

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

RESÍDUOS URBANOS NO BRASIL: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO USANDO UMA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

AUTORES:

Ana Paula do Nascimento Cardoso
Victória Borges da Costa
Alisom da Silva Farias
Fernando Antonio Fernandes
Vando José Costa Gomes
Camilo Andrés Guerrero-Martin

INSTITUIÇÃO:

Universidade Federal do Pará

RESÍDUOS URBANOS NO BRASIL: AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ENERGÉTICO USANDO UMA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Resumo

No contexto energético global atual, os países estão intensificando seus esforços para desenvolver fontes de energia limpa. O Brasil, alinhado a essa tendência mundial, tem experimentado um crescimento econômico e demográfico constante nas últimas décadas, destacando-se como um dos principais investidores em energias renováveis nos últimos anos. Segundo um relatório da Organização das Nações Unidas (ONU) de 2012 intitulado "Sustainable Energy for All", é importante transformar os sistemas de energia em nível global para atender às aspirações de um futuro sustentável. Este artigo tem como objetivo principal analisar as oportunidades de aproveitamento energético provenientes de resíduos sólidos urbanos para a produção de eletricidade e como essa alternativa pode influenciar a distribuição de energia elétrica no país.

A metodologia adotada neste estudo inclui simulações utilizando o Software SAM (System Advisor Model), uma ferramenta amplamente utilizada para analisar o desempenho e a viabilidade de projetos de energia renovável. As simulações foram conduzidas para avaliar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos em diversas regiões do Brasil. O processo envolve a coleta e análise de dados sobre a quantidade e composição dos resíduos sólidos urbanos, bem como a eficiência de conversão energética das tecnologias disponíveis para a geração de eletricidade a partir desses resíduos. Além disso, são considerados aspectos econômicos, técnicos e ambientais para fornecer uma visão abrangente sobre a viabilidade dessa fonte de energia.

Os resultados das simulações indicam que os resíduos sólidos urbanos possuem um significativo potencial energético que pode ser explorado para a geração de eletricidade no Brasil. A utilização desses resíduos como fonte de energia não apenas contribui para a diversificação da matriz energética nacional, mas também oferece uma solução sustentável para a gestão de resíduos urbanos. As observações sugerem que a implementação de plantas de conversão de resíduos em energia pode reduzir a dependência de combustíveis fósseis, diminuir a quantidade de resíduos encaminhados para aterros sanitários e mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Conclui-se que a geração de eletricidade a partir de resíduos sólidos urbanos é uma alternativa viável e benéfica para o cenário energético brasileiro.

Este estudo apresenta informações novas e adiciona valor ao corpo existente de literatura ao demonstrar a viabilidade do uso de resíduos sólidos urbanos como fonte de bioenergia no Brasil. A pesquisa destaca a importância da gestão eficiente de resíduos e sua conversão em energia renovável, promovendo benefícios econômicos, ambientais e sociais. As descobertas podem servir de modelo para outras regiões e países, incentivando a adoção de práticas sustentáveis e inovadoras na geração de energia. A implementação dessa abordagem pode contribuir significativamente para a diversificação da matriz energética e a redução da pegada de carbono, além de fomentar o desenvolvimento de tecnologias limpas e a melhoria da qualidade de vida nas áreas urbanas.

Palavras-chaves: Energia renovável, Resíduos sólidos urbanos, Sustentabilidade, Bioenergia, Gestão de resíduos.

Introdução

O aumento populacional mundial e a mudança nos hábitos das novas gerações têm contribuído diretamente para os processos de urbanização e desenvolvimento industrial. Como consequência, observa-se um aumento na geração de resíduos sólidos, que se tornou um problema socioambiental significativo devido aos seus excessos e à dificuldade de tratamento (MAZZONETTO, 2016). O Brasil não se difere desse contexto global. Nesse sentido, o gerenciamento e a gestão do lixo urbano no país devem adotar uma visão que abranja tanto a sustentabilidade quanto a preservação do meio ambiente. Entre 2009 e 2021, o Brasil produziu aproximadamente 1 bilhão de toneladas de resíduos urbanos. A quantidade e composição desses resíduos variam entre as diferentes regiões do país, sendo as cidades e regiões mais populosas as que apresentam maior produção de lixo. Os materiais não coletados adequadamente geram impactos consideráveis no meio urbano, como alagamentos causados pelo entupimento de bueiros devido ao descarte inadequado de resíduos (NUNES, 2024).

Atualmente, a destinação final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil se dá, em muitos municípios, através de aterros controlados e lixões, os quais tendem a ser desativados após certo período. De acordo com a Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), em 2022 foram gerados cerca de 77,1 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos no país, dos quais aproximadamente 93% foram devidamente coletados. Os 7% restantes, não coletados de maneira adequada, foram destinados de forma inadequada, gerando riscos ao meio ambiente e à saúde pública. Além disso, apenas 14,7% da população brasileira é atendida pela coleta seletiva porta a porta, um processo que, além de alcançar uma pequena parcela da população, requer muitos investimentos. Os serviços de limpeza urbana incluem varrição de vias, limpeza de áreas públicas, coleta, transporte, tratamento e disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU). Em 2022, as despesas dos municípios brasileiros com limpeza urbana giraram em torno de R\$ 29,2 bilhões, com a região Sudeste sendo responsável por 55% desse total.

Diante desse cenário, torna-se essencial reforçar processos que busquem finalidades para os RSU que sejam colaborativas para o meio ambiente e para a saúde pública, bem como de baixo custo e produtivas para alavancar os processos ambientais e energéticos do país. Essas ações podem contribuir para a diversificação da matriz energética nacional e oferecer uma solução sustentável para a gestão de resíduos sólidos urbanos. Neste contexto, o presente estudo visa avaliar o potencial energético dos resíduos urbanos no Brasil utilizando uma simulação computacional para explorar soluções inovadoras e sustentáveis para a gestão de resíduos.

Metodologia

Este estudo utilizou o Software SAM (System Advisor Model) para avaliar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em diferentes regiões do Brasil. A metodologia incluiu:

Configuração do Estudo: O estudo foi iniciado com a configuração no Software SAM para avaliar o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) como fonte de biomassa renovável na região Sudeste do Brasil, na cidade do Rio de Janeiro. Foram especificados o tipo de energia renovável a ser

analisada, parâmetros críticos como localização geográfica, dados meteorológicos relevantes, tamanho do sistema e características técnicas dos componentes necessários para cada cenário regional estudado.

Modelagem dos Recursos Naturais: Utilizando dados precisos de recursos naturais disponíveis, o SAM realizou a modelagem do ambiente específico onde o sistema de geração de energia a partir de RSU seria implantado. Esta etapa é essencial para estimar com precisão a capacidade de geração de energia ao longo do período de análise, considerando fatores como disponibilidade de biomassa, variações sazonais e condições ambientais locais.

Simulação de Desempenho: O SAM executou simulações detalhadas para prever o desempenho do sistema de energia renovável ao longo do período de estudo. Isso inclui cálculos precisos da produção de energia elétrica, levando em conta variáveis como eficiência de conversão da biomassa, capacidade instalada, características técnicas dos equipamentos e fatores ambientais que influenciam a operação dos sistemas.

Análise Econômica: Foi realizada uma análise econômica abrangente utilizando o SAM para avaliar a viabilidade financeira dos projetos de geração de energia a partir de RSU. Foram estimados os custos de capital, operacionais e de manutenção ao longo da vida útil do sistema, além do cálculo dos fluxos de caixa projetado. Aspectos como tarifas de energia, incentivos fiscais, taxas de desconto e indicadores financeiros como Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR) e período de payback foram utilizados para orientar as decisões de investimento.

Otimização e Sensibilidade: O SAM permitiu a otimização dos projetos através da variação de parâmetros críticos como capacidade do sistema, configuração dos componentes e estratégias operacionais. Além disso, foram realizadas análises de sensibilidade para avaliar o impacto das variações nos resultados econômicos e técnicos dos projetos, garantindo a robustez das análises frente a incertezas e mudanças nas condições de mercado.

Esta abordagem permitiu uma avaliação detalhada e comparativa do potencial energético dos RSU no Brasil, contribuindo para soluções sustentáveis e eficientes na gestão de resíduos e na diversificação da matriz energética.

Resultados e Discussão

Com base nos dados e informações da Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente (ABREMA), a região Sudeste do Brasil foi selecionada como área de análise no software, com foco específico na cidade do Rio de Janeiro. A simulação abrange a produção de resíduos sólidos de 2012, apresentando os seguintes resultados referentes aos resíduos tradicionais utilizados para a produção de biomassa, conforme ilustrado no gráfico abaixo:

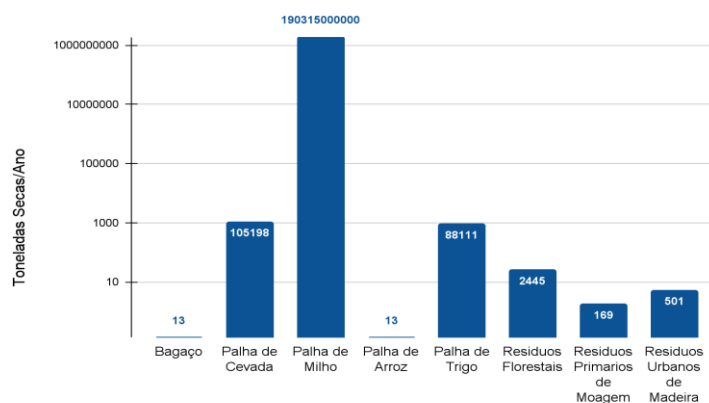


Figura 1 - Toneladas secas de resíduos sólidos produzidos no Rio de Janeiro em 2012, de acordo com o Software SAM.

De acordo com o software utilizado, o recurso total de biomassa disponível para manuseio é de 209.960 toneladas secas por ano. Com base nessa quantidade, a simulação foi realizada aplicando o sistema de combustão conhecido como *Grate Stoker Furnace*. Esse sistema é um tipo de fornalha que utiliza uma grelha móvel para queimar biomassa de forma eficiente e controlada. Na simulação, foram considerados parâmetros específicos para a combustão: a temperatura da combustão foi ajustada para 900°F e a pressão de operação foi definida em 900 psi(g). Esses parâmetros são essenciais para garantir a eficiência da combustão e maximizar a conversão de biomassa em energia térmica. O sistema foi configurado para operar com 20% de excesso de ar. Isso significa que 20% a mais de ar do que o teor estequiométrico necessário para a combustão completa é fornecido. Esse excesso de ar ajuda a garantir que todo o combustível seja completamente queimado, reduzindo a formação de poluentes e aumentando a eficiência do processo. Foram consideradas duas caldeiras no sistema. As temperaturas dos gases de combustão foram estimadas em 390°F. Essas temperaturas são importantes para determinar a eficiência de transferência de calor nas caldeiras. O vapor produzido no sistema foi estimado em 189.462,4 libras por hora (lb/h). Essa quantidade representa a capacidade do sistema de gerar vapor a partir da queima de biomassa. O vapor é um dos produtos principais do processo de combustão e pode ser utilizado para gerar eletricidade ou para outros processos industriais. Além disso, o projeto considera um superdimensionamento da caldeira de 10% (que provavelmente refere-se a uma margem de segurança ou fator de segurança no design das caldeiras). Cada caldeira tem uma capacidade projetada de 104.204,32 lb/h de vapor, o que indica a quantidade máxima de vapor que pode ser produzida por cada unidade. Além disso, os resultados das simulações indicaram as perdas estimadas de eficiência da caldeira, medida pelo Poder Calorífico Superior (Higher Heating Value, HHV). As perdas foram distribuídas da seguinte forma: Perdas de gases de combustão seca: 8,16%; Umidade no combustível: 6,39%; Calor latente: 3,75%; Combustível não queimado: 3,50%; Perdas por radiação e outras diversas: 2,03%; Com essas perdas, a eficiência total da caldeira, calculada com base no HHV, foi de 76,17%.

Para calcular o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o período de payback do projeto, foram utilizados os dados fornecidos pelo software para estimar os fluxos de caixa. Os parâmetros considerados são os seguintes: Capacidade do Sistema: 31.044,391 kW; Custo de Capital: R\$ 3.994.000; Custo Operacional Fixo (Anual): R\$ 107.000; Custo Operacional Variável: R\$

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

0,0500/kWh; Preço de Venda da Energia: R\$ 0,098/kWh; Período de Análise: 2012 a 2023 (20 anos); Taxa de Inflação: 2,5% ao ano; Taxa de Retorno Nominal: 13% ao ano; Dívida do Projeto: 60% do custo de capital; Taxa de Juros Nominal da Dívida: 8% ao ano; Taxa de Imposto Efetiva: 28% ao ano; Taxa de Juros Nominal: 3,5% ao ano; Fator de Recuperação de Capital (CRF): 0,087; Custo de Capital (CC): R\$ 123.991.297,84. Com base nesses dados, foram calculados os seguintes parâmetros financeiros:

Receita Anual, calculada pela venda energética dada pela Equação 1:

$$\text{Receita Anual} = \text{Capacidade} \times \text{Horas/ano} \times \text{Preço de Venda} \quad (\text{Equação 1})$$

$$\text{Receita Anual} = 31.044,391 \text{ kW} \times 8.760 \text{ horas} \times 0,098 \$/\text{kWh} = \text{R\$}26.735.321,59$$

Custos Operacionais Anuais, calculados a partir da soma do custo operacional fixo e do custo operacional variável (Equação 2):

$$C.O. \text{ Anuais} = C.O. \text{ Fixo} + (\text{Capacidade} \times \text{Horas/ano} \times C.O. \text{ Variável}) \quad C.O. \text{ Anuais} = 107.000 \text{ R\$} + (31.044,391 \text{ kW} \times 8.760 \text{ horas} \times 0,0500 \$/\text{kWh}) = \text{R\$}13.704.550,26 \quad (\text{Equação 2})$$

Serviço da Dívida, que representa 60% do custo de capital, e o pagamento anual da dívida é calculado usando a fórmula da anuidade (Equação 3):

$$\text{Dívida} = \text{Custo de Capital} \times 0,60 \quad (\text{Equação 3})$$

$$\text{Dívida} = 123.991.297,84 \$ \times 0,60 = 74.394.778,70 \$$$

O pagamento anual da dívida é (Equação 4):

$$\text{Pagamento Anual da Dívida} = \text{Dívida} \times \frac{\text{Taxa de Juros}}{1 - (1 + \text{Taxa de Juros}) - \text{Período}} \quad (\text{Equação 4})$$

$$PAD = 74.394.778,70 \$ \times \frac{0,08}{1 - (1 + 0,08) - 20}$$

$$PAD = 7.577.272,54 \$$$

O imposto anual sobre o lucro operacional (Equação 5):

$$\text{Juros Anuais} = \text{Dívida} \times \text{Taxa de Juros} \quad (\text{Equação 5})$$

$$\text{Juros Anuais} = 74.394.778,70 \$ \times 0,08 = 5.951.581,40 \$$$

$$\text{Lucro Operacional} = \text{Receita Anual} - \text{Custos Operacionais Anuais} - \text{Juros Anuais}$$

$$\text{Lucro Operacional} = 26.650.988,79 \$ - 13.597.657,26 \$ - 5.951.581,40 \$ = 7.101.750,13 \$$$

$$\text{Imposto Anual} = \text{Lucro Operacional} \times \text{Taxa de Imposto}$$

$$\text{Imposto Anual} = 7.101.750,13\$ \times 0,28 = 1.988.519,74\$$$

O fluxo de caixa anual (Equação 6):

$$\text{Fluxo de Caixa Anual} = \text{Receita Anual} - \text{C. O. Anuais} - \text{Imposto Anual} - \text{P.A. da Dívida} \quad (\text{Equação 6})$$

$$FCA = 26.650.988,79\$ - 13.597.657,26\$ - 1.988.519,74\$ - 7.577.272,54\$ = 3.487.539,25\$$$

O Valor Presente Líquido (VPL) (Equação 7):

$$VPL = \sum_{t=1}^{20} \frac{\text{Fluxo de Caixa Anual}}{(1 + \text{Taxa de Desconto})^t} - \text{Custo de Capital} \quad (\text{Equação 7})$$

$$VPL = \sum_{t=1}^{20} \frac{3.487.539,25}{(1 + 0,13)^t} - 123.991.297,84$$

$$VPL = -102411599,1$$

Por fim, o período de *payback* (Equação 8):

$$\text{Período de Payback: } \frac{\text{Investimento Inicial}}{\text{Fluxo de Caixa Anual}} \quad (\text{Equação 8})$$

$$\text{Período de Payback: } \frac{3994000}{12961747,89} \approx 0,31 \text{ anos} \approx 3,7 \text{ meses}$$

A Figura 2 ilustra detalhadamente a geração de energia elétrica por meio da biomassa neste caso, um método sustentável e renovável que vem ganhando destaque nos últimos anos. Pode-se observar que, a capacidade total de geração é de 25300 kW, o qual viabiliza o projeto apresentado.

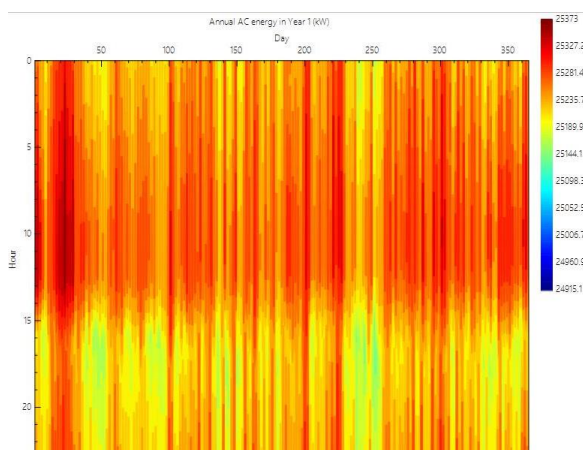


Figura 2. Gráfico de geração de energia

Conclusões

O estudo sobre o potencial energético dos resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil, realizado com o software SAM, explora a viabilidade técnica e econômica da conversão de resíduos em energia. Focado na região Sudeste, especialmente na cidade do Rio de Janeiro, o estudo revela o significativo potencial de geração de energia a partir da biomassa dos resíduos sólidos, oferecendo uma solução sustentável para a gestão de resíduos e a diversificação da matriz energética nacional. A simulação usou o sistema Grate Stoker Furnace para converter resíduos em energia térmica e elétrica. Com uma eficiência de caldeira de 76,17%, o sistema mostrou ser tecnicamente viável, embora com perdas consideráveis, como gases de combustão seca e umidade no combustível, impactando a eficiência geral.

Do ponto de vista econômico, o projeto apresenta uma receita anual potencial de R\$ 26.735.321,59. No entanto, o Valor Presente Líquido (VPL) negativo de R\$ 102.411.599,10 sugere que, na configuração atual, o projeto não é financeiramente viável ao longo de 20 anos. A Taxa Interna de Retorno (TIR) e o período de payback, estimado em cerca de 3,7 meses, são irrealisticamente curtos em relação ao investimento inicial e aos fluxos de caixa projetados, indicando a necessidade de ajustes financeiros. Para melhorar a viabilidade econômica, é crucial explorar medidas como a redução dos custos de capital, otimização da eficiência de combustão e a implementação de incentivos fiscais ou aumento do preço de venda da energia. Com ajustes adequados, o projeto pode se tornar uma alternativa sustentável e atraente.

Em resumo, o estudo demonstra o potencial dos RSU como fonte renovável de energia, oferecendo uma solução inovadora para a gestão de resíduos e a matriz energética do Brasil. No entanto, desafios econômicos precisam ser abordados para viabilizar o investimento em larga escala, proporcionando uma base sólida para futuras pesquisas e desenvolvimentos.

Agradecimentos

Gostaria de manifestar minha sincera gratidão à Universidade Federal do Pará e à PROEX pelo apoio fundamental que me proporcionaram para a participação no congresso. A oportunidade oferecida não apenas ampliou meus horizontes acadêmicos, mas também foi crucial para o avanço do meu desenvolvimento profissional. Agradeço de coração pelo compromisso e pelo incentivo constante, que foram essenciais para que eu pudesse aproveitar ao máximo essa oportunidade.

Referências Bibliográficas

MAZZONETTO, A.; et al. Avaliação do potencial energético do resíduo sólido urbano de Piracicaba para produção de biogás. *Bioenergia em Revista: Diálogos*, v. 6, n. 1, 2016.

NUNES, E. C.; et al. Análise da produção, gestão e gerenciamento do lixo urbano no Brasil e suas regiões (2009-2021). *Revista GeoInterações*, [S. l.], v. 8, n. 1, 2024.

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente - ABREMA. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2023. Relatório – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2024.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente - ABREMA. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil e o Censo Demográfico 2022. Relatório – Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2023.

VIEIRA, L. C. Potencial energético de resíduos sólidos urbanos na região do grande ABC paulista. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Ambientais) – Universidade Federal de São Paulo, Diadema, 2021.

BNamericas. Brazil opens path for waste-to-energy projects. ABREN, 14 jan. 2021. Disponível em: <https://abren.org.br/2021/01/14/brazil-opens-path-for-waste-to-energy-projects-bnamericas/>. Acesso em: 20 jul. 2024.

SILVEIRA, H. Inovação organizacional para transição de resíduos em combustível e energia renovável: dimensionamento de usina de pirólise. 2024. Dissertação (Mestrado em Biocombustível) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2024.