

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS - *CAMPUS* BAMBUÍ E SÃO JOÃO EVANGELISTA
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO

Marcus Marconi de Andrade Trajano do Nascimento
Michael Jéfferson Theodoro Mendes dos Santos

**ANÁLISE TÉCNICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS DE PODA URBANA: estudo de
caso na Central de Tratamento de Resíduos de Maceió-AL**

BambuÍ - MG

2026

MARCUS MARCONI DE ANDRADE TRAJANO DO NASCIMENTO

MICHAEL JÉFFERSON THEODORO MENDES DOS SANTOS

ANÁLISE TÉCNICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE RESÍDUOS DE PODA URBANA: estudo de caso na Central de Tratamento de Resíduos de Maceió-AL

Documento apresentado ao Curso de PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais - *Campus* BAMBUÍ E SÃO JOÃO EVANGELISTA para a obtenção do título de Pós-graduando em Gestão com Ênfase em Tecnologia e Inovação.

Orientador: Prof. Dr^o Anderson Alves Santos

BambuÍ - MG
2026

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - Campus Bambuí

- N244a Nascimento, Marcus Marconi de Andrade Trajano do.
Análise técnica do potencial de geração de energia elétrica a partir de resíduos de poda urbana: estudo de caso na central de tratamento de resíduos de Maceió – AL. / Marcus Marconi de Andrade Trajano do Nascimento, Michael Jéfferson Theodoro Mendes dos Santos. – 2026.
21 f.
Orientador: Anderson Alves Santos.
Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG, Curso Pós-Graduação Lato Sensu em Gestão, 2026.
1. Biomassa. 2. Combustão direta. 3. Energia renovável. I. Santos, Michael Jéfferson Theodoro Mendes dos. II. Santo, Anderson Alves. III. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG. IV. Título.

CDD 621.3121


MARCUS MARCONI DE ANDRADE TRAJANO DO NASCIMENTO

MICHAEL JÉFFERSON THEODORO MENDES DOS SANTOS

**ANÁLISE TÉCNICA DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A
PARTIR DE RESÍDUOS DE PODA URBANA: ESTUDO DE CASO NA CENTRAL DE
TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE MACEIÓ – AL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Pós-Graduação Lato Sensu em Gestão do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus Bambuí*) para obtenção do título de Especialista em Gestão – Ênfase em Tecnologia e Inovação.

Aprovado em 18/03/2026 pela banca examinadora.

Documento assinado digitalmente
 ANDERSON ALVES SANTOS
Data: 07/04/2026 19:31:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Anderson Alves Santos (Orientador(a))

Prof. Carlos Roberto de Sousa Costa (membro da banca)

Prof. José Leonardo de Oliveira Rodrigues (membro da banca)

RESUMO

Este artigo analisa o potencial energético dos resíduos de poda urbana dispostos na Central de Tratamento de Resíduos (CTR) de Maceió, Alagoas, e propõe intervenção aplicada para o aproveitamento energético dessa biomassa. O estudo utiliza dados primários referentes ao volume mensal de resíduos, caracterização físico-química das espécies arbóreas mais recorrentes e análises laboratoriais de poder calorífico superior (PCS) e termogravimetria (TGA). Os resultados indicam PCS médio de 17,85 MJ/kg e volume anual superior a 3,8 mil toneladas, correspondendo a potencial térmico estimado de 2.190 kW. Considerando rendimentos de 36% para gaseificação e 28% para combustão direta em ciclo Rankine, estimam-se potenciais elétricos de 788 kW e 613 kW, respectivamente, capazes de suprir aproximadamente 3.283 e 2.554 residências com consumo médio mensal de 170 kWh. Conclui-se que o aproveitamento energético da biomassa de poda urbana no CTR apresenta viabilidade técnica e ambiental, contribuindo para a diversificação da matriz energética local e para a mitigação de impactos associados à disposição final do material.

Palavras-chave: biomassa. Combustão direta. Energia renovável. Gaseificação. Resíduos de poda urbana.

ABSTRACT

This study evaluates the energy potential of urban pruning residues disposed of at the Solid Waste Treatment Center (CTR) of Maceió, Alagoas, Brazil, and proposes an applied intervention for the energy recovery of this biomass. The research is based on primary data regarding monthly waste volumes, physicochemical characterization of the most frequent tree species, and laboratory analyses of higher heating value (HHV) and thermogravimetric analysis (TGA). The results indicate an average HHV of 17.85 MJ/kg and an annual availability exceeding 3.8 thousand tonnes, corresponding to an estimated thermal potential of 2,190 kW. Considering electrical efficiencies of 36% for gasification and 28% for direct combustion in a Rankine cycle, the estimated electrical potentials are 788 kW and 613 kW, respectively, capable of supplying approximately 3,283 and 2,554 residential units with an average monthly consumption of 170 kWh. The findings demonstrate that the energy recovery of urban pruning biomass at the CTR is technically and environmentally feasible, contributing to local energy matrix diversification and mitigation of environmental impacts associated with landfill disposal.

Keywords: biomass. Direct combustion. Renewable energy. Gasification. Urban pruning waste.

Sumário

1. Introdução	8
2. Referencial teórico	9
2.2 Potencial energético da biomassa de poda urbana	10
2.3 Diversificação da matriz elétrica	11
2.4 Conversão energética da biomassa	12
2.4.1 Combustão direta	12
2.4.2 Gaseificação	13
2.4.3 Briquetes	14
3. Metodologia	15
3.1 Procedimentos de coleta e identificação das espécies	15
3.2 Análise em laboratório	16
3.3.1. Análise de Poder Calorífico	17
3.3.1.1. Análise Termogravimétrica (TGA)	18
3.3.1.2. Análise Termodiferencial (DTG)	18
4. Resultados e Discussões	18
6. Conclusões	22
Referências bibliográficas	23

1. Introdução

O processo de crescimento populacional e expansão urbana tem apresentado desafios significativos às cidades, especialmente em razão da ocupação de espaços sem planejamento adequado e da modificação da paisagem natural, com impactos sobre o clima e a qualidade de vida. Nos grandes centros urbanos, as áreas verdes exercem papel fundamental na mitigação de ruídos, na captura de dióxido de carbono (CO₂), na regulação térmica, na redução do escoamento superficial das águas pluviais e na promoção da convivência social. Contudo, na ausência de planejamento adequado, a arborização pode gerar conflitos com a infraestrutura urbana, ocasionando interferências em redes de energia elétrica, telecomunicações e demais serviços essenciais (ROLIM; CARVALHO; SILVEIRA, 2023).

Nesse contexto, a fim de evitar interferências nas redes de serviços públicos — especialmente na rede de energia elétrica —, têm sido realizadas podas frequentes na arborização urbana, muitas vezes acima do necessário, o que resulta na geração de elevado volume anual de resíduos de biomassa resultantes da poda urbana (INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT, 2022).

Diante desse cenário, essa biomassa pode ser compreendida não apenas como resíduo, mas como recurso energético com potencial de valorização. Conforme destacam Camargo e Camargo (2019), a biomassa constitui uma das fontes renováveis com maior perspectiva de expansão nos próximos anos, sendo considerada alternativa estratégica para diversificação da matriz energética e redução da dependência de combustíveis fósseis. Ademais, seu aproveitamento racional contribui para a mitigação das emissões de gases de efeito estufa e para a substituição parcial de fontes convencionais, reforçando sua relevância no contexto da transição energética e da sustentabilidade ambiental.

Na cidade de Maceió, os resíduos provenientes da poda urbana são encaminhados à Central de Tratamento de Resíduos (CTR), onde são majoritariamente destinados à disposição final. Dados operacionais indicam volume anual superior a 3,8 mil toneladas desse material, configurando fluxo contínuo de biomassa potencialmente aproveitável. Contudo, inexistia avaliação sistemática que correlacionasse a disponibilidade quantitativa desses resíduos às suas propriedades calorimétricas e termogravimétricas, tampouco que estimasse comparativamente o potencial de geração elétrica por meio das rotas de combustão direta em ciclo Rankine e gaseificação associada a motogeradores.

Embora existam revisões abrangentes sobre a conversão termoquímica de biomassa lignocelulósica, os estudos voltados especificamente aos resíduos de poda urbana concentram-se, em grande medida, na caracterização físico-química, no potencial energético e em aplicações laboratoriais pontuais. No contexto brasileiro, ainda são limitadas as investigações aplicadas à valorização energética desses resíduos em centrais de tratamento de resíduos, sobretudo aquelas baseadas em dados operacionais reais e na integração entre análises calorimétricas, termogravimétricas e modelagem energética para estimativa de geração elétrica.

Nesse sentido, formula-se a seguinte questão de pesquisa: qual é o potencial efetivo de geração de energia elétrica a partir dos resíduos de poda urbana destinados ao CTR de Maceió, considerando as vias termoquímicas de conversão, como a gaseificação e a combustão direta?

Para a compreensão dessas rotas, a gaseificação consiste na conversão termoquímica da biomassa em gás combustível, por meio de oxidação parcial em condições controladas, possibilitando sua utilização em sistemas de geração elétrica com maior eficiência (BASU, 2010). Já a combustão direta refere-se à queima completa da biomassa na presença de oxigênio, com liberação de energia térmica posteriormente convertida em eletricidade, usualmente por meio do ciclo Rankine (KALTSCHMITT; HARTMANN; HOFBAUER, 2016).

A partir dessas considerações, o presente estudo tem como objetivo geral identificar o potencial de geração de energia elétrica a partir da gaseificação e da combustão direta dos resíduos provenientes da poda urbana realizada em Maceió, estabelecendo análise comparativa da quantidade de residências que poderiam ser atendidas pelos potenciais energéticos estimados. Como objetivos específicos, buscou-se: (i) determinar a quantidade mensal média, em toneladas, dos resíduos de poda urbana gerados no município; (ii) identificar as espécies arbóreas mais frequentemente podadas; (iii) caracterizar as propriedades calorimétricas e termogravimétricas biomassa representativa; e (iv) estimar comparativamente a quantidade de residências atendidas pela potência elétrica calculada, considerando-se consumo médio mensal de 170 kWh por unidade consumidora.

Parte-se da hipótese de que a biomassa de poda urbana apresenta potencial energético tecnicamente aproveitável e que a rota termoquímica por gaseificação apresenta maior eficiência energética na conversão desses resíduos em eletricidade quando comparada à combustão direta em ciclo Rankine, sob condições equivalentes de disponibilidade térmica. Ao integrar dados operacionais reais, caracterização laboratorial e modelagem energética, o estudo pretende contribuir para o avanço das discussões sobre valorização energética na gestão de resíduos urbanos e para a consolidação de abordagens aplicadas à geração descentralizada de energia renovável.

2. Referencial teórico

2.1 Poda urbana e gestão dos resíduos

A arborização urbana desempenha papel estratégico na sustentabilidade das cidades, contribuindo para regulação microclimática, retenção de poluentes e melhoria da qualidade de vida. Contudo, o manejo dessas árvores, especialmente por meio de podas periódicas, gera volumes expressivos de resíduos lenhosos. Segundo estudo conduzido pelo IPT, organizado por Souza e Velasco (2022), a frequência das podas em centros urbanos brasileiros, intensificada pela interferência com redes de infraestrutura, resulta em significativa geração anual de biomassa residual.

Souza e Velasco (2022) destacam que, embora esse material apresente potencial para diferentes formas de reaproveitamento, a destinação predominante ainda ocorre por meio da disposição em aterros ou áreas de transbordo, frequentemente sem segregação ou tratamento adequado.

Nesse contexto, a gestão dos resíduos sólidos urbanos, incluindo os resíduos de poda, constitui competência dos municípios, conforme estabelecido pela Constituição Federal de 1988 e pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), cabendo ao poder público local a organização e a prestação dos serviços de limpeza urbana.



Fonte: Dados da pesquisa, 2026.

Figura 1 – Fluxo da gestão de resíduos de poda urbana e proposta de valorização energética no CTR de Maceió.

O IPT ressalta que os resíduos de poda possuem características tecnológicas que possibilitam sua valorização por distintas rotas, como compostagem, produção de cavacos, aplicação em produtos de madeira e alternativas energéticas, desde que precedidas de adequada caracterização técnica e organização logística (SOUZA; VELASCO, 2022). No entanto, observa-se que muitos municípios ainda carecem de planejamento estruturado para integrar essa fração à gestão sustentável de resíduos sólidos.

Sob a perspectiva teórica da economia circular, os resíduos de poda deixam de ser compreendidos como passivo operacional e passam a ser reconhecidos como recurso reinsertível em cadeias produtivas. Portanto, a valorização energética da biomassa urbana insere-se em uma abordagem integrada de gestão ambiental, alinhada às diretrizes legais e às correntes contemporâneas de sustentabilidade.

Assim, o debate sobre a gestão dos resíduos de poda urbana não se limita à sua destinação final, mas envolve a redefinição de seu papel no sistema urbano, fundamentando a análise do potencial energético desenvolvida neste estudo.

2.2 Potencial energético da biomassa de poda urbana

Os resíduos provenientes da poda e supressão de árvores urbanas apresentam composição predominantemente lenhosa, com significativa participação de galhos e frações estruturais ricas em material lignocelulósico, conforme caracterizações técnicas realizadas pelo IPT (2022). Essa biomassa é composta majoritariamente por celulose, hemicelulose e lignina, estruturas que concentram elevados teores de carbono fixo e energia química, conferindo elevado potencial energético quando submetidas a processos de conversão termoquímica (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2024; International Energy Agency – IEA, 2023).

A natureza lignocelulósica desses resíduos está diretamente associada à elevada densidade energética, característica que os torna comparáveis a outras biomassas florestais tradicionalmente utilizadas para geração de energia (IEA, 2023). Segundo a EPE (2024), resíduos sólidos urbanos de origem vegetal apresentam poder calorífico significativo, podendo atingir valores entre 15 e 20 MJ/kg, a depender das condições de umidade e composição, o que reforça sua viabilidade para aplicações energéticas.

Estudos laboratoriais conduzidos pelo IPT (2022) indicam que os resíduos de poda apresentam altos teores de matéria orgânica e fração volátil, além de umidade significativa. Embora o teor de umidade possa influenciar negativamente o desempenho energético — reduzindo a eficiência térmica e aumentando o consumo energético no processo —, a adoção de etapas de pré-tratamento, como secagem natural, secagem artificial ou densificação (briquetagem e peletização), pode otimizar significativamente o aproveitamento energético da biomassa (IEA, 2023).

As propriedades físico-químicas observadas demonstram a adequação da biomassa de poda para aplicação em processos termoquímicos, como combustão direta, gaseificação e pirólise, tecnologias amplamente utilizadas para conversão de biomassa em energia térmica e elétrica (EPE, 2024; IEA, 2023). A gaseificação, em particular, destaca-se por permitir a produção de gás de síntese (syngas), que pode ser utilizado em motores ou turbinas para geração de eletricidade com maior eficiência energética, enquanto a combustão direta apresenta maior simplicidade operacional e maturidade tecnológica.

Além das características intrínsecas do material, destaca-se que a geração de resíduos de poda ocorre de forma contínua nos ambientes urbanos, em função das atividades regulares de manejo da arborização urbana, o que garante previsibilidade e regularidade na oferta desse recurso (EPE, 2024). Esse aspecto diferencia a biomassa de poda de outras fontes sazonais, contribuindo para sua inserção como fonte energética complementar em sistemas descentralizados de geração.

Quando adequadamente segregados, coletados e manejados, esses resíduos podem constituir fonte relevante de energia renovável, contribuindo para a diversificação da matriz energética e para a redução da disposição em aterros sanitários, em consonância com os princípios da Política Nacional de Resíduos Sólidos, que prioriza a não geração, redução, reutilização e valorização energética dos resíduos sólidos. Nesse contexto, o aproveitamento energético da biomassa de poda urbana representa uma estratégia alinhada aos princípios da economia circular e da transição energética sustentável (IEA, 2023).

2.3 Diversificação da matriz elétrica

A matriz elétrica brasileira caracteriza-se por elevada participação de fontes renováveis, com predominância da geração hidráulica, complementada por crescente inserção das fontes eólica e solar, conforme dados apresentados pela EPE no Balanço Energético Nacional (2025). As fontes renováveis representam 88,0% da oferta interna de eletricidade no Brasil, evidenciando a posição diferenciada do país no cenário internacional quando comparado a sistemas fortemente dependentes de combustíveis fósseis. Ainda assim, a expansão da demanda energética e os desafios associados à variabilidade hidrológica reforçam a necessidade de diversificação da matriz, com ampliação de fontes renováveis complementares e descentralizadas.

A diversificação da matriz elétrica constitui elemento central das metas climáticas estabelecidas no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima. Na COP28, realizada em Dubai (2023), foi firmado compromisso global de triplicar a capacidade instalada de energias renováveis até 2030 e dobrar a taxa média anual de eficiência energética, medidas consideradas essenciais para limitar o aquecimento global a 1,5°C (International Energy Agency – IEA, 2023). Essas diretrizes reforçam a importância de expandir fontes de baixo carbono, incluindo a biomassa, não apenas em grandes empreendimentos, mas também em soluções regionais e integradas à gestão de resíduos.

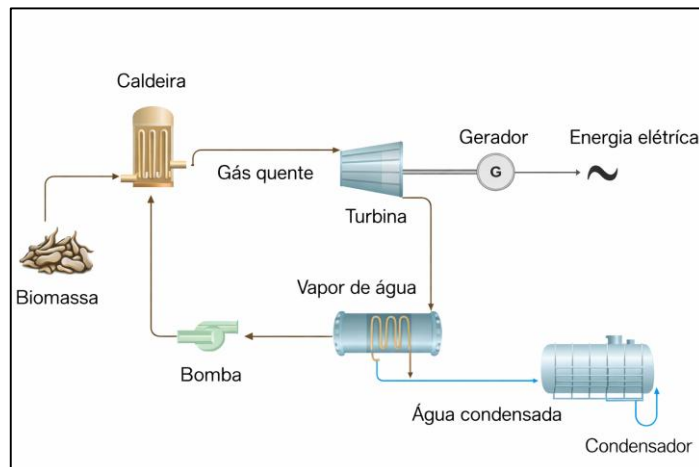
2.4 Conversão energética da biomassa

A conversão energética da biomassa pode ser realizada por diferentes rotas tecnológicas. Segundo Ayhan Demirbas (2009), a biomassa pode ser convertida em energia por meio de processos termoquímicos, bioquímicos e físico-químicos, evidenciando sua versatilidade como fonte energética. No âmbito das rotas termoquímicas, Anthony V. Bridgwater (2012) destaca processos como combustão, pirólise e gaseificação como principais caminhos de conversão térmica da biomassa. Complementarmente, relatórios recentes da International Renewable Energy Agency (IRENA, 2023) indicam que essas tecnologias desempenham papel estratégico na expansão das energias renováveis e na transição energética global. De forma convergente, publicações da International Energy Agency Bioenergy (IEA Bioenergy, 2023) evidenciam a diversidade de rotas tecnológicas, incluindo combustão, gaseificação, liquefação termoquímica e produção de biogás, reforçando a ampla aplicabilidade da biomassa na geração de energia.

Conforme destacado por Bridgwater (2012), a combustão direta e a gaseificação figuram entre as principais rotas termoquímicas para a conversão energética da biomassa. Nesse sentido, o presente estudo concentra-se nessas duas tecnologias, considerando a combustão direta em ciclo Rankine e a gaseificação associada a grupo motor, dada sua relevância tecnológica e ampla aplicabilidade na geração de energia elétrica a partir de resíduos lignocelulósicos.

2.4.1 Combustão direta

A combustão direta consiste na oxidação controlada da biomassa na presença de oxigênio, resultando na liberação de energia térmica que pode ser convertida em energia útil. Em sistemas de geração de eletricidade, essa energia é usualmente aproveitada por meio da produção de vapor e acionamento de turbinas, operando predominantemente segundo o ciclo Rankine, amplamente reconhecido como a principal configuração termodinâmica para conversão de energia térmica em energia elétrica em sistemas baseados em biomassa (BASU, 2010; KALTSCHMITT; HARTMANN; HOFBAUER, 2016).



Fonte: Adaptado de ABBAS; ISSA; ILINCA (2020, p. 4).

Figura 2 – Esquema simplificado da geração de energia elétrica a partir da combustão direta de biomassa em ciclo Rankine.

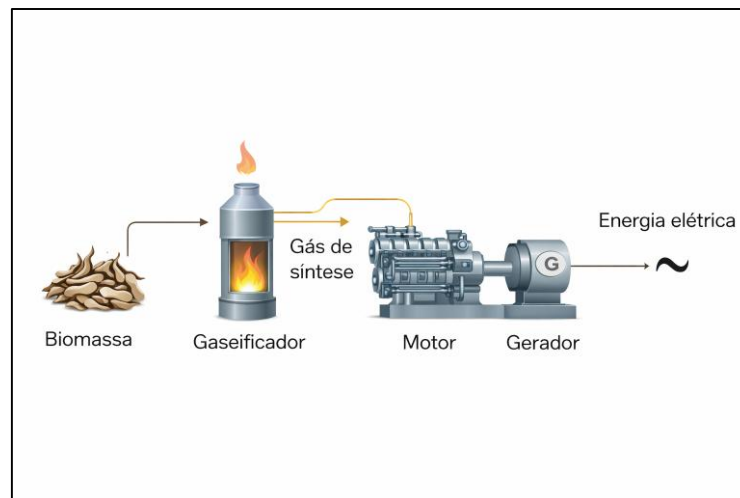
A Figura 2 ilustra o esquema de geração de energia elétrica a partir da combustão direta de biomassa operando segundo o ciclo Rankine. Nesse sistema, a biomassa é inicialmente

submetida à combustão em uma caldeira, onde a energia química do combustível é convertida em energia térmica, promovendo a geração de vapor de alta pressão. Esse vapor é então expandido em uma turbina, convertendo energia térmica em energia mecânica, a qual é posteriormente transformada em energia elétrica por meio de um gerador acoplado. Após a expansão, o vapor é conduzido a um condensador, onde ocorre sua condensação e retorno ao estado líquido. Em seguida, a água condensada é pressurizada por uma bomba e recirculada para a caldeira, fechando o ciclo termodinâmico. Esse arranjo corresponde ao ciclo Rankine, amplamente empregado em sistemas termelétricos a vapor para conversão de energia térmica em eletricidade (BASU, 2010; KALTSCHMITT; HARTMANN; HOFBAUER, 2016).

2.4.2 Gaseificação

A gaseificação consiste em um processo termoquímico de conversão da biomassa em gás combustível por meio de oxidação parcial em elevadas temperaturas (BASU, 2010). Em termos mais amplos, trata-se da transformação de materiais carbonáceos em um gás de síntese na presença de um agente gaseificante, como ar, oxigênio, vapor ou dióxido de carbono, sob condições controladas de fornecimento de oxidante (RUIZ et al., 2013; NUNES et al., 2025). Esse processo ocorre tipicamente em regime subestequiométrico, resultando na formação de um gás combustível composto predominantemente por monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e metano (CH₄), além de outros gases leves (TREJO et al., 2025).

De acordo com a IEA Bioenergy Task 33 (2020), a gaseificação destaca-se pela flexibilidade quanto às matérias-primas e pelas múltiplas possibilidades de aplicação do gás de síntese, incluindo a geração de energia, produção de combustíveis e obtenção de insumos químicos. Nesse contexto, o gás produzido pode ser empregado como combustível em sistemas de geração de energia elétrica, especialmente em motores de combustão interna acoplados a geradores. Após etapas de limpeza e condicionamento, necessárias para a remoção de particulados e compostos indesejáveis, o gás é direcionado ao grupo motor, onde ocorre a conversão da energia química em energia mecânica e, posteriormente, em energia elétrica. Essa configuração apresenta elevada flexibilidade operacional e se mostra particularmente adequada para aplicações descentralizadas e de menor escala, ampliando as possibilidades de aproveitamento energético da biomassa (BASU, 2010; IEA BIOENERGY TASK 33, 2020).

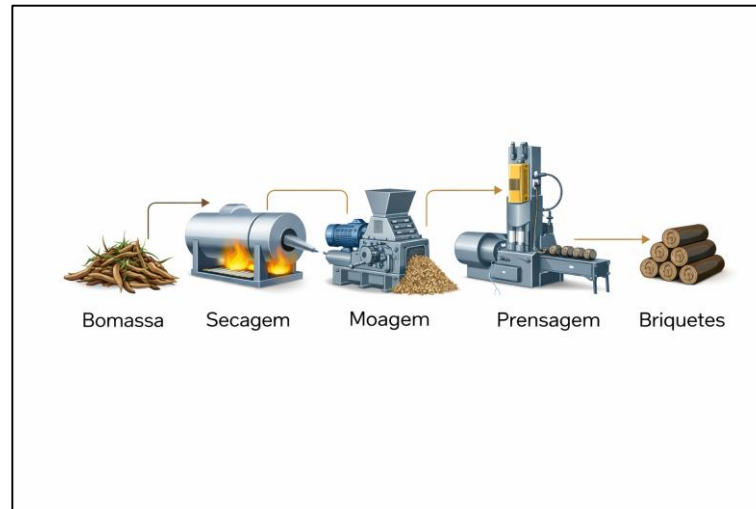


Fonte: Dados da pesquisa, 2026.

Figura 3 – Esquema simplificado da geração de energia elétrica a partir da gaseificação da biomassa com grupo motor.

2.4.3 Briquetes

Antes da utilização dos resíduos provenientes da poda urbana em processos de gaseificação ou combustão direta, faz-se necessária sua adequação física, a fim de proporcionar maior eficiência no aproveitamento energético. Segundo Silva et al. (2024), a briquetagem é um processo de densificação que promove a compactação de partículas finas por meio da aplicação de pressão, podendo ou não envolver o uso de agentes aglutinantes. Esses agentes favorecem a formação de corpos sólidos a partir das partículas, estabelecendo ligações físicas ou químicas que conferem rigidez estrutural ao material.



Fonte: Dados da pesquisa, 2026.

Figura 4 - Esquema do processo de briquetagem de resíduos de poda urbana para fins energéticos.

Como resultado, obtém-se um produto com maior densidade, formato definido e propriedades mecânicas compatíveis com especificações técnicas. Entre os métodos empregados para aplicação de pressão externa, destaca-se o sistema que utiliza dois rolos paralelos, permitindo o escoamento contínuo do material durante o processo (SILVA et al., 2024, p. 3).

A briquetagem constitui uma etapa relevante de pré-tratamento da biomassa, pois promove sua densificação, elevando a densidade aparente e a densidade energética do combustível, além de melhorar as condições de armazenamento, transporte e manuseio (GONG et al., 2023; ROMAN et al., 2024). Adicionalmente, a maior uniformidade física do material briquetado favorece sua aplicação em processos termoquímicos, contribuindo para maior estabilidade operacional em rotas como combustão e gaseificação (TREJO et al., 2025). Ressalta-se que a redução da umidade está frequentemente associada ao pré-condicionamento da biomassa antes da compactação, sendo a briquetagem responsável principalmente pela melhoria das propriedades físicas e energéticas por unidade de volume (ROMAN et al., 2024).

Assim, a utilização de briquetes obtidos a partir dos resíduos de poda urbana — como folhas, galhos e lenha — promove melhoria significativa na qualidade energética do material, possibilitando maior eficiência na geração de calor e potência quando empregados em gaseificadores ou caldeiras.

3. Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho baseou-se na utilização de dados quantitativos e qualitativos. Para a realização do estudo do potencial de geração de energia elétrica, fez-se necessária a obtenção de informações relativas à disponibilidade de biomassa, especialmente no que se refere à sua quantidade e composição.

Os dados utilizados, referentes ao ano de 2024, foram fornecidos pela Autarquia Municipal de Desenvolvimento Sustentável e Limpeza Urbana (ALURB), órgão responsável pela gestão dos resíduos sólidos urbanos, incluindo os resíduos provenientes da poda urbana destinados à Central de Tratamento de Resíduos (CTR).

A análise dos dados contemplou a quantidade anual desses resíduos e a composição percentual das espécies predominantes, bem como a aplicação de parâmetros técnicos de poder calorífico descritos na literatura especializada para estimativa do potencial energético.

A presente pesquisa caracteriza-se como estudo de caso, de natureza aplicada, com abordagem quantitativa e qualitativa e objetivo descritivo-analítico. O estudo de caso é definido como uma estratégia de investigação que permite a análise aprofundada de um fenômeno contemporâneo em seu contexto real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não estão claramente estabelecidos (YIN, 2015). Nesse sentido, essa abordagem mostra-se adequada por possibilitar a compreensão detalhada das condições específicas da unidade analisada.

Tal classificação justifica-se por concentrar-se na análise aprofundada de uma unidade específica — a Central de Tratamento de Resíduos (CTR) de Maceió — em seu contexto real. Além disso, trata-se de uma pesquisa de natureza aplicada, voltada à proposição de soluções para o aproveitamento energético dos resíduos de poda urbana, contribuindo para a resolução de um problema prático.

No que se refere à abordagem, a pesquisa apresenta caráter quantitativo, ao utilizar dados numéricos para estimativa do potencial energético, e qualitativo, ao interpretar as características da biomassa e o contexto operacional analisado (CRESWELL; CRESWELL, 2021). Por fim, possui objetivo descritivo-analítico, ao descrever o fenômeno estudado e analisar comparativamente as rotas de conversão energética (GIL, 2017).

Como limitação metodológica, ressalta-se a não incorporação de variáveis operacionais relevantes, como o fator de capacidade do sistema, as perdas térmicas efetivas, a sazonalidade na geração de resíduos e as variações no teor de umidade da biomassa. Tais fatores podem impactar diretamente o desempenho energético do sistema e, portanto, deverão ser considerados em estudos futuros, visando ao aprimoramento e maior precisão das análises.

3.1 Procedimentos de coleta e identificação das espécies

Para a caracterização da biomassa predominante na CTR, adotou-se o Princípio de Pareto como critério de priorização analítica, considerando que uma parcela reduzida dos fatores tende a responder pela maior parte dos efeitos observados, em linha com a noção dos “poucos vitais e muitos triviais” difundida por Juran (JURAN, 1951).

A aplicação desse critério metodológico permitiu priorizar as espécies arbóreas com maior representatividade volumétrica no fluxo de resíduos. A partir de observações diretas no pátio de recebimento e da triagem manual das cargas, verificou-se que cinco espécies arbóreas concentraram aproximadamente 80% do volume total de biomassa descartada, justificando sua seleção para análise energética. O material coletado foi constituído por subamostras obtidas em diferentes pontos do resíduo, conforme recomendações da ABNT NBR 10007:2004, sendo

posteriormente reunidas para formação de amostra composta representativa.

Em seguida, o material foi submetido à mistura e trituração em desfibrador, visando à padronização granulométrica e à homogeneização do material. Após a etapa de homogeneização, foram obtidas três amostras compostas independentes com 40mg cada, posteriormente encaminhadas às análises laboratoriais.

A quantidade de amostra empregada nas análises foi definida de acordo com as especificações operacionais dos equipamentos de termogravimetria e calorimetria, assegurando a confiabilidade e a representatividade dos resultados obtidos, em consonância com os protocolos laboratoriais estabelecidos.

Tabela 1 - Espécies da arborização urbana mais podada despejadas na Central de Tratamento de Resíduo de Maceió/2024

Nome científico	Nome comum
<i>Mangifera indica</i>	Mangueira
<i>Terminalia catappa</i>	Castanhola
<i>Cocos nucifera</i>	Coqueiro
<i>Clitoria fairchildiana</i>	Sombreiro
<i>Syzygium jambos</i>	Jambeiro

Fonte: ALURB, 2025.

Tabela 2 - Resíduos de poda (toneladas/mês)

Meses	Poda (toneladas)
jan/24	368,67
fev/24	411,7
mar/24	407,66
abr/24	419,48
mai/24	366,79
jun/24	393,43
jul/24	405,31
ago/24	421,93
set/24	363,54
out/24	455,44
nov/24	359,14
dez/24	396,91
Total	4770
Média/Mês	397,5

Fonte: ALURB, 2025.

3.2 Análise em laboratório

Para a caracterização da amostra de biomassa proveniente da poda urbana, foram realizadas duas análises físico-químicas: calorimetria e termogravimetria. Por meio da análise calorimétrica, foi determinado o conteúdo energético da biomassa por unidade de massa,

enquanto a análise termogravimétrica possibilitou a identificação das frações de umidade, materiais voláteis, carbono fixo e cinzas presentes na amostra.

A realização desses ensaios foi conduzida com a utilização dos equipamentos disponíveis no Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM) da Escola Politécnica de Pernambuco (POLI-UPE), incluindo a balança termogravimétrica apresentada na Figura 5 e o calorímetro digital apresentado na Figura 6.



Fonte: POLICOM, 2025.

Figura 5 - Balança termogravimétrica do POLICOM



Fonte: POLICOM, 2025.

Figura 6 - Calorímetro do POLICOM da POLI-UPE

3.3.1. Análise de Poder Calorífico

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de calor liberada pela sua combustão completa por unidade de massa (kcal/kg) ou volume (kcal/m^3) nas Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP).

O cálculo do Poder Calorífico Superior (PCS) e Poder Calorífico Inferior (PCI) fornecem dados quantitativos de quanto calor pode ser gerado pela biomassa a ser caracterizada. Para uma boa combustão, o combustível deve possuir baixos teores de umidade e cinzas, alto teores de carbono fixo e matéria volátil, além de alto PCS. Uma das técnicas para se calcular o PCS é através de análise elementar. A análise elementar apresenta parâmetros como teor de carbono (C), hidrogênio (H), nitrogênio (N), enxofre (S), oxigênio (O) e cinzas. Quanto maior o teor de C

e H, melhor será a combustão, enquanto altos teores de N e S poderão resultar em altos índices de emissões de NO_x e SO₂.

Segundo A. Jayapal et al. (2025), o PCS, também denominado Higher Heating Value (HHV), pode ser estimado a partir da composição elementar da biomassa pela seguinte equação:

$$HHV \text{ (MJ/kg)} = 33,87 C + 122,3 \left(\frac{O}{8} \right) + 9,4 S$$

onde C, H, O e S representam as frações mássicas de carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre da biomassa, respectivamente.

De acordo com L. J. R. Nunes et al. (2025), o poder calorífico inferior (PCI), ou *Lower Heating Value* (LHV), pode ser obtido a partir do PCS mediante correção da energia associada à vaporização da água formada na combustão do hidrogênio, conforme:

$$LHV \text{ (MJ/kg)} = HHV - 2,442 \cdot 9H$$

em que o termo 9H corresponde à quantidade de água formada na combustão do hidrogênio, e o termo 2,442 MJ/kg representa o calor latente de vaporização da água.

3.3.1.1. Análise Termogravimétrica (TGA)

A análise termogravimétrica (TGA) é uma técnica térmica onde a massa da amostra é registrada em função da temperatura ou do tempo. São freqüentemente usados três modos distintos em termogravimetria:

- Termogravimetria isotérmica, na qual a massa da amostra é registrada em função do tempo, a temperatura constante;
- Termogravimetria quase-isotérmica, na qual a amostra é aquecida até massa constante, numa série de patamares de temperatura;
- Termogravimetria dinâmica, onde a amostra é aquecida com um programa de temperatura pré-determinado, preferencialmente linear.

Utilizou-se nesse trabalho a termogravimetria dinâmica, com rampas de temperatura até 700° C. Seguem os parâmetros relacionados com a termogravimetria de biomassa.

3.3.1.2. Análise Termodiferencial (DTG)

A análise termogravimétrica diferencial (DTG) é uma técnica térmica em que a derivada da variação da massa da amostra com o tempo (dm/dt) é registrada em função do tempo (t) ou da temperatura (T). Pode ainda fazer-se o registro de dm/dT em função do tempo ou da temperatura.

Para este trabalho considerou-se a pirólise da biomassa, processo pelo qual a amostra é submetida a um aumento de temperatura linear sob atmosfera inerte (gás nitrogênico), sem combustão.

4. Resultados e Discussões

O primeiro resultado foi obtido a partir dos ensaios realizados no POLICOM, correspondendo ao poder calorífico superior (PCS), expresso em megajoules por quilograma (MJ/kg), das três amostras coletadas, cuja composição foi constituída pelas cinco espécies arbóreas identificadas como as mais recorrentes em termos de volume entre os resíduos de poda

urbana dispostos na CTR no ano de 2024, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Poder calorífico superior (PCS) das amostras de biomassa de poda urbana

Amostra de Biomassa	PCS (MJ/kg)
Amostra 1	17,819
Amostra 2	18,011
Amostra 3	17,725

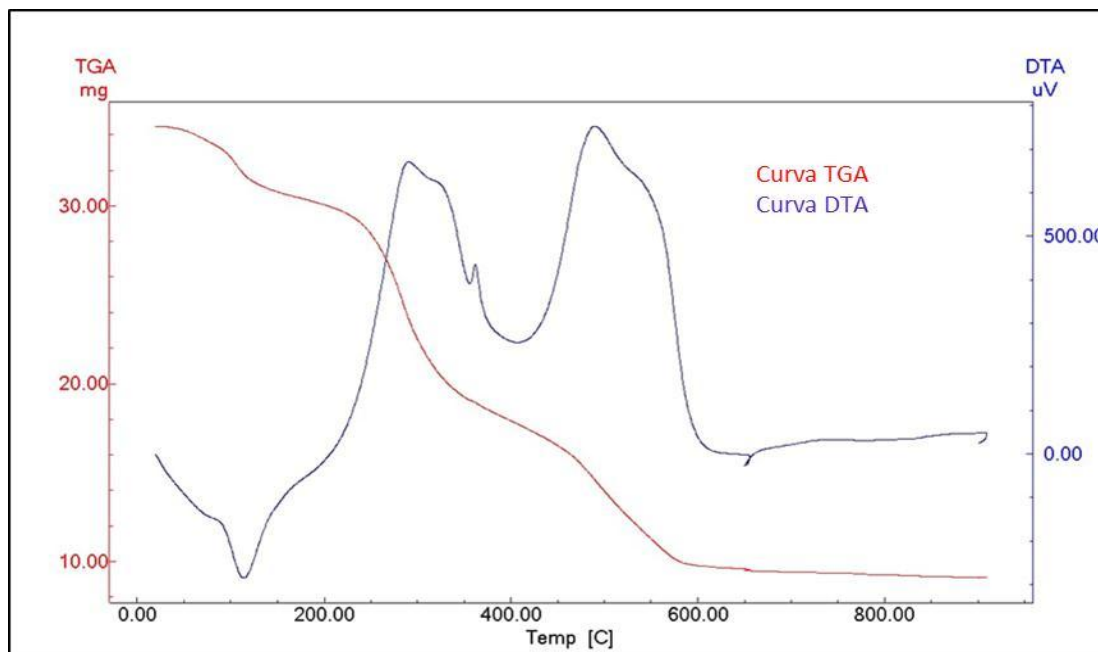
Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

A partir das amostras analisadas, foi obtida uma média aritmética do poder calorífico superior (PCS) de 17,85 MJ/kg.

No ensaio de análise calorimétrica, foi constatado comportamento energético semelhante entre as amostras, permitindo a utilização do valor médio do poder calorífico para o cálculo do potencial energético destinado à geração de energia elétrica. O valor médio obtido encontra-se dentro da faixa típica reportada na literatura para biomassa lignocelulósica, geralmente entre 15 e 20 MJ/kg, sendo igualmente compatível com valores observados para resíduos de poda urbana, que podem situar-se em torno de 19 MJ/kg ou variar entre 16,2 e 19,8 MJ/kg, a depender da composição e das características do material (CHEN et al., 2015; MAMVURA et al., 2020; VELÁZQUEZ-MARTÍ et al., 2018; DAHM; NEHLS, 2025).

Embora os valores obtidos para as três amostras analisadas apresentem elevada proximidade, recomenda-se a consideração de variações potenciais associadas à heterogeneidade intrínseca da biomassa lignocelulósica, particularmente no que diz respeito ao teor de umidade e à composição elementar, fatores que podem influenciar diretamente suas propriedades energéticas.

O segundo conjunto de resultados foi obtido a partir das análises termogravimétricas, nas quais foi verificada degradação térmica semelhante entre as amostras analisadas. Para fins de exemplificação dos resultados obtidos, o perfil termogravimétrico da Amostra 1 é apresentado na Figura 7.



Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

Figura 7 – Resultado gráfico de análise termogravimétrica da Amostra 1.

Já a análise elementar média da biomassa em estudo, conforme apresentada na Tabela 4, evidenciou os seguintes teores percentuais em base massa/massa: carbono (C) correspondente a 41,60%, hidrogênio (H) igual a 5,11%, nitrogênio (N) de 0,52% e enxofre (S) de 0,08%.

Tabela 4 – Resultados obtidos da Termogravimetria da Amostra 1

Elemento	Símbolo	Teor (% m/m)
Carbono	C	41,6
Hidrogênio	H	5,11
Nitrogênio	N	0,52
Enxofre	S	0,08
Oxigênio*	O	52,69
Total	—	100

* Oxigênio determinado por diferença.

Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

Observa-se que a concentração de hidrogênio contribui positivamente para o potencial energético do material, uma vez que esse elemento está diretamente associado ao poder calorífico da biomassa. O teor de carbono, correspondente a 41,60%, está diretamente associado ao potencial energético do material, indicando viabilidade para aplicações em processos de conversão termoquímica.

Os baixos teores de nitrogênio e enxofre são tecnicamente relevantes sob a perspectiva ambiental, pois indicam menor propensão à formação de óxidos de nitrogênio (NO_x) e dióxido de enxofre (SO₂) durante processos de combustão, o que contribui para a redução de impactos atmosféricos e da necessidade de sistemas adicionais de controle de emissões.

Dessa forma, os resultados obtidos sugerem que o resíduo analisado apresenta características adequadas para aproveitamento energético, especialmente em sistemas de combustão direta ou em processos de conversão termoquímica, como gaseificação e pirólise.

Tabela 5 – Cálculo do potencial energético para geração de energia elétrica (2024)

Parâmetro	Valor
Média da quantidade de poda urbana disposta no CTR (ton/mês)	397,5
Média da quantidade estimada de poda urbana (ton/mês)	318
(A) - Média da quantidade estimada de poda urbana (kg/s)	0,1226851852
Resultado da média aritmética do PCS das amostras analisadas (MJ/kg)	17,85
(B) - Resultado da média aritmética do PCS das amostras analisadas (J/kg)	17.850.000
(A) x (B) – Potencial térmico (kW)	2190

Fatores de conversão de unidades

1 ton = 1.000 kg

1 mês = 30 dias = 720 horas = 43.200 minutos = 2.592.000 segundos (s)

1 W = J/s

1 kW = 1000 W

Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

Para a conversão do potencial térmico calculado em potencial de geração elétrica, considerou-se o rendimento elétrico de cada tecnologia de transformação. No caso da gaseificação associada a grupo motor ciclo Otto–gerador e da combustão direta em ciclo Rankine, adotaram-se rendimentos elétricos de 36% e 28%, respectivamente, conforme reportado por Lora e Nascimento (2004). A aplicação desses rendimentos ao potencial térmico disponível resultou em uma potência elétrica estimada de 788 kW para o processo de gaseificação e 613 kW para a combustão direta.

Na sequência, para realizar o comparativo da quantidade de unidades residenciais que poderiam ser supridas pelo potencial energético estimado, utilizou-se o conceito de Consumo Residencial Médio (CRM). Segundo a EPE (2024), o CRM apresentou crescimento de 21% nos últimos 20 anos, evoluindo de 142 kWh/mês, em 2004, para 170 kWh/mês, em 2023 — o maior valor da série histórica.

Para fins de cálculo, adotou-se, portanto, o valor de 170 kWh/mês por unidade consumidora. A partir desse dado, determinou-se a carga média mensal por residência, dividindo-se o consumo mensal pelo número médio de horas de um mês (720 h), resultando em uma potência média equivalente a 0,24 kW por residência.

Conforme apresentado na Tabela 6, ao se dividir o potencial estimado de geração elétrica pela carga média residencial, obteve-se a capacidade de atendimento de aproximadamente 3.283 residências por meio do processo de gaseificação e 2.554 residências por meio da combustão direta.

Esses resultados permitem evidenciar, de forma objetiva e quantitativa, o ganho energético associado à implementação da solução de aproveitamento dos resíduos de poda urbana atualmente destinados ao CTR Maceió, demonstrando o maior desempenho energético do processo de gaseificação quando comparado à combustão direta.

Tabela 6 – Cálculo comparativo do potencial energético para geração de energia elétrica utilizando como fonte de energia os resíduos de poda dispostas no CTR em 2024

Parâmetro	Valor
(A) – Potencial de geração (kW) através do processo de gaseificação	788
(B) – Potencial de geração (kW) através do processo de combustão direta	613
(C) – Consumo estipulado de energia elétrica por residência durante o mês (kWh)	170
(D) – Carga mensal utilizada por residência (kW)	0,24
(A) / (D) – Quantidade de residências supridas com o potencial gerado na gaseificação (ud)	3.283
(B) / (D) – Quantidade de residências supridas com o potencial gerado na combustão direta (ud)	2.554

Fonte: Dados da pesquisa, 2025.

Para fins de estimativa, assumiu-se que a potência elétrica expressa em kW corresponde à potência média contínua disponível ao longo do período considerado, sendo o cálculo realizado para fins ilustrativos e sem a incorporação do fator de capacidade do sistema.

Os resultados indicam que a rota de gaseificação apresenta capacidade de atendimento de 28,5% superior à combustão direta, considerando-se o mesmo volume de biomassa disponível. Esse diferencial decorre, principalmente, da maior eficiência de conversão energética associada aos sistemas termoquímicos baseados em gaseificação, os quais permitem melhor aproveitamento do poder calorífico inferior (PCI) da biomassa e maior controle do processo oxidativo.

A diferença de 729 residências adicionais potencialmente atendidas pela rota de

gaseificação evidencia não apenas superioridade energética, mas também maior relevância socioeconômica da alternativa tecnológica, sobretudo quando inserida em políticas públicas municipais de valorização energética de resíduos sólidos urbanos.

Em termos estratégicos, os resultados reforçam que o aproveitamento energético da poda urbana destinada ao CTR Maceió pode representar uma solução ambientalmente adequada, energeticamente viável e socialmente relevante, contribuindo para a diversificação da matriz energética local e para a mitigação de impactos ambientais associados à disposição final de resíduos lignocelulósicos.

Destaca-se que as estimativas energéticas apresentadas consideram potência média contínua e não incorporam fatores de capacidade operacional, perdas térmicas reais ou variabilidade sazonal da geração de resíduos, aspectos que poderão ser aprofundados em estudos futuros.

Os resultados obtidos podem subsidiar a formulação e o aprimoramento de políticas públicas voltadas à valorização energética de resíduos urbanos, contribuindo para o desenvolvimento de estratégias locais de transição energética e promoção da sustentabilidade ambiental, em consonância com diretrizes internacionais de expansão das energias renováveis e uso eficiente de recursos (IRENA, 2023; IEA BIOENERGY, 2023).

6. Conclusões

1. Verificou-se que os resíduos de poda urbana atualmente destinados ao CTR encontram-se subutilizados, sendo acumulados no solo ou submetidos à queima, práticas que representam desperdício de potencial energético. Esses materiais apresentam características adequadas para valorização energética, podendo ser direcionados à geração de energia elétrica por rotas termoquímicas.
2. A conversão termoquímica dos resíduos de poda urbana viabiliza sua valorização energética, promovendo a transformação de um material anteriormente destinado à disposição final em insumo para geração de eletricidade. Essa estratégia amplia a participação de fontes renováveis na matriz elétrica local e fortalece práticas alinhadas aos princípios da sustentabilidade e da economia circular.
3. A implementação de sistemas de geração elétrica por meio de gaseificação ou combustão direta dos resíduos de poda pode proporcionar benefícios nas seguintes dimensões:
 - Econômica: redução significativa dos custos com energia elétrica, ainda que não haja eliminação total da fatura devido às tarifas de disponibilidade e encargos da distribuidora. Além disso, promove-se a agregação de valor a um resíduo atualmente desperdiçado.
 - Ambiental: mitigação de impactos decorrentes da disposição inadequada dos resíduos, evitando sua acumulação no solo ou a emissão descontrolada de gases poluentes provenientes da queima.
 - Social: geração de empregos diretos e indiretos associados à implantação, operação e manutenção das unidades de conversão energética.

Recomenda-se que estudos futuros incorporem uma análise técnico-econômica abrangente, incluindo os custos de investimento (*Capital Expenditure – CAPEX*) e os custos operacionais (*Operational Expenditure – OPEX*), bem como a avaliação da viabilidade. Adicionalmente, destaca-se a importância da modelagem energética sob condições operacionais reais, considerando a variabilidade da disponibilidade de resíduos no CTR Maceió, a fim de aumentar a acurácia e a robustez dos resultados.

Referências bibliográficas

- ABBAS, T.; ISSA, M.; ILINCA, A. Biomass cogeneration technologies: a review. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, v. 10, p. 1–15, 2020. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=97851>. Acesso em: 7 abr. 2026.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- BASU, Prabir. *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Burlington: Academic Press, 2010.
- BRASIL. Constituição (1988). Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF: Presidência da República, 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 18 mar. 2026.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 9 jan. 2026.
- BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, v. 38, p. 68–94, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0961953411000638>. Acesso em: 28 mar. 2026.
- CAMARGO, Bruno Silva; CAMARGO, Sâmique Kyene de Carvalho. Uma revisão sistemática da produção de pellets provenientes de resíduos agroflorestais para fins energéticos. *Revista Brasileira de Energia*, v. 25, n. 3, p. 71–82, 2019. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/issue/view/56/17>. Acesso em: 11 nov. 2024.
- CHEN, W.-H. et al. Thermochemical conversion of microalgal biomass into biofuels: A review. *Bioresource Technology*, v. 184, p. 314–327, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960852414016526>. Acesso em: 29 mar. 2026.
- CRESWELL, John W.; CRESWELL, J. David. *Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto*. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021.
- DAHM, Y. L.; NEHLS, T. Productive urban green façades – Biomass and bioenergy. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 112, p. 128951, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1618866725002857>. Acesso em: 7 abr. 2026.
- DEMIRBAS, Ayhan. *Biofuels: securing the planet's future energy needs*. London: Springer, 2009.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Anuário estatístico de energia elétrica: 20 anos. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes->

dados-abertos/publicacoes/PublishingImages/Paginas/Forms/Publicaes/Anuario20anos.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Balanço energético nacional 2025: ano base 2024. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADn_tese_2025_PT.pdf. Acesso em: 10 jan. 2026.

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

GONG, Chunxiao et al. The significance of biomass densification in biological-based biorefineries: A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 186, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123003775>. Acesso em: 28 mar. 2026.

IEA BIOENERGY. Annual Report 2023. [S. l.]: IEA Bioenergy, 2024. Disponível em: <https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/Annual-Report-2023.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2026.

IEA BIOENERGY TASK 33. Emerging gasification technologies for waste & biomass. [S. l.]: IEA Bioenergy, 2020. Disponível em: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2021/02/Emerging-Gasification-Technologies_final.pdf. Acesso em: 28 mar. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). COP28: tripling renewable capacity by 2030. Paris: IEA, 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/cop28-tripling-renewable-capacity-pledge-2025-update>. Acesso em: 29 mar. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). Renewable energy statistics 2023. Abu Dhabi: IRENA, 2023. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jul/Renewable-energy-statistics-2023>. Acesso em: 26 mar. 2026.

JAYAPAL, A. et al. Modeling the higher heating value of Spanish biomass via neural networks and analytical equations. *Energies*, v. 18, n. 15, p. 4067, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/15/4067>. Acesso em: 20 mar. 2026.

JURAN, J. M. *Quality control handbook*. New York: McGraw-Hill, 1951.

KALTSCHMITT, Martin; HARTMANN, Hans; HOFBAUER, Hermann. *Energy from biomass: fundamentals, techniques and environmental effects*. Berlin: Springer, 2016.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. *Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação*. v. 2. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

MAMVURA, T. A.; DANHA, G.; MUSYOKA, N. Biomass torrefaction as an emerging technology to aid in energy production. *Heliyon*, v. 6, n. 3, e03531, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844020303765>. Acesso em: 25 mar. 2026.

NUNES, L. J. R. et al. Gasification processes of Portuguese biomass: theoretical analysis of hydrogen production potential. *Energies*, v. 18, n. 16, p. 4453, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/16/4453>. Acesso em: 28 mar. 2026.

ROLIM, Fernanda Dantas; CARVALHO, Gabriel Lincoln Lopes; SILVEIRA, José Augusto Ribeiro da. Arborização urbana: a importância do seu planejamento diante do contexto atual do processo de expansão urbana territorial. *Revista Latino-Americana de Ambiente Construído & Sustentabilidade*, v. 4, n. 13, p. 67–82, 2023. Disponível em: <https://publicacoes.amigosda natureza.org.br/index.php/anap/article/view/3806>. Acesso em: 10 jan. 2026.

ROMAN, Kamil et al. Biomass briquetting technology for sustainable energy production from forest residues: A review. *Energies*, v. 17, n. 24, p. 6392, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/24/6392>. Acesso em: 20 fev. 2026.

RUIZ, J. A. et al. Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 18, p. 174–183, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032112005631>. Acesso em: 9 jan. 2026.

SILVA, Mateus et al. Análise do babaçu como fonte de biomassa para produção de briquetes na região Meio Norte do Brasil. *Revista Foco*, v. 17, p. 1–17, 2024. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/5279>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SOUZA, Caroline Almeida; VELASCO, Giuliana Del Nero (org.). *Resíduo de poda de árvores urbanas: como reaproveitar?* São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), 2022. Disponível em: <https://ipt.br/wp-content/uploads/2024/08/Residuo-de-poda.pdf>. Acesso em: 7 jan. 2026.

TREJO, F. et al. Review of biomass gasification technologies with a particular focus on a downdraft gasifier. *Processes*, v. 13, n. 9, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/search?q=Review+of+biomass+gasification+technologies+with+a+particular+focus+on+a+down+draft+gasifier>. Acesso em: 10 fev. 2026.

VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. et al. Complete characterization of pruning waste from the lechero tree (*Euphorbia laurifolia* L.) as raw material for biofuel. *Renewable Energy*, v. 129, p. 629–637, 2018. Disponível em: <https://riunet.upv.es/items/abcce277-6096-4ca0-9d18-45015b37dccc>. Acesso em: 8 mar. 2026.

YIN, Robert K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.