



## Potencial energético dos resíduos sólidos urbanos por diferentes tecnologias: estudo de caso em Maceió-AL

*Energetic potential of urban solid waste by different technologies: case study in Maceió-AL*

Mirella Maria Nóbrega Marques<sup>1</sup>, Kardelan Arteiro da Silva<sup>1</sup>, Thamirys Suelle da Silva<sup>1</sup>, Soraya Giovanetti El-Deir<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco. Recife, Pernambuco, Brasil

Contato: [mirellanmarques@outlook.com](mailto:mirellanmarques@outlook.com)

### Palavras-Chave

sustentabilidade  
matriz Energética  
tecnologias renováveis  
gestão ambiental

### Key-word

sustainability  
energy matrix  
renewable technologies  
environmental management

### RESUMO

Centros urbanos possuem atividades que geram resíduos, podendo causar impactos ambientais negativos. Estes são responsáveis por ocasionar diversos problemas ambientais quando não são descartados da forma correta. Como alternativa para este problema, existe a conversão dos resíduos sólidos em fonte energética, reduzindo o volume destes em local não adequado e aterros controlados e minimizando os gastos com energia. O objetivo deste estudo consiste em apresentar alternativas ao estado de Alagoas, que apresenta baixa eficiência da gestão final dos resíduos sólidos urbanos. A pesquisa se estruturou em descritiva exploratória, onde se realizou estudos bibliográficos visando buscar informações voltadas para o eixo temático. Em seguida, foram apresentados quatro processos termoquímicos de energia, analisando o potencial energético dos mesmos. Diante disso, observou-se que o processo de gaseificação convencional se mostrou o mais adequado em relação a custo-benefício; com um poder calorífico de 679.088 MWh no ano de 2016, sendo capaz de prover energia para todo o setor público do estado. A partir do presente estudo fica relevante que se deve destacar a importância da aplicação de políticas públicas que possam disseminar os processos de potencial energético voltados para o descarte irregular dos resíduos sólidos urbanos, visando tecnologias adequadas e acessíveis para melhores resultados voltados para a sustentabilidade.

### ABSTRACT

*Urban centers have activities that generate waste, which can cause negative environmental impacts. These are responsible for causing several environmental problems when they are not properly disposed of. As an alternative to this problem, there is the conversion of solid waste into an energy source, reducing its volume in an unsuitable location and controlled landfills and minimizing energy costs. The study aims to present alternatives to the state of Alagoas, which has low efficiency in the final management of urban solid waste. The research was structured in an exploratory description, where it was necessary to carry out bibliographic studies that sought information focused on the thematic axis. Then, four thermochemical energy processes were presented, analyzing their energy potentials. Therefore, it was observed that the conventional gasification process proved to be the most adequate in relation to cost-benefit; with an energy power of 679,088 MWh in 2016, being able to provide energy for the entire public sector of the state. It is important to highlight the importance of applying public policies that can disseminate the processes of energy potential aimed at the irregular disposal of solid urban waste, aiming at suitable and accessible technologies for better results focused on sustainability.*

### Informações do artigo

Recebido: 16 de junho, 2021  
Aceito: 11 de agosto, 2022  
Publicado: 30 de agosto, 2022

## Introdução

O aumento na geração de resíduos sólidos está diretamente vinculado à crescente urbanização e à mudança do estilo de vida dos indivíduos, em que os impactos ambientais ocasionados pela ausência de gestão destes são diversos para a saúde humana e para o meio ambiente (ANTHRAPER et al., 2018; MASSUGA et al., 2021).

Diante dessa problemática, são necessárias ações que desenvolvam o aumento na eficiência e na eficácia das etapas de coleta, de transporte, de tratamento, de destinação e de disposição final dos resíduos sólidos, bem como a adoção de novas tecnologias para a redução da geração e volume destes (BERTICELLI; PANDOLFO; KORF, 2017).

No que diz respeito às tecnologias aplicadas para o tratamento dos resíduos, estes necessitam ser financeiramente sustentáveis, socialmente adequadas, legalmente aceitáveis, tecnicamente viáveis e ambientalmente amigáveis (ADENIRAM; NUBI; ADELOPO, 2017; AGUIAR; SILVA; EL-DEIR, 2019).

Sendo assim, o potencial de geração de eletricidade através de rotas termoquímicas, como forma de redução do volume de resíduos sólidos e disseminação de fontes alternativas de energia, está amplamente discutida na comunidade científica contemporânea e mostra-se como uma alternativa tecnológica para substituir a matriz energética em algumas localidades (SANTOS et al., 2019; NEEHAUL et al., 2020).

No Brasil, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos – PNRS, incentiva as práticas e as técnicas de recuperação energética dos Resíduos Sólidos Urbanos – RSU (BRASIL, 2010). Sendo assim, diversos benefícios podem ser alcançados com os instrumentos e os objetivos da PNRS, pois busca a inclusão social, a não poluição e/ou contaminação do meio ambiente, a conscientização da população sobre o manuseio correto destes materiais (SILVA et al., 2018).

Devido à problemática dos resíduos sólidos em Maceió – AL na contaminação e na poluição do meio ambiente, este trabalho tem como objetivo quantificar a geração dos resíduos, por meio da análise histórica, bem como estimar o potencial energético desses materiais através de diferentes tecnologias, visando à sustentabilidade energética e a adesão aos preceitos dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável – ODS.

### Resíduos sólidos como fonte de energia alternativa

É de suma importância o conhecimento teórico sobre as tecnologias termoquímicas e bioquímicas na geração de energia elétrica, transformando um material descartado numa fonte alternativa, ocasionando a geração de eletricidade para diversos empreendimentos (DALMO et al., 2019; MOHAMMADI; HARJUNKOSKI, 2020). A viabilidade econômica,

social e ambiental são preceitos básicos para a implementação de tecnologias mais adequadas e amigavelmente sustentáveis (KORAI; MAHAR; UQAILI, 2017). Ainda segundo os autores, além dos benefícios de destinação mais adequada para os resíduos sólidos, a diversificação da matriz energética possibilita maior segurança na disponibilidade desse bem.

Diversas nações buscam aumentar os investimentos nessa temática, principalmente para a segurança energética, o tratamento e a destinação ambientalmente adequada desses resíduos, bem como para a redução das alterações negativas que estes podem ocasionar no meio ambiente (LINO; ISMAIL, 2018; LOKAHITA et al., 2019). Estudos demonstram os benefícios de tratar os RSU para a produção de energia, tendo em vista que esta etapa é posterior às práticas de redução, reutilização e reciclagem (3Rs) (MAIZE, 2016; LINO; ISMAEL, 2017).

Os pesquisadores brasileiros exploram as oportunidades da geração de energia a partir dos RSU, sendo o potencial elétrico dos aterros sanitário aproximadamente 16 GW (SANTOS et al., 2018; KUMAR; SAMADDER, 2020).

O tipo de tratamento utilizado na geração de energia, tendo como matéria prima os resíduos sólidos, deve ser analisado sob as esferas ambientais, econômicas e sociais, pois os impactos ambientais podem ser significativos, o que configura na degradação ambiental (SANTOS et al., 2019). A incineração, por exemplo, necessita de rigoroso monitoramento e controle operacional das emissões de gases tóxicos na atmosfera.

## Incineração

A incineração fundamenta-se na restauração do poder calorífico dos resíduos, através de um processo de tratamento térmico controlado e na sua transformação em energia.

Primeiramente, acontece a queima dos resíduos sólidos na câmara primária, que é a receptora direta do resíduo. Esta fase é realizada em temperatura elevada, para que as substâncias presentes se tornem gases e partículas menores. Entretanto, a temperatura é regulada, variando de 500°C a 900°C, para que não aconteça a formação de óxidos nitrosos e para que não ocorra a volatilização de grandes quantidades de metais como chumbo, cádmio, cromo, mercúrio e outros (DASTJERDIA et al., 2019).

A fase gasosa gerada na câmara primária é encaminhada para uma câmara secundária, onde a mistura de gases é queimada em uma temperatura mais alta (MOHAMMADI; HARJUNKOSKI, 2020).

Os gases finais, após a segunda combustão, são resfriados com aproveitamento do calor e em seguida são tratados. A parte sólida restante após todo o processo varia de 4% a 10% em volume do material original. Esta é esterilizada e tornada inerte (MEDEIROS; CASTRO, 2015).

De acordo com Klinghoffer e Castaldi (2013), conforme citado por Dalmo et al. (2019), as usinas de incineração podem gerar de 0,3 a 0,7 MWh de eletricidade por tonelada de resíduos, variando de acordo com o tamanho da planta e com o valor de aquecimento dos resíduos.

Segundo Gomes (2018), a incineração de RSU proporciona a geração de vapor, podendo ser aplicado em diferentes processos, como a produção de energia elétrica. Consequentemente, é uma alternativa para substituir parte da energia gerada a partir de fontes fósseis, contribuindo para a diminuição da emissão de gases de efeito estufa e do chorume pelos aterros sanitários.

Conforme Machado (2015), diversos países utilizam a incineração como uma fonte alternativa para a disposição final e o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos (RSU), entretanto, é pouco difundida no Brasil. Ainda de acordo com o autor citado, a capacidade média das usinas que utilizam este processo termoquímico é de 1500 t/dia de RSU; sendo a maior instalação encontrada na China, com capacidade de processar 3000t/dia.

Não se pode esquecer que é necessário que o processo de incineração esteja diretamente conectado a um sistema que apresente tecnologia avançada para que ocorra a limpeza dos gases antes destes serem expelidos na atmosfera. No Brasil, devido a muitas das instalações não apresentarem esta tecnologia, e assim contaminar o meio ambiente devido a emissões elevadas, muitas incineradoras foram desinstaladas no decorrer do tempo (FERREIRA, 2015).

## Pirólise

A pirólise é um processo físico-químico que consiste na degradação térmica de resíduos sólidos na ausência de oxigênio. Nesta tecnologia há a necessidade de um pré-tratamento de resíduos, deste modo, anteriormente deve-se separar vidro, metais e materiais inertes (MOYA et al., 2017). Segundo Chen et al. (2014), citado por Garcia e Mendonça (2018), esta técnica utiliza um reator que apresente controle de temperatura, a qual necessita manter a temperatura entre 300°C e 800°C. Consiste em um conjunto de complexas reações químicas acompanhadas de processos de transferência de calor e massa. A composição heterogênea das frações produzidas e as possíveis interações entre si tornam ainda mais complexo o processo (MAZZONETTO, 2016).

O método de pirólise inicia-se com a decomposição térmica do material, a 300° C, com oxigênio reduzido ou livre de oxigênio, no interior das câmaras aquecidas. Em seguida, a temperatura aumenta para 800°C em uma atmosfera não-reativa. Os produtos finais do processo são resíduos sólidos ricos em carbono (carvão), gases e vapores orgânicos condensáveis (KINUNNEM et al., 2014).

Segundo Fournier e Monteiro (2021), uma das vantagens da pirólise é que este método pode servir como uma alternativa de reciclagem até mesmo para

resíduos que apresentam algum tipo de contaminante. Além disto, outras vantagens da pirólise consiste em: o equipamento ser de fácil instalação; faz menos mal ao ambiente, se comparada com a incineração; todos os resíduos são usados para produzir diferentes bio-produtos; e os gases produzidos podem ser utilizados em aplicações de energia diferentes, tais como motores, caldeiras, células de combustível, turbinas e bombas de calor.

De acordo com Garcia e Mendonça (2018), das tecnologias mais utilizadas para a conversão dos resíduos sólidos urbanos (RSU), a pirólise é a mais incipiente, necessitando ainda de vários estudos, principalmente na avaliação das características do bio-óleo obtido.

No Brasil, as empresas Atteris e Delta Bravo utilizam do processo de pirólise para a destinação de resíduos e geração e comercialização de produtos de pirólise. Quando se fala a nível global, empresas como Metso e Global Green International desenvolvem trabalhos com pirólise de diversos resíduos (ROCHA, 2016).

## Gaseificação Convencional

Os resíduos sólidos urbanos são uma fonte de biomassa e por isso podem ser utilizados para a produção de energia renovável, sendo possíveis substitutos dos combustíveis fósseis. O processo que consiste na degradação térmica dos resíduos sólidos é a gaseificação, o qual foi desenvolvido ao longo das últimas três décadas (ARENA, 2012). Este ocorre a temperaturas entre 500°C e 1300°C e tem como produto o gás de síntese – syngas (ROCHA, 2016).

Segundo a Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, 2013), citada por (SILVA, 2017), o syngas é formado principalmente por monóxido de carbono, hidrogênio, e em quantidades menores de gás carbônico, hidrocarbonetos leves, metano, nitrogênio e vapor de água. O syngas tem sido identificado como uma potencial fonte de energia renovável, podendo ser usado também para a produção de insumos químicos e outros gases (SAMIRAN et al., 2015). Suas propriedades variam de acordo com a biomassa utilizada e das condições de funcionamento do reator (ROCHA, 2016).

A vantagem da gaseificação em relação à incineração ocorre pela possibilidade de tratar e limpar o gás produzido antes da sua combustão, removendo substâncias poluentes e desta forma apresentando uma menor emissão das mesmas (CHEN et al., 2015; SILVA, 2017).

Segundo Okamura (2014), este processo termoquímico pode ocorrer de duas formas, a direta e a indireta. Na gaseificação direta, todo o procedimento ocorre em um único reator, onde a oxidação exotérmica também ocorre. Neste tipo de gaseificador, geralmente, se utiliza ar ou oxigênio como agentes oxidantes; e todo calor necessário à metodologia é produzido no interior do reator. Quando feita com ar, é produzido um gás pobre, com um poder calorífico entre 950 a 1600

kcal/Nm<sup>3</sup>. Já quando se utiliza o oxigênio, resulta em um gás de melhor qualidade e de maior poder calorífico, entre 2400 e 4300 kcal/Nm<sup>3</sup> (FERREIRA, 2015).

A gaseificação indireta é quando o processo não ocorre com a ajuda de um agente oxidante, necessitando de uma fonte de energia externa. O agente de gaseificação mais utilizado neste caso é o vapor d'água, pois é facilmente produzido e aumenta a quantidade de hidrogênio no gás combustível produzido (SINGH et al., 2011; FERREIRA 2015).

## Gaseificação por plasma

Plasma é denominado como o quarto estado da matéria, apresentando boa condutividade elétrica e alta viscosidade (SOARES COSER, 2021). O cientista americano Irving Langmuir, em 1929, empregou o termo plasma na física para designar um gás parcialmente ionizado (FERREIRA, 2015). Ferreira (2015) ainda afirma que este material é constituído por uma mistura de elétrons e íons positivos e decompõe compostos com eficiência, produzindo emissões muito menos que os incineradores.

Neste processo de tratamento, os resíduos sólidos urbanos são introduzidos no sistema através de câmaras conhecidas como lock hopper, as quais apresentam ar aquecido para favorecer a combustão destes resíduos. Após a queima dos resíduos, os mesmos são convertidos em gás combustível e este gás é tratado pela chama de plasma, sendo decomposto em uma fornalha vertical denominada de Shaft (FEAM, 2010; FERREIRA 2015).

Como produto final ocorre à formação de gases derivados dos compostos orgânicos e a vitrificação da fração inorgânica. Estes gases são majoritariamente hidrogênio e monóxido de carbono, os quais movimentam as turbinas acopladas ao reator, produzindo energia (CASTRO, 2015).

A tecnologia de plasma apresenta algumas vantagens em relação aos demais métodos em estudo. Sua elevada temperatura chega a reduzir em 99% o volume dos resíduos sólidos e vetrifica os resíduos inorgânicos, transformando-os em produtos similares a minerais de alta dureza. Entretanto, esta técnica também apresenta desvantagem. Por apresentar temperatura elevada (por volta de 15°C) e por ser um processo delicado, o consumo de energia elétrica e o custo de implantação são altos (SILVA, 2017).

## Material e Métodos

### Caracterização da área

O estado de Alagoas está localizado na região Nordeste do Brasil, é dividido em 102 municípios, faz divisa com Pernambuco ao norte, com Sergipe ao sul; sendo banhado a leste pelo Oceano Atlântico.

A população estimada 3.322.820 habitantes, com uma área ocupada 27.778.506 km<sup>2</sup>, perfazendo uma densidade demográfica de 112.33 hab/km<sup>3</sup> com temperatura aproximada de 27°C (IBGE, 2018).

É dividido em três regiões: o litoral arenoso, a Zona da Mata e o Agreste, O estado é influenciado pelo clima tropical AS (Köppen-Geiger) (BECK et al., 2018), as chuvas são abundantes na região do litoral Atlântico e ficam escassas na faixa do semiárido.

O inverno é a estação que ocorre maior índice de precipitações pluviométricas, no interior do estado há regiões com clima semiárido, com distribuição irregular das chuvas.

A vegetação é composta por floresta tropical, mangues litorâneos e caatinga. Os rios desembocam no São Francisco e no Atlântico.

As principais atividades econômicas de Alagoas são a extração de petróleo, indústria, pecuária, agricultura e aquicultura, entre os pontos fortes da economia alagoana estão a aquicultura. A cultura alagoana é um misto de influências indígenas, africanas e europeias. Essa influência é percebida nas festas, no artesanato e na culinária (ANEAL, 2019). A vegetação de Alagoas é marcada pelo clima e solo predominantes em cada região. No litoral, mangues e lagoas se sobressaem na paisagem alagoana – atribuindo nome ao estado, inclusive. Na porção mais árida, a oeste, o cenário da caatinga é atenuado com espécies mais resistentes à estiagem. Já no agreste, resquícios de Mata Atlântica podem ser encontrados em meio à transição entre a vegetação litorânea e a caatinga (MOURA, 2016).

### Levantamento de dados secundários

Primeiramente foram realizadas pesquisas bibliográficas fazendo um levantamento de dados nas plataformas das bases *ScienceDirect* e *Web of Science*, buscando artigos científicos, sites institucionais, teses e dissertações que fossem relevantes para o desenvolvimento da pesquisa (GIL, 2017). Em seguida, os estudos foram direcionados para as informações gerais sobre os indicadores relacionados à temática sendo estes a “geração de resíduos sólidos”, a “produção de energia através dos resíduos sólidos”, o “gerenciamento” e a “gestão dos resíduos sólidos”, visando compreender e analisar os métodos de estimação de geração destes em determinadas áreas, bem como quais as tecnologias atuais para transformar esses materiais, os quais seriam descartados da forma incorreta, em fonte energética. Este método permite aos pesquisadores um maior desenvolvimento científico e maturidade na área do conhecimento a ser avaliada, além de identificar as tendências de pesquisa (YOO; JANG, 2019).

Os dados referentes à geração de resíduos sólidos urbanos foram retirados do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, que é lançado anualmente pela Associação Brasileira de Limpezas Públicas e Resíduos Especiais – ABRELPE (ABRELPE, 2016).

A caracterização gravimétrica dos RSU e os dados do consumo energético do estado foram recolhidos, respectivamente, do Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Estado de Alagoas (PERS, 2016) e do Balanço Energético do Estado de Alagoas – BEAL (BEAL, 2018) documentos elaborados pelo governo do estado.

### Produção de energia através dos resíduos sólidos urbanos

Com base nas taxas de conversão determinadas por Young (2010) para pirólise, gaseificação convencional e gaseificação por plasma, e a média de conversão de incineração citada por Klinghoffer e Castaldi (2013) (Tabela 1), foi calculado o potencial de energia elétrica em kWh por ano para os processos termoquímicos mais comuns. A partir destes valores foi realizada uma comparação com o consumo energético de Alagoas.

Tabela 1. Taxa de conversão de energia dos processos termoquímicos

Processos termoquímicos	Taxa de conversão de energia (KWh/t RSU)
Incineração	500
Pirólise	518
Gaseificação convencional	621
Gaseificação por plasma	740

Fonte: Young (2010); Klinghoffer & Castaldi (2013)

## Resultados e Discussões

Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2017), apenas 13% dos resíduos sólidos urbanos do país são reciclados. Além disso, grande parte dos RSU ainda é descartada de forma incorreta. De acordo com dados presentes no Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil, elaborado pela Abrelpe em 2016, Alagoas é o estado que apresenta menor eficiência na disposição final dos resíduos, com apenas 3% de todo lixo gerado sendo descartado em aterro sanitário. De 2015 para 2016 houve uma redução de aproximadamente 2% da geração de RSU no estado. Entretanto, a redução de resíduos sólidos dispostos em aterros sanitários foi ainda maior, chegando próximo a 4%. Deste modo, houve uma menor geração de resíduos, mas não uma melhor gestão dos mesmos (Tabela 2).

Tabela 2. População total, RSU gerados, coletados e não coletados, no estado de Alagoas, nos anos de 2015 e 2016

Ano	População total (hab)	Gerado (t/ano)	Lixão (t/ano)	Aterro controlado do (t/ano)	Aterro sanitário (t/ano)	RSU não coletado (t/ano)
2015	3.340.932	1.149.385	529.250	357.335	39.785	223.015
2016	3.358.963	1.131.865	522.315	353.685	38.325	217.540

Fonte: Abrelpe (2016)

De 1.131.865 t/ano de RSU gerados em 2016 no estado de Alagoas, 1.093.540 t/ano são descartados de forma incorreta, ou seja, vão para lixões, aterros controlados ou nem mesmo chegam a ser coletados (Tabela 3). De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) os aterros sanitários são a forma ambientalmente correta para disposição dos resíduos, pois utilizam princípios de engenharia e devem ser projetados segundo critérios estabelecidos por normas técnicas, que fixam exigências mínimas para projeto, implantação e operação.

Tabela 3. Volume do descarte de RSU em aterro sanitário e nos demais locais em Alagoas, em 2015 e 2016

Ano	Descarte de RSU em aterro sanitário (t/ano)	Descarte inadequado de RSU (t/ano)
2015	39.785	1.109.600
2016	38.325	1.093.540

Fonte: Abrelpe (2016)

Segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos do Estado de Alagoas (PERS, 2016), o município de Maceió corresponde a cerca de 68% dos RSU gerados em Alagoas. Deste modo, o presente trabalho leva em consideração a gravimetria desta cidade para ter uma percepção da porcentagem de cada RSU gerado no distrito em estudo (Tabela 4). A fração pastosa, papel/papelão e plástico representam os maiores volumes de resíduos, assim como ocorre no Brasil, que apresenta respectivamente 57,41%, 13,16% e 16,49% dos mesmos (IPEA, 2017).

Tabela 4. Caracterização gravimétrica dos RSU no município de Maceió - Alagoas

Componentes	Base seca (%)	Base úmida (%)
Madeira	4,85	4,64
Pedra/Cerâmica	10,69	6,25
Têxtil	3,31	2,8
Borracha	1,55	0,99
Plástico	18,84	16,06
Vidro	4,33	2,14
Metal	3,42	2,03
Papel/papelão	20,79	22,17
Fração pastosa	32,21	42,91

Fonte: PERS (2016)

A partir da quantidade dos resíduos sólidos urbanos produzidos por ano, fez-se a conversão para saber a quantidade de energia elétrica capaz de ser produzida a partir dos mesmos.

Segundo Khalil et al. (2019), a reciclagem energética, que é a utilização de resíduos para a geração de eletricidade, é uma das melhores opções para atender à atual demanda de consumo de energia, sendo empregada em muitos países em desenvolvimento, assim como em países desenvolvidos.

De acordo com Garcia e Mendonça (2018), as principais tecnologias térmicas implantadas no mundo para conversão de RSU em geração de energia são incineração, gaseificação e pirólise. Portanto, foram determinadas as energias produzidas através destes três processos termoquímicos (Tabela 5), dividindo a gaseificação em convencional e por plasma.

Tabela 5. Energia calculada por tipo de processo termoquímico de acordo com a quantidade de RSU (2016)

Ano	Processo termoquímico	Produção de energia (kWh/t RSU)	RSU/ano (t)	kWh/ano	MWh/ano
2016	Incineração	500	1.093.540	546.770.000	546.770
	Pirólise	518	1.093.540	566.453.720	566.454
	Gaseificação convencional	621	1.093.540	679.088.340	679.088
	Gaseificação por plasma	740	1.093.540	809.219.600	809.220

Fonte: Autores (2019)

Entre os processos termoquímicos analisados, o menos eficiente, em termos de potencial energético, é o de incineração, enquanto o mais eficiente é o de gaseificação por plasma. De acordo com Mazzonetto e Fialho (2016), quando realizada uma análise custo-benefício o método de gaseificação convencional é o mais indicado, pois este apresenta um baixo consumo energético e de insumos durante o processo e baixo custo de implantação. Além disto, a gaseificação convencional é um processo sustentável, uma vez que suas cinzas podem ser utilizadas como adubo.

De acordo com o Balanço Energético do Estado de Alagoas (BEAL, 2017), elaborado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico e Turismo do Governo do Estado de Alagoas, o estado apresentou um consumo energético de 28.005.040 MWk em 2016 (Tabela 6).

Tabela 6. Consumo energético (MWh) por setor do estado de Alagoas (2016)

Ano	Setor	Consumo energético por setor (MWh/ano)
2016	Residencial	2.884.240
	Comercial	779.210
	Público	511.720
	Agropecuário	209.340
	Industrial	9.583.120
	Outros	14.037.410
	Total	28.005.040

Fonte: BEAL (2017)

Pode-se observar que utilizando a técnica de maior potencial energético, ou seja, a gaseificação por plasma, que teria capacidade de produzir 809.220 MWh a partir dos RSU gerados em 2016, seria possível abastecer todo o comércio de Alagoas ou os espaços públicos juntamente com a agropecuária.

O processo de gaseificação convencional, que é o mais indicado, seria capaz de fornecer energia para todo o setor público.

O uso dessas técnicas contribui na redução dos custos de energia elétrica e nos impactos ambientais derivados da disposição inadequada dos RSU (CAMILLERI-FENECH et al.; 2017).

## Conclusão

De acordo com os resultados obtidos pode-se destacar dentre os processos, o processo de gaseificação convencional mostrou-se o mais adequado em relação a custo-benefício; com um poder energético de 679.088 MWh no ano de 2016, sendo capaz de prover energia para todo o setor público do estado.

Entre os processos termoquímicos analisados, o menos eficiente, em termos de potencial energético, é o de incineração, enquanto o mais eficiente é o de gaseificação por plasma. Já os resultados apresentados no método de gaseificação convencional oferecem maior custo-benefício sendo o mais indicado para o processo energético, pois este apresenta um baixo consumo energético e de insumos e baixo custo de implantação.

Os resíduos têm sido vistos como um recurso para produção de energia, assim constituindo uma alternativa mais limpa. Diante disso, é relevante destacar a importância da aplicação de políticas públicas que possam disseminar os processos de potencial energético voltados para o descarte irregular dos resíduos sólidos urbanos, visando tecnologias adequadas e acessíveis para melhores resultados voltados para a sustentabilidade.

## Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (Facepe) pelo apoio financeiro, através do edital IBPG-0987-3.07/17. À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro através do edital interno N° 01/2021 do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola e Ambiental (PPEAMB), da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE). Ao Grupo de Pesquisa Gestão Ambiental em Pernambuco (Gampe) pelo auxílio de pesquisadores para a realização deste trabalho.

## Contribuição dos autores

Os autores desse artigo declaram que contribuíram de forma igualitária na sua elaboração.

## Referências

ABRELPE – Associação Brasileira de Limpezas Públicas e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil em 2016**. Disponível em: <http://abrelpe.org.br/panorama/>. Acessado em: 07 de maio de 2019.

ADENIRAN, A. E.; NUBI, A. T.; ADELOPO, A. O. Solid waste generation and characterization in the University of Lagos for a sustainable waste management. **Waste Management**, v. 67, p. 3-10, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.002>

AGUIAR, A. C.; SILVA, K. A.; EL-DEIR, S. G. (2019). AGUIAR, A. C.; SILVA, K. A.; EL-DEIR, S. G. (2019). Impactos, inovações e tecnologias: a construção do congresso brasileiro de resíduos sólidos. In: AGUIAR, A. C.; SILVA, K. A.; EL-DEIR, S. G.(org). **Resíduos sólidos: Impactos ambientais e inovações tecnológicas**, Recife: EFUFPRPE, p. 8-16.

ANEAL - Anuário Estatístico do Estado de Alagoas. Disponível em: <<http://dados.gov.br/dataset/anuario-estatistico-do-estado-de-alagoas>> Acesso: 07 mai 2019.

ANTHRAPER, D.; MCLAREN, J.; BAROUTIAN, S.; MUNIR, M. T.; YOUNG, B. R. Hydrothermal deconstruction of municipal solid waste for solid reduction and value production. **Journal of Cleaner Production**, v. 201, p. 812-819, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.116>

ARENA, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. **Waste Management**, vol. 32, p. 625- 639, april 2012.

BEAL - BALANÇO ENERGÉTICO DO ESTADO DE ALAGOAS. **Balanço Energético do Estado de Alagoas – Ano base 2017**. Governo do estado de Alagoas, 2017. Disponível em : <http://www.sedetur.al.gov.br/balanco-energetico/send/63-balanco-energetico/189-beal-2018>.

BECK, H.E.; ZIMMERMANN, N.E.; MC VICAR, T.R.; VERGOPOLAN, N.; BERG, A.; WOOD, E. F. Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. **Scientific Data**, v.5, p.180214, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>

BERTICELLI, R.; PANDOLFO, A.; KORF, E. P. Gestão integrada de resíduos sólidos urbanos: perspectivas e desafios. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 5, n. 2, p. 711-744, 2017. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v5e22016711-744>

CAMILLERI-FENECH, M.; OLIVER-SOLÀ, J.; FARRENY, R.; GABARRELL, X. Where do islands put their waste? – A material flow and carbono footprint analysis of municipal waste management in the Maltese Islands. **Journal of cleaner production**, v.195, p. 1609-1619, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.057>

CASTRO, D. E. Tecnologia de recuperação térmica e energética de resíduos sólidos. **Revista Educação & Tecnologia**, Centro Federal de Educação Tecnológica, Minas Gerais. 2015.

CHEN, J., Huang, L.W., Zhang, X.M. Pyrolysis analysis of RDF by TG–FTIR techniques. **Environ. Sci. Technol**, v. 31, p. 29–32, 2014.

CHEN, Y. et al. Influence of The Interaction On Nox Emission During CoCombustion Of Combustible Solid Waste Components. **Journal of the Energy Institute**, v. 89, n.3, p. 313–324, 2015.

DALMO, F.C.; SIMÃO, N.M.; LIMA, H.Q.; JIMENEZ, A.C.M.; NEBRA, S.; MARTINS, G.; PALACIOS-BERECHÉ, R.; SANTANA, P.H.M. Energy recovery overview of municipal solid waste in São Paulo State, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 212, p. 461-474, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.016>

DASTJERDIA, B.; STREZOVA, V.; KUMARA, R.; BEHNIAB, M. An evaluation of the potential of waste to energy technologies for residual solid waste in New South Wales, Australia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 115, p. 109398, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109398>

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. **Nota Técnica DEN 18/14**. Série Recursos Energéticos. Ministério de Minas e Energias. Rio de Janeiro, 2014.

FEAM - Fundação Estadual do Meio Ambiente. Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável. **Aproveitamento Energético De Resíduos Sólidos Urbanos**: Guia De Orientações Para Governos Municipais De Minas Gerais. Belo Horizonte: Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável, 2013.

FERREIRA, R.L. **Gaseificação por oxigênio: uma alternativa para o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos no Rio Grande do Sul**. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

FOURNIER, Bárbara Rocha; MONTEIRO, Nathália Pires. **Integração dos processos de digestão anaeróbica e pirólise para tratamento de resíduos sólidos urbanos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade Federal Fluminense, Escola de Engenharia, Niterói, 2021.

GARCIA, A.; MENDONÇA, M.A. Bio-óleo de resíduos sólidos obtido via pirólise: análise dos parâmetros físicoquímicos. **Brazilian Applied Science Review**. Curitiba, v. 2, n. 5, p. 1632-1635, . 2018. DOI:<https://doi.org/10.34115/basr.v2i5.550>

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GOMES, T. M. A. **Geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos: uma revisão da leitura**. Trabalho de Conclusão de Cursos (Curso de Graduação em Engenharia Elétrica) - Campus de Sobral, Universidade Federal do Ceará, Sobral, 2018.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. CIDADES – Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/maceio/panorama>> Acesso em: 07 mai. 2019

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos. Brasília, 2017.

KHALIL, M.; BERAWI, M.A.; HERYANTO, R.; AKHMAD, R. Waste to energy technology: The potential of sustainable biogas production from animal waste in Indonesia. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 105, p. 323-331, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.02.011>

KINNUNEN, H.V.; KOSKINEN, P.E.P.; RINTALA, J. Mesophilic and thermophilic anaerobic laboratory-scale digestion of Nannochloropsis microalga residues. **Bioresource Tecnologia**, v. 155, p. 314-322, 2014.

KLINGHOFFER, N.B.; CASTALDI, M.J. Waste to Energy Conversion Technology. Woodhead Publishing Series in Energy. Elsevier, 2013.

KORAI, M. S.; MAHAR, R. B.; UQAILI, M. A. The feasibility of municipal solid waste for energy generation and its existing management practices in Pakistan. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 338-353, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.051>

KUMAR, A.; SAMADDER, S. R. Performance evaluation of anaerobic digestion technology for energy recovery from organic fraction of municipal solid waste: A review. **Energy**, v.197, p.11725, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117253>

- LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Evaluation of the treatment of municipal solid waste as renewable energy resource in Campinas, Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 29, p. 19-25, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seta.2018.06.011>
- LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Recycling and thermal treatment of MSW in a developing country. **IOSR J. Eng.**, v. 7, n. 7, p. 30-38, 2017.
- MACHADO, C.F. **Incineração: Uma Análise dos Tratamentos Térmicos dos Resíduos Sólidos Urbanos de Bauru-SP**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.
- MASSUGA, F; DOLIVEIRA, S. L. D.; GONZAGA, C. A. M.; SOARES, S. A sustentabilidade no gerenciamento de resíduos sólidos urbanos: um estudo em restaurantes no município de Irati, PR. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, vol. 58, p. 886-910, jul./dez. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/dma.v58i0.71571>
- MAZZONETO, A.W.; FIALHO, L. Geração de energia através de resíduos sólidos na indústria de autopeças - estudo de caso. **Bioenergia em revista: diálogos**, ano 6, n. 2, p. 08-30, 2016.
- MEDEIROS, Virgilio Almeida; CASTRO, Daniel Enrique. **Tecnologias de recuperação térmica e energética de resíduos sólidos**. Centro Federal de Ensino Tecnológico de Minas Gerais-CEFET-MG, 2015
- MOHAMMADI, M.; HARJUNKOSKI, I. Performance analysis of waste-to-energy technologies for sustainable energy generation in integrated supply chains. **Computers and Chemical Engineering**, v.140, p. 106905, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106905>
- MOURA, F.B.P. (Org). **A Mata Atlântica em Alagoas**. Maceió: EDUFAL, 2016. Disponível em: <[http://www.ufal.edu.br/usinaciencia/multimedia/livros-digitaiscadernostematicos/A\\_Mata\\_Atlantica\\_em\\_Alagoas.pdf](http://www.ufal.edu.br/usinaciencia/multimedia/livros-digitaiscadernostematicos/A_Mata_Atlantica_em_Alagoas.pdf)>. Acesso em: 07 mai 2019.
- MOYA, D.; ALDÁS, C.; LÓPEZ, G.; KAPARAJU, P. Municipal solid waste as a valuable renewable energy resource: a worldwide opportunity of energy recovery by using Waste-To-Energy Technologies. **Energy Procedia**, v.134, p. 286-295, 2017.
- NEEHAULA, N.; JEETAHA, P.; DEENAPANRAY, P. Energy recovery from municipal solid waste in Mauritius: Opportunities and challenges. **Environmental Development**. v.33, p.100489, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.100489>
- OKAMURA, L.A.; TOMAZZONI, G.; LOPES, E.J.; NETO, P.R.C. Obtenção sustentável de gás de síntese: prospecção das tecnologias disponíveis baseada em patentes e artigos. **Cadernos de Prospecção**, v. 6, n. 1, p. 27-35, 2014.
- PERS – PLANO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO ESTADO DE ALAGOAS. Governo de Alagoas. Disponível em: [http://residuossolidos.al.gov.br/vgmdia/arquivos/191\\_ext\\_arquivo.pdf](http://residuossolidos.al.gov.br/vgmdia/arquivos/191_ext_arquivo.pdf)2016.
- ROCHA, A.L.L. **Desenvolvimento de um reator de pirólise em escala de bancada para estudos com resíduos sólidos urbanos**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016.
- SANTOS, I. F. S; VIEIRA, N. D. B; NÓBREGA, L. G. B; BARROS, R. M; TIAGO-FILHO, G. L. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 131, p. 54-63, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.12.012>
- SANTOS, R. E; SANTOS, I. F. S; BARROS, R. M; BERNAL, A. P; TIAGO-FILHO, G. L; SILVA, F.D.G.B. Generating electrical energy through urban solid waste in Brazil: An economic and energy comparative analysis. **Journal of environmental management**, v. 231, p. 198-206, 2019. DOI: [10.1016/j.jenvman.2018.10.015](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.10.015)
- SEPLAG - SECRETARIA DE ESTADO DO PLANEJAMENTO, GESTÃO E PATRIMÔNIO. Mapas de Alagoas. Disponível em : <http://www.seplag.al.gov.br/mapas-de-alagoas/acervo>
- SILVA, A. M. B; RIBEIRO, A. R. B; SANTOS, M. V. N; LIMA, T. L. A. Impactos ambientais, sociais e econômicos da logística reversa; uma revisão bibliográfica. In: SANTOS, J. P. O; SILVA, R. C. P; MELO, A. M; EL-DEIR, S. G.(org.). **Resíduos sólidos: Impactos socioeconômicos e ambientais**, Recife: EDUFRPE, p. 186 – 197, 2018.
- SILVA, R.S. **A análise multicritério de tecnologias utilizadas na Gestão de Resíduos Sólidos Urbanos**. Dissertação (Pós Graduação em Saúde Pública) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública Sérgio Arouca, Rio de Janeiro, 2017.
- SOARES COSER, Igor. **Estudo e Análise de Geração de Energia Elétrica Utilizando Resíduos Sólidos Urbanos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2021.
- YOO, B.; JANG, M. A bibliographic survey of business models, service relationships, and technology in electronic commerce. **Electronic Commerce Research and Applications**, v. 33, p. 100818, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2018.11.005>
- YOUNG, G. C. Municipal Solid Waste to Energy Conversion Processes: economic, technical, and renewable comparison. **John Wiley & Sons. Hoboken**, New Jersey, p. 394, 2010.