



POTENCIAL DE APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS GERADOS NO MUNICÍPIO DE FOZ DO IGUAÇU MEDIANTE O TRATAMENTO DE RESÍDUOS “WASTE-TO-ENERGY”

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.6.23.XII-003>

Cristhian Rolando Aguero Dominguez, Márcia Regina Bécker

*Universidade Federal de Integração Latino-americana. E-mail: cristhian.dominguez@aluno.unila.edu.br

RESUMO

O tema escolhido refere-se à análise de um estudo de caso sobre o potencial de aproveitamento energético dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados no município de Foz do Iguaçu, a partir da tecnologia de incineração ou *Waste-to-energy* (WTE). São várias as rotas tecnológicas que podem ser adotadas, dentre as quais, este método apresenta vantagens para o seu uso, sendo amplamente adotado em países da Europa. A análise realizada apresenta a caracterização dos RSU, levando em conta a fração de geração e o Poder Calorífico Inferior de cada material, obtendo o valor médio da composição equivalente do RSU. Com base no Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB, 2018) do município de Foz do Iguaçu, e outros dados de empresas responsáveis pela coleta e destinação, foi realizada uma quantificação mensal média dos RSU gerados, no período de 2014 a 2022, respectivamente. Posteriormente, é apresentado o dimensionamento detalhado do sistema WTE, propondo a instalação de uma usina de incineração, com período de funcionamento definido em 8000 horas anuais, e uma média de 87.205,44 toneladas de RSU processados anualmente, resultando na geração de 7,9 MW, considerando as perdas elétricas associadas ao processo. Esta energia, disponibilizada no período mensal, equivale a 5.688.000 kWh/mês, com a capacidade de suprir a demanda elétrica de aproximadamente 34.121 residências no município de Foz do Iguaçu.

PALAVRAS-CHAVE: Potencial energético, resíduos sólidos, tratamento, incineração.

ABSTRACT

The theme chosen refers to the analysis of a case study on the potential for energy use of Urban Solid Waste (MSW) generated in the municipality of Foz do Iguaçu, based on incineration technology or *Waste-to-energy* (WTE). There are several technological routes that can be adopted, among which, this method has advantages for its use, being widely adopted in European countries. The analysis carried out presents the characterization of the MSW, taking into account the generation fraction and the Lower Calorific Power of each material, obtaining the average value of the equivalent composition of the MSW. Based on the Municipal Basic Sanitation Plan (PMSB, 2018) of the municipality of Foz do Iguaçu, and other data from companies responsible for collection and disposal, an average monthly quantification of MSW generated was carried out, from 2014 to 2022, respectively. Subsequently, the detailed sizing of the WTE system is presented, proposing the installation of an incineration plant, with an operating period defined as 8000 hours per year, and an average of 87.205,44 tons of MSW processed annually, resulting in the generation of 7,9 MW, considering the electrical losses associated with the process. This energy, made available on a monthly basis, is equivalent to 5.688.000 kWh/month, with the capacity to supply the electricity demand of approximately 34.121 homes in the municipality of Foz do Iguaçu.

KEY WORDS: Energy potential, solid waste, treatment, incineration.

INTRODUÇÃO

Em 2022, o mundo viveu a retomada das atividades pós-pandemia da COVID-19, com diferentes dinâmicas em comparação ao ano de 2021. Entre 2010 e 2019, a geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil registrou considerável incremento, passando de 67 milhões para 79 milhões de tonelada por ano. Por sua vez, a geração per capita aumentou de 348 kg/ano para 379 kg/ano (ABRELPE, 2023).

A produção de RSU aumenta constantemente, este fato ocorre principalmente pelo acelerado processo de urbanização, ligado diretamente ao consumo de produtos (MILANEZ e MASSUKADO, 2012). A grande quantidade de resíduos no ambiente aumentou a poluição do solo, das águas, e constitui um forte agravante para as condições de saúde das



populações em todo o mundo, especialmente nas regiões menos desenvolvidas. Em forma paralela, o crescente processo de urbanização resulta numa maior demanda na produção de energia elétrica para o seu consumo, visando atender à qualidade de vida da população.

No processo de análise de alternativas viáveis frente ao cenário apresentado, considerando os fatores associados como o crescimento populacional, mudanças climáticas e esgotamento de recursos naturais, surge a oportunidade de considerar os resíduos sólidos como uma alternativa de recurso energético, e não apenas como um material a ser descartado. Além disso, é sabido que a energia elétrica é produzida em grande escala a partir de combustíveis fósseis, as quais primeiramente encontram-se em fase de esgotamento em várias partes do mundo, e representam também a fonte de poluição atmosférica devido aos processos associados para o seu aproveitamento energético.

Considerando estes aspectos, torna-se válido propor um sistema alternativo de geração de energia, que permita contribuir no processo de diversificação energética, incorporando as tecnologias amplamente desenvolvidas e consolidadas para o processamento de RSU.

São várias as alternativas e rotas tecnológicas que podem ser adotadas, as quais dependem principalmente do contexto local, quantidade ou volume de resíduos gerados, poder calorífico associado, assim como a logística de operação adotada para destinação final de RSU.

Uma das opções mencionadas, corresponde à tecnologia “*Waste-to-energy*” (WTE), que refere-se ao tratamento térmico, por meio da incineração dos resíduos sólidos, realizando o aproveitamento do poder calorífico dos materiais mediante o processo de queima ou degradação térmica, resultando em geração de energia elétrica e térmica, além de reduzir peso, volume e características de periculosidade com a eliminação da matéria orgânica e patogenicidade.

Para realizar a análise da viabilidade desta proposta, foi realizado o estudo com base na literatura e materiais disponibilizados pelo setor público e privado, do panorama em relação ao volume de geração e a caracterização da composição gravimétrica dos RSU gerados no município de Foz do Iguaçu, no período de 2014-2022, considerando a disponibilidade de dados confiáveis e ininterruptos neste período. Posteriormente, os resultados obtidos, foram comparados com estudos prévios realizados, como o Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná (PERS-PR) de maneira a validar os valores achados.

Na sequência, é apresentada a composição gravimétrica média no Brasil, os quais foram adotados para o município de Foz do Iguaçu, na ausência destes dados na literatura. Com base no volume gerado de RSU e o valor médio de Poder Calorífico Inferior, foi possível dimensionar todo o sistema de geração de energia elétrica do sistema WTE para o município, obtendo a potência estimada de geração de energia, e a quantidade de residências (casas) que poderiam ser abastecidas na sua demanda média de energia.

OBJETIVO

Avaliar o potencial de aproveitamento energético associado ao volume de resíduos sólidos urbanos gerados no município de Foz do Iguaçu, utilizando o método de tratamento de resíduos “*Waste-to-energy*”.

METODOLOGIA

Inicialmente, foi realizada a compilação de dados, referente à quantidade de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados no município de Foz do Iguaçu, a partir das informações obtidas junto aos órgãos e instituições públicas e empresas particulares, responsáveis pela sua coleta e destinação final.

Uma vez definido esse quantitativo gerado, foi possível propor o método de tratamento dos resíduos mediante o uso da tecnologia *Waste-to-energy*, que consiste na valorização energética dos resíduos por meio da incineração controlada de materiais sólidos urbanos.

Para definir o potencial de geração de energia, foi realizado o cálculo do poder calorífico inferior, em função da composição das frações do material, conforme a eq. (1):

$$PCI = PCI_{\text{plástico}} \times \% \text{plástico} + PCI_{\text{papel/papelão}} \times \% \text{papel/papelão} + PCI_{\text{mat.orgânica}} \times \% \text{mat.orgânica} + PCI_{\text{têxteis}} \times \% \text{têxteis} + PCI_{\text{rejeitos}} \times \% \text{rejeitos}$$

equação (1)



Onde

PCI = Poder calorífico inferior [kcal/kg];

% = Percentual de cada material que compõem a amostra;

Os valores dos percentuais de cada material foram obtidos a partir da composição gravimétrica média dos RSU no Brasil, conforme Fig. 1.

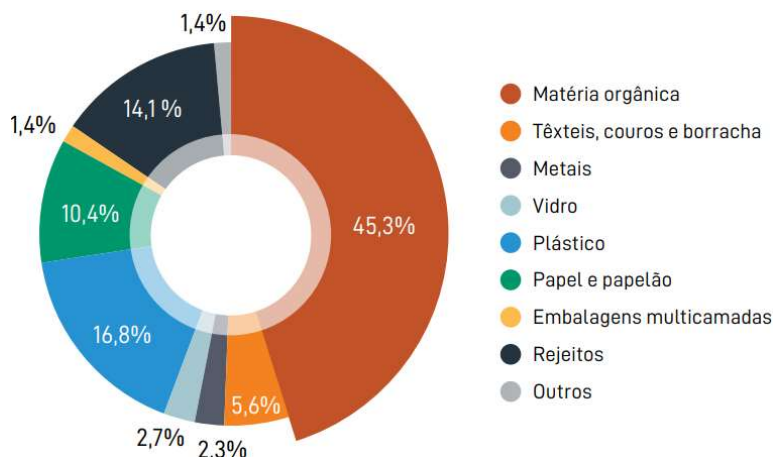


Figura 1: Gravimetria dos RSU no Brasil. Fonte: ABRELPE, 2020.

Os valores de PCI dos componentes dos RSU foram definidos conforme dados da literatura, conforme Tabela 1.

**Tabela 1. Quantificação do poder calorífico inferior dos materiais no RSU (média nacional).
Fonte: Guatta, 2021.**

| Composição Gravimétrica | Fração (%) | PCI (kcal/kg) | PCI proporcional (kcal/kg) |
|-------------------------|------------|---------------|----------------------------|
| Papel/papelão | 10,4 | 2.686 | 279 |
| Plástico | 16,8 | 7.050 | 1184 |
| Têxteis | 5,6 | 3.550 | 199 |
| Rejeitos | 14,1 | 1.111 | 157 |
| Orgânico | 45,3 | 795 | 360 |
| Total | | | 2179 |

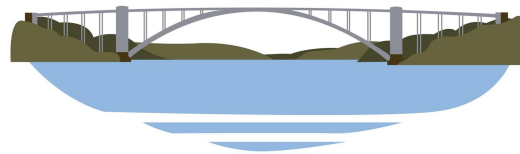
Para o cálculo da capacidade de processamento e incineração (Q_t) de RSU, foi considerada a quantidade total de RSU disponíveis no município em toneladas/ano (Q), o tempo de funcionamento da planta (usina), sendo esta igual a 8.000 horas anuais (F):

$$Q_t \text{ (t.h}^{-1}\text{)} = Q \text{ (t.ano}^{-1}\text{)} / F \text{ (h.ano}^{-1}\text{)} \quad \text{equação (2)}$$

A potência térmica alcançada em megawatt térmico (MWt) foi calculada a partir do valor da capacidade de processamento (Q_t) e do PCI apresentado na Tabela 1, sendo:

$$P_t \text{ (MWt)} = Q_t \text{ (t.h}^{-1}\text{)} \times \text{PCI (kJ.kg}^{-1}\text{)} \quad \text{equação (3)}$$

Conforme Moratorio et. al (2012), as proporções de cogeração de energia produzidas no sistema waste-to-energy, correspondem a 50% de energia térmica, 30% na forma de energia elétrica e os 20% restantes representam as perdas ao ambiente externo. Assim, a potência elétrica do gerador será obtida a partir de:



$$Pe \text{ (MWe)} = Pt \text{ (MWt)} \times 30\%$$

equação (4)

Realizando a consideração de que a usina funciona durante um total de 720 horas no mês, sendo um período de 24 horas diários e o total de 30 dias mensalmente, a potência elétrica (Pe) mensal e disponibilizada na rede é dada por:

$$Pe \text{ mensal (kWe/mês)} = Pe \text{ (kWe)} \times \text{tempo de funcionamento da usina (h)}$$

equação (5)

RESULTADOS OBTIDOS

O manejo dos RSU e sua disposição no meio ambiente deve ser foco de atenção das administrações públicas, para definir políticas sociais e ambientais. Buscando compreender esta problemática no município de Foz do Iguaçu, no Estado do Paraná, foi realizada a quantificação mensal média dos RSU produzidos, entre os anos de 2014 e 2022, apresentada na Fig. 2. São observadas características importantes, como o aumento gradual ao longo do tempo, com algumas flutuações nos anos 2016 e 2021. Em relação ao ano 2021, esta variação pode ser atribuída à crise da pandemia mundial COVID-19, que afetou a produção das indústrias e o setor comercial e, conseqüentemente, a produção de resíduos.

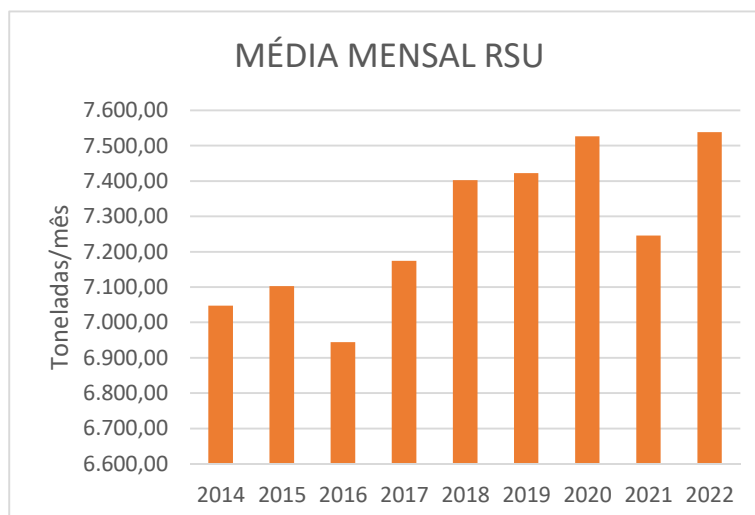
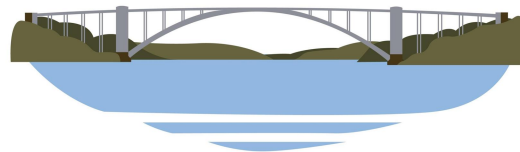


Figura 2: Geração média mensal de RSU em Foz do Iguaçu, 2014-2022. Fonte: Elaborado pelo autor com base no Plano Municipal de Saneamento Básico (PMSB), 2023.

Entre os anos 2014 e 2022, foi gerada uma média anual de 87.205,44 toneladas de RSU, resultando em 7.246,12 toneladas mensais, equivalentes a cerca de 269 toneladas diárias no município. De acordo com dados levantados pelo Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná (PERS/PR, 2017), a faixa de população no município apresenta *índice per capita* de 1,01 kg/hab.dia. Considerando o número de habitantes de Foz do Iguaçu, com 256.088 pessoas, de acordo com o Censo do IBGE de 2010, o valor obtido para a média diária de resíduos gerados encontra-se próxima daquele valor estimado pelo plano.

Para o aproveitamento energético proposto, utilizando a tecnologia *waste-to-energy*, é considerada a implementação de um sistema de cogeração de energia, a partir do processo de incineração dos RSU com secagem prévia. O calor gerado na incineração aquece a água em um aquecedor (boiler), produzindo vapor. Esse vapor gerado é utilizado para a obtenção de energia elétrica, mediante o uso de um sistema turbina-gerador. A energia elétrica produzida pode, então, ser acoplada à rede de transmissão e distribuição local. Entretanto, é importante destacar que, o objetivo principal da tecnologia de incineração WTE, quando utilizada para tratamento de RSU, é a diminuição do peso e do volume dos resíduos (BEYENE; WERKNEH; AMBAYE, 2018). Deve ser considerado também, que as emissões de metano geradas pela decomposição anaeróbica dos RSU nos lixões, aterros controlados ou aterros sanitários podem ser mais prejudiciais do que aquelas geradas pelos WTEs, favorecendo à redução do aquecimento global (BAIRD, C). Nesse contexto, a recuperação energética pela incineração se apresenta como uma vantagem associada a estas outras, de acordo com Sebastião, Kumar e Alappat (2019), oferecendo efeito sinérgico positivo na utilização desta tecnologia.



Outros aspectos ambientais, econômicos e sociais causados pela WTE precisam ser consideradas para que a mesma seja utilizada com sucesso.

Este estudo indica que pode ser alcançado um valor de PCI de 2179 kcal/kg (9117 kJ/kg) com os resíduos produzidos no município, a partir dos dados referentes à composição gravimétrica média no Brasil e com a eq. (1). Dos resíduos considerados para a queima estão incluídos apenas os de papel, papelão, plásticos, têxteis, rejeitos diversos e materiais orgânicos totalizando 92,2 %, conforme apresentado na Tabela 1. Outros materiais não são apropriados para a queima. Quanto a viabilidade dessa tecnologia, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), estabelece que ela se torna tecnicamente viável quando a queima de resíduo bruto (*mass burning*) atinge valores de PCI > 2.000 kcal/kg. É importante destacar que o PCI varia significativamente com a umidade. Neste sentido, torna-se indispensável acompanhar durante toda a época do ano, com precisão, o percentual de umidade nos resíduos utilizados.

A partir das equações (2) e (3) foi feita a estimativa da capacidade de processamento e incineração (Q_t), em toneladas por hora de operação, da usina e o valor da potência térmica (P_t) gerada.

$$Q_t \text{ (t.h}^{-1}\text{)} = 87.205,44 \text{ t.ano}^{-1} / 8000 \text{ h.ano}^{-1} = 10,90 \text{ t.h}^{-1}$$

$$P_t \text{ (MWt)} = 10,90 \text{ (t.h}^{-1}\text{)} \times 9117 \text{ (kJ/kg)} \times (1 \text{ h}/3.600 \text{ s}) \times (1000 \text{ kg/t}) = 27,6 \text{ MWt}$$

Para a potência elétrica (P_e) do gerador, foi utilizada a eq. (4).

$$P_e \text{ (MWe)} = 27,6 \text{ MWt} \times 30 \% = 8,3 \text{ MWt}$$

Foi estimada a obtenção potência elétrica de 8,3 MW e, para o funcionamento da própria usina, é necessário considerar um consumo médio entre 4 % e 5 % da energia produzida. Assim, o P_e que pode ser disponibilizado na rede corresponde ao valor de 7,9 MW.

Também foi calculada a potência elétrica (P_e mensal) que pode ser disponibilizada, conforme eq. (5).

$$P_e \text{ mensal (kWe/mês)} = 7.900 \text{ (kWe)} \times 720 \text{ (h/mês)} = 5.688.000 \text{ kWh/mês.}$$

Conforme dados do Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2021 da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a demanda média de energia de cada residência no município corresponde a 166,7 kWh/mês. Desta maneira, estima-se que a usina teria capacidade de suprir a energia elétrica de, aproximadamente, 34.121 residências do município.

CONCLUSÕES

A etapa de destinação final dos RSU ainda representa um grande desafio para as gestões municipais, considerando a tendência no aumento gradual do volume de geração per capita. A tecnologia de incineração WTE apresenta vantagens quanto a redução de massa e volume do resíduo descartado, a possibilidade de recuperação de energia, eliminação vetores de doenças, como vírus e bactérias e contribuindo na diversificação dos processos de destinação final de RSU.

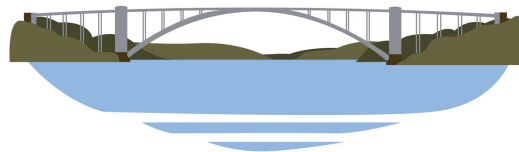
Os resultados obtidos mostram que é possível gerar uma potência elétrica mensal em torno dos 5.688.000 kWh/mês, a partir da incineração dos RSU de Foz do Iguaçu.

A recuperação energética por WTE é capaz de suprir a demanda de energia elétrica de aproximadamente 34.121 residências no município.

A tecnologia traz alguns aspectos que precisam de atenção e análise, como aqueles referentes aos custos de investimentos iniciais, a exigência de mão de obra especializada e a necessidade de tratamento dos resíduos gerados na combustão (emissão atmosférica de poluentes).

AGRADECIMENTOS

À Secretaria Municipal do Meio Ambiental da Prefeitura de Foz do Iguaçu e à empresa VITAL Engenharia Ambiental, pelos dados disponibilizados.



Ao Programa de Bolsa Institucional (PROBIU) da Universidade Federal de Integração Latino-americana pelo apoio financeiro no mestrado acadêmico do Programa Interdisciplinar em Energia e Sustentabilidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE-ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, São Paulo, 2021.
2. BAIRD, C.; CANN, M. Química Ambiental.4. ed. São Paulo: Artmed, 2011.
3. BEYENE, H. D.; WERKNEH, A. A.; AMBAYE, T. G. Current updates on waste to energy (WtE) technologies: a review. *Renewable Energy Focus*, v. 24, p. 1-11, 2018.
4. BRASIL, **Lei Federal nº 12.305/2010 de 02 de agosto de 2010**. Esta Lei institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Brasília, 2010.
5. EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Anuário Estatístico de Energia Elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>. Acesso em: 10 de janeiro de 2023.
6. GUATTA, A. **Estimativa do Potencial de Geração de Energia Elétrica dos resíduos encaminhados ao aterro sanitário do município de Maringá-PR, por meio da Tecnologia Waste-to-energy**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2021.
7. MILENEZ, B.; MASSUKADO, L.M. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos**. IPEA – Instituto de Pesquisa de Economia Aplicada. Brasília, 2012.
8. PARANÁ. Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos – SEMA. **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Paraná** Paraná, Curitiba, 2017.
9. PREFEITURA MUNICIPAL DE FOZ DO IGUAÇU – PR, Secretaria de Meio Ambiente. **Programa de Gestão Integrada de Resíduos Recicláveis**. Foz do Iguaçu, 2017.
10. PREFEITURA DE FOZ DO IGUAÇU – PR, **Plano Municipal de Saneamento Básico, 2012**. Disponível em: <http://www.cmfi.pr.gov.br/pdf/projetos/1664c.pdf> Acesso em: 10 de janeiro de 2023.
11. KOPP, Jorge Alberto; GÖDECKE, Marcos Vinicius. **Aproveitamento Energético Dos Resíduos Sólidos Urbanos pela Incineração no Brasil**. 2016. Disponível em: <https://goo.gl/kEsJWK>. Acesso em: 06 de janeiro de 2023
12. SEBASTIAN, R. M.; KUMAR, D.; ALAPPAT, B. J. A technique to quantify incinerability of municipal solid waste. *Resources, Conservation & Recycling*.v. 140, p. 286-296, 2019.
13. SILVA, Elissandro Rocha.; JUNIOR, Sebastião N. V.; TONELLI, Juliana T. C. L.; MARTINS, Gilberto. **Estimativa do Potencial de Conversão Energética de Resíduos Sólidos Urbanos através do Processo de Incineração**. 2014. Disponível em: <https://goo.gl/5Xe9Bl>. Acesso em: 11 de janeiro de 2023.
14. THEMELIS, N. J. e KAUFMAN S. M. Waste in a Land of Plenty –Solid Waste Generation and Management in the US. *Waste Management World*, 23-28, Sep-Oct 2004a.