capita de 1,035 kg/hab/dia. A maior parte dos órgãos públicos já implementa ações que estão se inserindo no projeto Coleta Seletiva Solidária, conforme o Decreto nº 5940, de 25 de outubro de 2006, que estabelece a separação dos resíduos recicláveis descartados pelos órgãos e entidades da administração pública federal direta e indireta, na fonte geradora, e a sua destinação às associações e cooperativas dos catadores de materiais recicláveis, constituindo-se em exemplo na busca da inclusão social de cidadãos brasileiros, de acordo com o Ministério do Meio Ambiente - MMA (2017).

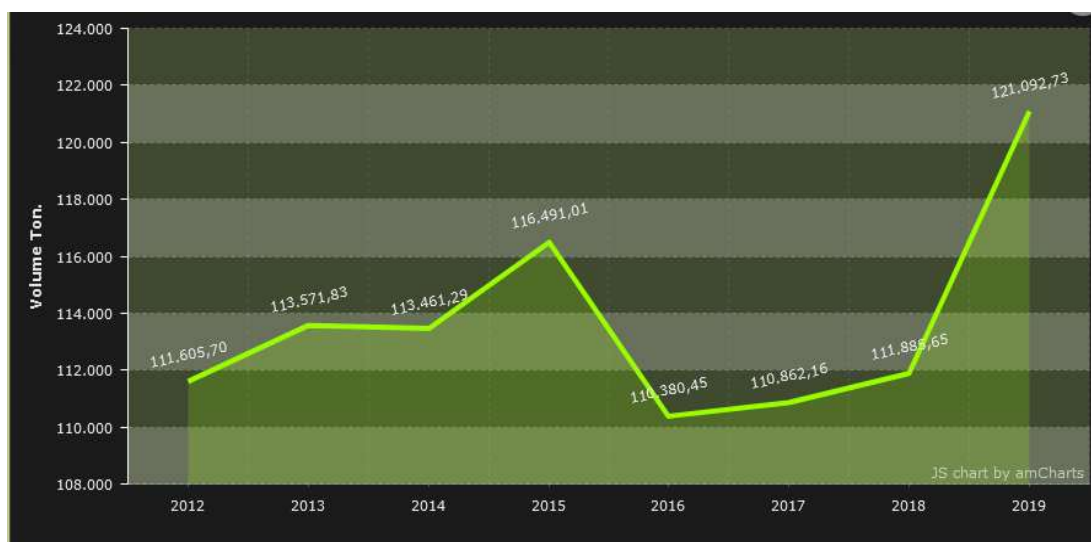
De acordo com dados do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS, 2010), apesar de 30% de todo o lixo produzido no Brasil ter potencial de reciclagem, apenas 3% de fato é reaproveitado. Coleta e logística reversa Atualmente em Piracicaba a coleta é destinada para área de transbordo no antigo Aterro Sanitário do Pau Queimado e encaminhada para Aterros licenciados pela CETESB, e o Aterro Sanitário do Município de Rio das Pedras. Conforme o CADRI do Aterro do Município de Rio das Pedras, Piracicaba pode encaminhar até 60 ton/dia, sendo o restante encaminhado para o Aterro em Paulínia (PMGIRS, 2014).

### Composição dos resíduos sólidos

Vessalli, Favarin Neto e Oliveira (2013), coletaram amostras de resíduos sólidos de dez bairros do município de Piracicaba/SP, a fim de caracterizar a composição do resíduo sólido desses bairros e, com isso, terem uma estimativa da composição do resíduo sólido municipal. Como apresentado a maior parte do resíduo sólido é orgânico com 62,498%; os recicláveis totalizam 28,534%, lembrando-se que os recicláveis precisam de coleta seletiva para poder usar papéis, e que os polímeros podem gerar energia e/ou serem reciclados. As frações de materiais orgânicos, papel, plásticos (polímeros) e têxteis podem gerar energia. As características qualitativas e quantitativas dos resíduos sólidos podem variar em função de vários aspectos, tais como: sociais, econômicos, culturais, geográficos e climáticos, ou seja, os mesmos fatores que também diferenciam as comunidades entre si, NUCASE (2007). O crescimento das cidades brasileiras não foi acompanhado pela provisão de infraestrutura e de serviços urbanos, entre eles os serviços públicos de saneamento básico, que envolvem o abastecimento de água potável, coleta e tratamento de esgoto sanitário, estrutura para a drenagem urbana e o sistema de gestão e manejo dos resíduos sólidos (MMA, 2011).

De acordo com a SEDEMA (Secretaria Municipal de Defesa do Meio Ambiente, 2020), Piracicaba/SP gera cerca de nove mil toneladas de resíduos doméstico por mês, enquanto no ano de 2019 foi de 121.092,73, conforme a Figura 1.

Figura 1. Evolução dos resíduos domiciliares coletados em Piracicaba/SP, de 2012 a 2019



Fonte: SEDEMA (2019).

## **Incineração**

A incineração transforma os RSU basicamente em cinzas, gases da combustão e calor. O calor gerado pode ser aproveitado para geração de eletricidade (BRITO, 2013). Para a recuperação energética dos RSU via processo de incineração, é importante conhecer o poder calorífico inferior (PCI) (SILVA et al., 2014; ZHOU et al., 2014).

Geralmente, o PCI é obtido a partir de relações matemáticas, do poder calorífico superior (PCS), do teor de umidade e da fração mássica de hidrogênio. O PCS é obtido experimentalmente com auxílio de um calorímetro, no entanto esse método requer mais tempo para obtenção do poder calorífico e apresenta custo elevado (MAZZONETTO et al, 2019).

Assim, faz-se necessário o uso de modelos matemáticos para a estimativa do PCI dos RSU (LIU; PAODE; HOLSEN, 1996; SHU et al., 2006; CHANG et al., 2007). Podendo destacar algumas vantagens da incineração dentre elas: redução da massa e do volume dos resíduos; não exige grandes áreas (só a área da usina) e maior potencial de recuperação energética em comparação às tecnologias de biodigestão anaeróbia e aterro sanitário (Mazzonetto et al, 2019), não deixando de lado as desvantagens da incineração: emissão de poluentes (como CO<sub>2</sub>, CO, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, entre outros); o custo de implantação e operação elevado (principalmente por ter que controlar a emissão de poluentes); e necessidade de pré-tratamento de resíduos com elevado teor de umidade (SILVA et al., 2019).

A incineração é bastante difundida pelo mundo, onde a tecnologia de aproveitamento do resíduo urbano para a geração de energia via incineração, tendo em vista a União Europeia, onde a participação deste tratamento no resíduo doméstico e similar passou de 13,5% em 1996 para 22% em 2010, segundo a agência europeia de estatísticas Eurostat (EUROSTAT, 2014).

## **Pirólise**

A pirólise pode ser definida como a degradação térmica de qualquer material orgânico sólido na ausência total de um agente oxidante, ou em uma quantidade tal que a gaseificação não ocorra totalmente (FIGEUIREDO, 2011). A pirólise é um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas de (500° - 800° C) em atmosfera não oxidante, para a formação de três produtos principais: um resíduo sólido rico em carbono (carvão), os licores pirolenhos ou bio-óleo, e gases voláteis não condensáveis (SOUZA, ALENCAR e MAZZONETTO, 2016).

A biomassa em processos de conversão termoquímica como liquefação, gaseificação, pirólise e combustão (ZANG, et al., 2010). A pirólise também pode ser utilizada como um método de reciclagem, porque permite a conversão de resíduos de plástico em produtos químicos de valor



acrescentado, combustíveis de transporte e óleos lubrificantes (HAMIDI et al., 2013). No caso dos resíduos sólidos urbanos Martins et al. (2007), consideram a pirólise como alternativas promissora de tratamento, em virtude das enormes quantidades de resíduos sólidos urbanos gerado mundialmente e do indesejável impacto ambiental.

A pirólise de biomassa forma carvão, gases, líquidos leves e pesados e água em quantidades variadas, sendo que, é importante destacar que a decomposição da biomassa através da pirólise gera produtos como biocarvão, bio-óleo e também gases contendo H<sub>2</sub>, syngas (H<sub>2</sub> + CO) e hidrocarbonetos gasosos leves. A produção depende particularmente do material pirolisado, das dimensões do material, da taxa de aquecimento, da temperatura, tempo de reação e do tipo de processo (PÉREZ, 2004).

### **Gaseificação**

Por sua vez, a gaseificação de biomassa é uma rota tecnológica promissora para se converter biomassa nesses produtos (IRENA, 2019). A gaseificação é a conversão de biomassa, ou de qualquer combustível sólido em um gás energético ou de síntese, através da oxidação parcial a temperaturas elevadas (700° C a 1000° C) conforme Sánchez (2010).

Já para Lora et al (2008), a gaseificação é o processo termoquímico de converter um insumo sólido (a biomassa) em um gás apresentando vantagens significativas sobre os demais processos de geração de energia, por que dispensa o ciclo a vapor, podendo o gás ser queimado diretamente em motor de combustão interna.

### **Geração de resíduos sólidos urbanos**

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública – ABRELPE, entre 2017 e 2018, a geração de RSU no Brasil aumentou quase 1% e chegou a 216.629 toneladas diárias. Como a população também cresceu no período (0,40%), a geração per capita teve elevação um pouco menor (0,39%). Isso significa que, em média, cada brasileiro gerou pouco mais de 1 quilo de resíduo por dia, conforme Abrelpe/IBGE estima que 79 milhões de toneladas de resíduos foram geradas em 2018, e 380 kg/ano foi a geração média de RSU por pessoa, isto é, de resíduos sólidos urbanos entre 2017 e 2018, a geração de RSU no Brasil aumentou quase 1% e chegou a 216.629 toneladas diárias. O volume coletado cresceu mais que a geração, atingindo 199.311 toneladas por dia. Houve expansão em todas as regiões do Brasil, com exceção do Nordeste, conforme Tabela 1.

**Tabela 1. Quantidade de RSU coletada nas regiões e no Brasil**

Regiões	RSU 2017 [ton/dia]	População 2018	RSU 2018 [ton/dia]
Norte	12.705	18.182.253	13.069
Nordeste	43.871	56.760.780	43.763
Centro-Oeste	14.406	16.085.885	14.941
Sudeste	103.741	87.711.946	105.977
Sul	21.327	29.754.036	21.561
<b>BRASIL</b>	<b>196.050</b>	<b>208.494.900</b>	<b>199.311</b>

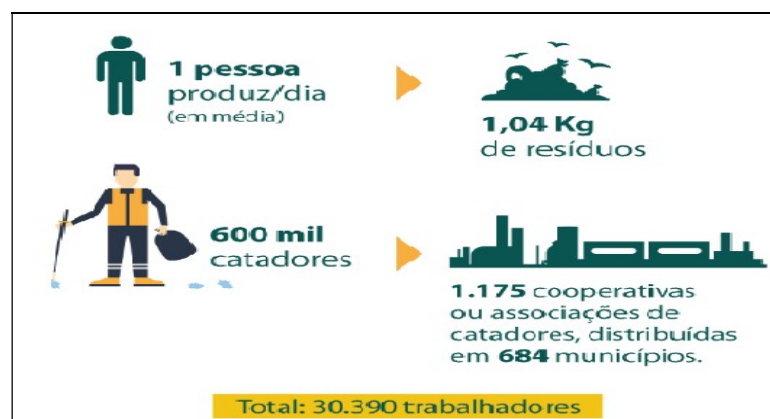
Fonte: Abrelpe/IBGE (2018).

Conforme Abrelpe (2018/2019), a destinação adequada em aterros sanitários recebeu 59,5% dos resíduos sólidos urbanos coletados: 43,3 milhões de toneladas, um pequeno avanço em relação ao cenário do ano anterior de 2017 para 2018. O restante (40,5%) foi despejado em locais inadequados por 3.001 municípios. Ou seja, 29,5 milhões de toneladas de RSU acabaram indo para lixões ou aterros controlados.

### Tratamento e disposição final de RSU coletados no Brasil

Os mercados de limpeza urbana demonstram evolução em todas as regiões, e movimentaram recursos que superaram a casa dos R\$ 26,5 bilhões. Isto é notado, pois em 2015 cresceu em todas as regiões, em comparação aos dados de 2014. A região sudeste continua respondendo por mais de 50% dos RSU coletados e estão com o maior percentual sobre as demais regiões, com um total de 52,6%, aferidos em Kg/habitante/dia, relativos a 2014 e 2015, mediante os cálculos baseados na população de cada município (Figura 2).

**Figura 2. Situação dos trabalhadores de RSU**



Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2015).

## **Aterros**

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada IPEA (2012), o aterro controlado tratou – se de uma solução imediata encontrada para dar resposta à extensa massa de resíduos gerada e que os municípios não conseguiam extinguir. Essa solução retrata uma espécie inadequada para a disposição final dos resíduos. O grande problema inicia - se quando o chorume alcançar os lençóis freáticos e resultarem epidemias nas cidades onde essa solução foi implantada. O termo aterro controlado, começou a ser usado durante os últimos anos para denominar os aterros “não sanitários”, os quais apresentam algumas imperfeições ou equívocos, tais como impermeabilização do fundo, não recolhimento e tratamento do percolado, não coleta dos gases produzidos e resultante queima ou aproveitamento, não recobrimento com camada de terra ao final da trajetória diária de trabalho, entre outros aspectos.

Para Mazzonetto e Dario (2017), aterro sanitário trata-se de um espaço físico, planejado e tecnicamente preparado para receber resíduos sólidos, cujas características recaem sobre a necessidade de tratamento dos gases e líquidos gerados, bem como a proteção do solo.

De acordo com a NBR 10.004 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) existem diferentes tipos de disposição dos resíduos sólidos: aterro sanitário, aterro controlado e lixão. Os lixões são locais onde o lixo coletado é lançado diretamente sobre o solo sem qualquer controle e sem quaisquer cuidados ambientais, poluindo tanto o solo, quanto o ar e as águas subterrâneas e superficiais das vizinhanças.

A disposição inadequada dos resíduos sólidos promove a contaminação do solo, do ar e das águas superficiais e subterrâneas, além da proliferação de vetores de doenças, influenciando negativamente a qualidade ambiental e a saúde da população (LEITE et al., 2003).

A Lei nº 12.305/10, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), considera que a destinação final adequada dos resíduos sólidos seja o aterro sanitário, que faz uso de técnicas apropriadas, não causando danos à saúde pública e à segurança das pessoas que trabalham no local, utiliza princípios de engenharia para confinar e reduzir o volume dos resíduos, sendo ao final coberto por camada de terra e o solo completamente impermeabilizado, evitando infiltrações ou escoamento do chorume.

## **Gases Metano (CH<sub>4</sub>) e Biogás**

O biogás é gerado como resultado do processo fermentativo da digestão anaeróbia, podendo servir com energia limpa a fim de reduzir as emissões e substituir uso de fontes de energia fósseis que são utilizadas em atividades domésticas ou comerciais (RAMOS-SUAREZ et al., 2019).

O biogás é composto por 65% a 70% de CH<sub>4</sub>, 25% a 30% de CO<sub>2</sub> e uma pequena fração de outros gases, chamados de “gases traços”, sendo eles N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub>, entre outros. O gás metano, principal componente do biogás, é 21 vezes mais potente que o dióxido de carbono, para o aquecimento global. A sua queima favorece a redução das emissões de gases de efeito estufa (Ministério do Meio Ambiente, 2014).

Sendo que aproveitamento energético desse biogás pela degradação dos resíduos e transformando numa forma de energia necessária, podendo ser em eletricidade, vapor e combustível, conforme a sua natureza química do seu potencial empregado ou do biogás produzido no aterro, onde será possível transportar para um sistema que destina a condução, em tratamento, purificação e também a queima desse metano em flare, que garanta uma eficiência desejada (MMA, 2015).

## **METODOLOGIA**

Foram levantadas as produções de RSD (resíduo sólido domiciliar) do município de Piracicaba/SP, pelos sites oficiais do município. 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.

Para ao desenvolvimento deste trabalho foram coletadas informações referentes aos resíduos sólidos urbanos de Piracicaba/SP, disponibilizados pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente (SEDEMA) e literaturas acadêmicas.

De acordo com a Tabela 2, metodologia revisada do IPCC (1996), a determinação da emissão anual de CH<sub>4</sub> para cada país ou região pode ser calculada pela Equação 1.

Equação 1:

$$E = \text{Pop}_{\text{urb}} \times \text{Taxa RSD} \times \text{RSD}_f \times \text{FCM} \times \text{COD} \times \text{COD}_f \times F \times 16/12 \quad (1)$$

Onde:

E= Emissão de Metano [GgCH<sub>4</sub>/ano];

Pop<sub>urb</sub>: População urbano (habitantes);

TxRSU: Taxa de resíduos sólidos urbanos por habitantes por dia [Kg de RSU/hab. por dia];

RSU<sub>f</sub>: Fração de RSU que é depositada em locais de disposição de resíduos sólidos [%];

FCM: Fator de correção do metano [%];

COD: Carbono orgânico degradável [Kg de C/kg de RSU];

COD<sub>f</sub>: Fração de COD que vira metano [%];

F: Fração em volume de metano no biogás [%];

(16/12): Fator de conversão de carbono em metano [Kg de CH<sub>4</sub>/kg de C];

$\rho_{CH_4}$ : massa específica do metano [kg/m<sup>3</sup>].

O valor da massa específica ( $\rho$ ) do metano é 0,740 kg/m<sup>3</sup>.

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, 2002). Nesse sentido, deve ser usado como uma ferramenta primária, e de acordo com a Equação 2 (USEPA, 2002):

Pela USEPA (2002) tem-se a Equação 2 - geração anual de gás metano

$$Q = \text{População} \times \text{Taxa de RSD} \times \text{RSDf} \times 0,45 \times F(2)$$

Onde:

Q = m<sup>3</sup> de metano por dia

População = 404.142Hab. (IBGE, 2019) e 407.252 (IBGE, 2020)

Taxa de RSD = produção de resíduo sólido diária por habitante de Piracicaba/SP;

Taxa de RSDf = fração da cidade coleta 95%;

0,45 = adimensional;

F = fração de metano no biogás = 50% = 0,5

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. Segundo Erler (2010), os cálculos são limitados para estimar a geração em aterros, já que foram desenvolvidos para estimar a emissão de gases do efeito estufa nas cidades. Os cálculos são feitos de acordo com as equações (IPCC, 1996):

**Equação 3.** Emissão anual de gás metano

$$ECH_4 = \frac{(PU * RSD * RSDf * Lo)}{\rho_{CH_4}} \quad (3)$$

Sendo:  $ECH_4$ : emissão de gás metano, em toneladas de  $CH_4$  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  $CH_4$  por toneladas de RSU;

$\rho_{CH_4}$ : massa específica do metano, em kg por  $m^3$ .

O potencial de geração de metano (Lo) é estimado conforme a Equação 4 (IPCC, 1996):

**Equação 4.** Potencial de geração de metano

$$Lo = MCF * COD * CODf * F * (16/12) \quad (4)$$

Sendo: Lo: potencial de geração de metano, em toneladas de  $CH_4$  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 quantidade de carbono orgânico degradável (COD) e de carbono disponível para decomposição química (CODf) foram obtidas do SEDEMA (2015) e Mazzonetto et al (2016), conforme a Tabela 2 apresenta. O COD é baseado na composição do resíduo e na quantidade de carbono presente em cada componente (IPCC, 1996).

A estimativa do potencial de produção de energia elétrica por processos térmicos foi baseada nas taxas de Young (2010), para fazer as estimativas energéticas usou-se duas fontes para estimar a composição do resíduo sólido urbano de Piracicaba/SP; SEDEMA (2015).

A Tabela 2 apresenta a composição média do resíduo sólido domiciliar (RSD) de Piracicaba/SP, para este trabalho usou-se o valor médio.

**Tabela 2. Composição média do RSD dadas pelo SEDEMA (2015) e Mazzonetto et al (2016) para Piracicaba/SP**

	Fonte	Material Orgânico	Metais	Polímeros/ Plásticos	Vidros	Papéis	Outros
<b>Média geral para interior SP [%]</b>	-	<b>60,70</b>	<b>2,73</b>	<b>9,20</b>	<b>4,37</b>	<b>10,53</b>	<b>12,47</b>
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
<b>Média de Piracicaba [%]</b>		<b>62,61</b>	<b>1,70</b>	<b>5,34</b>	<b>10,66</b>	<b>6,81</b>	<b>12,90</b>

Fonte: Adaptada das fontes citadas.

Os valores estimados da produção de energia elétrica pelos processos térmicos e anaeróbios pelos resíduos produzidos por Piracicaba/SP, poderiam suprir um percentual do consumo energético municipal ou de algum setor do município.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com o anuário de energéticos por municípios no Estado de São Paulo (Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2020), Piracicaba é o sexto maior consumidor de energia elétrica do Estado. O consumo total e dos serviços públicos de Piracicaba/SP são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3. Demanda de energia em cada setor público (fração) e total de Piracicaba/SP**

Iluminação Pública [kwh]	Poder Público <sup>1</sup> [kWh]	Serviço público <sup>2</sup> [kWh]	Total [kWh]
40.529.410	35.858.471	84.305.301	<b>2.172.571.731</b>

Fonte: Anuário Energético ESP (2020).

<sup>1</sup> Unidades de administração direta; <sup>2</sup> Água, esgoto e Saneamento.

A estimativa de produção de energia elétrica com os resíduos sólidos domiciliares e esgoto do Município de Piracicaba/SP, utilizando-se a geração de biogás (processo anaeróbio) são apresentadas na Tabela 4, para o resíduo sólido domiciliar e esgoto das ETE's.

**Tabela 4. Estimativas de geração de eletricidade usando-se as equações do IPCC (1996) e USEPA (2002) para a cidade de Piracicaba, nos anos de 2019 e 2020**

Por ano (365 dias)	Piracicaba 2019	Piracicaba 2020
População	404.142,0	407.252,0
IPCC RSU [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ]	30.736.280	30.194.830
USEPA RSU [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ]	24.185.370	23.759.320
IPCC ETE [m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> ]	1.695.389	1.708.436

IPCC RSU [kW.h]	52.251.677	51.331.210
USEPA RSU [kW.h]	41.115.129	40.390.844
IPCC ETE [kW.h]	2.882.162	2.904.341
IPCC RSU [R\$]	R\$ 29.247.876	R\$ 28.732.645
USEPA RSU [R\$]	R\$ 23.014.193	R\$ 22.608.775
IPCC ETE [R\$]	R\$ 1.613.290	R\$ 1.625.705
USEPA RSU e IPCC ETE [kW.h]	43.997.291	43.295.185
% do consumo total Energia	2,025	1,993
% da iluminação Pública	108,556	106,824
% do serviço Público	52,19	51,36

Fonte: Autores.

Para os valores da energia elétrica foram utilizados R\$ 559,75 (CCEE, 2020). Pelas estimativas apresentadas, mesmo usando-se para os cálculos uma conversão de 1,7 kWh por m<sup>3</sup> de biogás (motogerador comercial e médio rendimento), assim dando uma margem de segurança para o caso de implantação – que seria recomendado o uso de motogeradores de alto rendimento, com conversão de 1,93 kWh.m<sup>-3</sup> de biogás. As estimativas mostram que a iluminação pública pode ser toda suprida apenas pela produção de biogás oriunda dos resíduos municipais – domiciliares e esgoto.

A Tabela 5 apresenta as estimativas de geração de energia elétrica utilizando-se os processos térmicos nos RSD de Piracicaba/SP, segundo Young (2010). Também se avaliou a relevância dos valores estimados comparando-se com o consumo de Piracicaba/SP,

Tabela 5. Estimativas de geração de energia elétrica para a cidade de Piracicaba nos anos de 2019 e 2020

Processo Térmico	TAXA de Conversão de RSU para Energia	RSU/ano [ton] 2019	MWh/ano 2019	R\$/mês <sup>1</sup> 2019	RSU/ano [ton] 2020	MWh/ano 2020	R\$/mês <sup>1</sup> 2020
Incineração	493 kWh / ton RSU	121.092,7	59.698,7	33.416.356	118.959,6	58.647,1	32.827.693
Pirólise	518 kWh / ton RSU	121.092,7	62.726,0	35.110.898	118.959,6	61.621,1	34.492.383
Pirólise / Gaseificação	621 kWh / ton RSU	121.092,7	75.198,6	42.092.408	118.959,6	73.873,9	41.350.908
<b>Gaseificação Convencional</b>	<b>621 kWh / ton RSU</b>	<b>121.092,7</b>	<b>75.198,6</b>	<b>42.092.408</b>	<b>118.959,6</b>	<b>73.873,9</b>	<b>41.350.908</b>
Gaseificação com arco de plasma	740 kWh / ton RSU	121.092,7	89.608,6	50.158.425	118.959,6	88.030,1	49.274.833
<b>% do consumo total Energia</b>			<b>3,46</b>			<b>3,40</b>	
<b>% da iluminação Pública</b>			<b>185,54</b>			<b>182,27</b>	
<b>% do Serviço Público</b>			<b>89,20</b>			<b>87,63</b>	

Fonte: Autores.



Adotou-se o sistema de plasma convencional para se fazer as comparações para se ter uma margem de segurança, também cabe lembrar que, o uso de plasma térmico consome mais energia devido as elevadas temperaturas e recomenda-se quando houver presença de metais pesados no material a ser gaseificado.

Os resultados mostram que não apenas a iluminação pública estaria assegurada, como seria possível suprir as unidades de administração direta também, conforme mostrado na Tabela 3 (ou a fração do Poder Público da Tabela 3).

A comparação entre os processos é mostrada na Tabela 6, apenas comparando-se a energia elétrica estimada e possibilidade de atender a demanda municipal.

**Tabela 6. Comparação entre os processos anaeróbios e térmicos para geração de energia elétrica com os resíduos sólidos domiciliares de Piracicaba/SP**

Processo	kWh/ano 2019	KWh/ano 2020	kWh/ano 2019	KWh/ano 2020
USEPA RSD e IPCC ETE			2.882.162	2.904.341
Gaseificação Convencional	75.198.585	73.873.886		
% do consumo total Energia	3,46	3,40	2,03	1,99
% da iluminação Pública	185,54	182,27	108,56	106,82
% do Serviço Público	89,20	87,63	52,19	51,36

Fonte: Autores.

Os resultados apresentados pela Tabela 6 evidenciam a maior eficiência do processo térmico, que usou menos matéria prima – não se considerou os resíduos das ETE's para o processo térmicos, mas considerou-se a produção de biogás em ETE's para Piracicaba/SP. Além de produzir mais energia por tonelada de resíduo, o processo térmico é mais rápido, horas de processo versus dias do processo anaeróbio, usa uma área menor de processamento e garante o tratamento sanitário do resíduo. Outro fator importante do processo térmico é não precisar mais de aterros sanitário e o resíduo poder ser usado como adubo, cinzas e biochar, desde que não tenha contaminação de metal pesado.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estimativas mostraram o potencial para geração de energia elétrica, usando-se os resíduos domiciliares, que não tem essa destinação energética.

A energia produzida poderia suprir frações da demanda de eletricidade de Piracicaba/SP - iluminação pública e as unidades de administração direta também; eliminando riscos de *blackout* de

energia elétrica e a necessidade de grandes áreas para aterros, além de oferecer o tratamento sanitário os resíduos domiciliares, evitando proliferação de pragas (insetos e roedores), odores e risco de contaminação do ambiente ao redor.

A opção do processo térmico alinha-se com a política nacional de resíduo sólido (PNRS, 2010), oferecendo tratamento, reduzindo ou eliminando a necessidade de aterro e dando outra utilização aos resíduos – geração de energia.

## REFERÊNCIAS

BRELPE. Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil – 2018. São Paulo, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), 2019. Disponível em [abrelpe.org.br](http://abrelpe.org.br). Acesso em: 26 out. 2020.

ALVES, Raíza Silva; OLIVEIRA, Louise Antunes de; LOPES, Paloma de Lavor. *Crédito de Carbono: O mercado de crédito de carbono no Brasil*. 2013. Disponível em: <http://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos13/2018412.pdf>. Acesso em: 22 out. 2020.

ALVES, Raíza Silva; OLIVEIRA, Louise Antunes de; LOPES, Paloma de Lavor. Braga e Veiga (2010 p.2) CRÉDITO DE CARBONO: O mercado de crédito de carbono no Brasil: Protocolo de Quioto. 2013. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos13/2018412.pdf>2017. Acesso em: 24. out. 2020.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Agência Estadual Conveniada (Org.). BIG - Banco de Informação Geral: Capacidade de geração no Brasil. 2017. ANEEL a;b;c. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 01 out. 2020.

ANUÁRIO DE ENERGÉTICOS POR MUNICÍPIO NO ESTADO DE SÃO PAULO –2020 - Ano base 2019 Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente Disponível em [http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalcev2/intranet/BiblioVirtual/diversos/anuario\\_energetico\\_municipio.pdf](http://dadosenergeticos.energia.sp.gov.br/portalcev2/intranet/BiblioVirtual/diversos/anuario_energetico_municipio.pdf). Acesso em 28 out 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS (São Paulo). Comissão Pan-americana de Normas Técnicas (Org.). Normas Brasileiras: Normas Para Resíduos Sólidos Urbanos. 2004. Disponível em: <http://www.abnt.org.br/abnt/conheca-a-abnt>. Acesso em: 01 out. 2020.

BERECHE, Reynaldo. Estimativa do potencial de recuperação energética de resíduos sólidos urbanos usando modelos matemáticos de biodigestão anaeróbia e incineração. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 24, n. 2, p. 347-357, 2019.2014b; 2015c; 2016d. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br>. Acesso em: 2 set. 2020.

CETESB/SMA, Cetesb/sma 2003. Secretaria do Meio Ambiente. *RESOLUÇÃO SMA N° 47 DE 26 DE NOVEMBRO 2003*: Altera e amplia a Resolução SMA 21, de 21/11/2001; Fixa orientação para o reflorestamento heterogêneo de áreas degradadas e dá providências correlatas. 2003. Disponível em:

[http://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2003\\_Res\\_SMA\\_47.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2003_Res_SMA_47.pdf). Acesso em: 29 set. 2020.

CORTEZ, Luís Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares (Ed.). *Biomassa para energia*, 2008. Disponível em:  
<http://www.nipe.unicamp.br/2013/docs/publicacoes/inte-biomassa-energia070814.pdf>. Acesso em: 18 set. 2020.

FRANÇA, Diego (Org.). *Política Nacional de Resíduos Sólidos: Resíduos Sólidos segundo a Lei Brasileira*. 2013. Disponível em: <http://www.portalresiduossolidos.com/plano-nacional-de-residuos-solidos/>. Acesso em: 19 set. 2020.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Divisão Regional do Brasília; População de Piracicaba/SP. Resíduos Sólidos Urbano manual; Disponível em  
<http://www.ibge.gov.br/home/>. Acesso em: 01 set. 2020.

IPCC 2014, 2013 Supplement to the 2006 IPCC *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*, Hiraishi, T., Krug, T., Tanabe, K., Srivastava, N., Baasansuren, J., Fukuda, M. and Troxler, T. G. (eds). Published: IPCC, Switzerland. [http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/pdf/Wetlands\\_Supplement\\_Entire\\_Report.pdf](http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/wetlands/pdf/Wetlands_Supplement_Entire_Report.pdf)

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Secretaria de Assuntos Estratégicos da Presidência da República. *Diagnóstico da Situação Atual dos Resíduos Sólidos no Brasil: gestão dos resíduos sólidos urbanos*. 2012. Disponível em:  
[http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009\\_relatorio\\_residuos\\_solidos\\_urbanos.pdf](http://www.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/relatoriopesquisa/121009_relatorio_residuos_solidos_urbanos.pdf). Acesso em: 9 out. 2020.

IPPLAP – Instituto de Pesquisas e Planejamento de Piracicaba. Resíduos Sólidos Domésticos toneladas ano; a Resíduos Sólidos Urbanos; b. Saneamento Básico. 2013,2014,2015. Disponível em: <http://ipplap.com.br/site/> Acesso em: 29/10/2020.

MAZZONETTO, A. W; VISSOTTO, J. P; NEVES, R. C; SÁNCHEZ, E. M. S; SÁNCHEZ, C. C. Caracterização de resíduos de poda, capina e serragem urbana para geração de energia. CONEM, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica 2012. São Luís 2012. Acesso em: 26 out. 2020.

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. *Bioenergia em revista: diálogos*, ano 6, n. 1, p. 47-75, jan./jun. 2016. Acesso em: 20 out. 2020.

MAZZONETTO, A. W & DARIO, M. P. Avaliação do potencial energético do resíduo sólido domiciliar do município de São Paulo Revista eletrônica InSIET: *Revista In Sustentabilidade, Inovação & Empreendedorismo Tecnológico*, São Paulo. V. 4, n. 1, p. 29-63, julho/dezembro de 2016. Disponível em: <file:///C:/Users/AWM201~1/AppData/Local/Temp/11-18-PB.pdf>. Acesso em 18 Out 2020.

M. M. A. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (Org.). Resíduos Sólidos Urbanos: Resíduos sólidos. 2015. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/mma-em-numeros/residuos-solidos>. Acesso em: 19 set. 2020.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. 2012. Disponível em [http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS\\_Revisao\\_Decreto\\_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657](http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657). Acesso em: 01 out. 2020.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. 2012. Disponível em [http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS\\_Revisao\\_Decreto\\_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657](http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657). Acesso em: 01 out. 2020.

MOTA, J. C. de; ALMEIDA, M. M. de; ALENCAR, V. C., & CURI, W. F. (2009). Características e impactos ambientais causados pelos resíduos sólidos: uma visão conceitual. *Águas Subterrâneas*, 1. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/21942>. Acesso em: 01 out. 2020.

MOTA, JOSÉ CARLOS et al. *Características e Impactos Ambientais Causados pelos Resíduos Sólidos: Uma Visão Conceitual*. 2009. Disponível em <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/viewFile/21942/14313>. Acesso em: 14 set 2020.

NUCASE. Resíduos sólidos: plano de gestão de resíduos sólidos urbanos: guia do profissional e treinamento: nível 2 / Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). –Belo Horizonte: ReCESA, 2007, 96 p.

SÁNCHEZ, C. G. (org.). *Tecnologia da gaseificação de biomassa*. Campinas: Átomo, 2010, 410p.

SEDEMA – Secretaria de Defesa do Meio Ambiente, segregação na fonte 2012. Destinação de Resíduos 2014 - Potencial energético aterro Palmeira 2015, parceria público privado 2016d; coleta de resíduos domésticos. Disponível em <http://www.sedema.piracicaba.sp.gov.br/>. Acesso em: 01 out. 2020.

SOUZA, N. R. D. de; ALENCAR, L. S.; MAZZONETTO, A. W. Potencial energético do resíduo das podas de árvores no município de Piracicaba – SP. *Revista Energia na Agricultura*. Vol. 31, n. 3, p. 237 – 245, julho – setembro de 2016.

USEPA Environmental Protection Agency – *Solid Waste Management and Green House Gases – A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks*. US.EPA. 2002. Disponível em <https://www.epa.gov/> consultado em 29/10/2020.

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.

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

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 leite 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 SANTOS, Maria Vilma dos é Tecnóloga em Biocombustíveis pela FATEC Piracicaba Dep. “Roque Trevisan”.