

THIAGO CARDOSO SILVA

**USO DA BIOMASSA DE PODA URBANA DA CIDADE DO RECIFE-PE PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA**

**RECIFE
Pernambuco - Brasil
Dezembro - 2018**

THIAGO CARDOSO SILVA

**USO DA BIOMASSA DE PODA URBANA DA CIDADE DO RECIFE-PE PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito para aquisição do título de Mestre em Ciências Florestais. Área de concentração: Ecologia e Conservação de Ecossistemas Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Leite Braz

**RECIFE
Pernambuco - Brasil
Dezembro – 2018**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S586u Silva, Thiago Cardoso.
 Uso da biomassa de poda urbana da cidade do Recife-PE para
Geração de energia / Thiago Cardoso Silva. – Recife, 2019.
 110 f.: il.

 Orientador(a): Rafael Leite Braz.

 Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de
Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais,
Recife, BR-PE, 2019.

 Inclui referências e apêndice(s).

 1. Energia da biomassa 2. Energia calorífica 3. Biogás
4. Fertilizantes orgânicos I. Braz, Rafael Leite, orient. II. Título

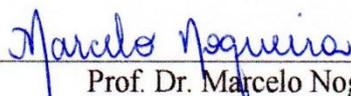
CDD 634.9

THIAGO CARDOSO SILVA

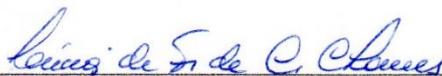
**USO DA BIOMASSA DE PODA URBANA DA CIDADE DO RECIFE-PE PARA
GERAÇÃO DE ENERGIA**

APROVADA em 18/02/2019.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Marcelo Nogueira
Departamento de Ciência Florestal/UFRPE



Profa. Dra. Lúcia de Fatima de Carvalho Chaves
Departamento de Ciência Florestal/UFRPE

Orientador:



Prof. Dr. Rafael Leite Braz
Departamento de Ciência Florestal/UFRPE

Dedico mais esta etapa da minha vida à minha família e amigos, pois sem eles a caminhada até aqui não seria a mesma;
Dedico também à Chester Charles Bennington (*in memoriam*), uma inspiração.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, responsável por tudo, pelas bênçãos proferidas todos os dias e por proporcionar mais uma etapa concluída em minha vida. Sem ti Senhor eu nada seria.

Aos meus pais, José Ferreira da Silva Neto e Claudete Cardoso dos Anjos Silva, e ao meu irmão Felipe Cardoso Silva e cunhada Karina Nascimento, aos meus tios Celina Cardoso, Cláudio Cardoso e Gilson Alves; à Gislayne Luna (Mocinha), Ivson Rodrigues (Ivinho) e Camylle Luna; porque minha família é tudo pra mim. Obrigado pelo apoio em todos os momentos!

Ao meu orientador, Professor Rafael Leite Braz, por acreditar nesta pesquisa, pela confiança no meu trabalho e dedicação no meu desenvolvimento e aprendizado científico e profissional.

Aos colegas de PPGCF, Adão Batista, Josias Divino, Djailson Júnior e César Borges, que estiveram presentes nessa jornada; à Emmanoella Guaraná agradeço pela companhia e parceria durante mais esta etapa, pela amizade, apoio nos estudos e confiança nos trabalhos do passado, presente e futuro.

Às amigas Tarcila Lins e Cibelle Reis, que deram todo apoio da UFPR para a execução da pesquisa.

Ao Laboratório de Tecnologia Florestal do DCFL, em nome de Tony Cantarelli, Igor Bitu, Sarah Fraga e Pedro Interaminense, pela estrutura, companhia e acompanhamento durante o processo analítico da pesquisa.

Ao Laboratório de Microbiologia do DEQ/UFPE, em nome de Conceição Andrade, Gisely Alves e Prof^a Maria de Los Angeles, por toda ajuda material e espaço físico que colocaram à disposição para elaboração dessa pesquisa. Meus sinceros agradecimentos!

À EMLURB/PCR, pela disponibilidade e por conceder o material necessário para realização da pesquisa.

À Universidade Federal de Pernambuco, em especial os professores que lhes representam, pela ajuda material e auxílio no desenvolvimento desta pesquisa encontrados em nos laboratórios do CTG e DEQ.

À CAPES pela concessão da bolsa de pesquisa que deu suporte a todas as etapas de elaboração do estudo.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco pela oportunidade de crescimento profissional.

Aos professores do DCFL com quem tive a oportunidade de desenvolver amizade e absorver seus conhecimentos. Serei sempre grato!

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais por conceder a oportunidade de realização do curso de pós-graduação e consecução do título de Mestre em Ciências Florestais. À Juliana, por toda a ajuda durante todo o curso. Muito obrigado!

À todos que, de forma geral, contribuíram para a conclusão dessa etapa.

“Querer é começar a fazer. Anelando e imaginando, libertamos de nós mesmos a energia indispensável à materialização de nossas criações interiores.”

Ismael Souto
(Chico Xavier, *Dicionário da Alma*)

SILVA, THIAGO CARDOSO. **Uso da biomassa de poda urbana da cidade do Recife-PE para geração de energia**. 2019. Orientador: Rafael Leite Braz.

RESUMO GERAL

Os resíduos sólidos acumulados em aterros ao interagirem química e biologicamente com o material orgânico proveniente de poda produzem efeitos de reator bioquímico e geram impactos à qualidade do solo, água e ar. A Prefeitura do Recife, em Pernambuco, iniciou em 2006 o processo de reutilização da poda como compostagem por biodigestão aeróbia, com produção de composto com altos teores nutricionais, porém sem aproveitamento dos gases produzidos dos processos de biodegradação. Diante desse cenário, o reuso de materiais sólidos orgânicos mostra-se como alternativa rápida, barata e geradora de recursos para redução da quantidade de lixo acumulado. Portanto, o objetivo desta pesquisa foi caracterizar os resíduos de poda urbana da cidade do Recife, visando a produção de energia por meio da digestão (aeróbia e anaeróbia) do material para produção de biogás e análise do potencial do uso da biomassa para produção de energia calorífica, avaliando a viabilidade econômica destas atividades. O material utilizado no desenvolvimento da pesquisa foi a biomassa proveniente da poda urbana realizada na cidade de Recife pela EMLURB/PCR. No Capítulo 1, intitulado “Caracterização da biomassa de poda do Recife-PE para geração de energia calorífica”, foram realizadas avaliações das propriedades físico-químicas e análises químicas (elementar, estrutural e imediata) da biomassa de poda, a fim de correlacionar tais características com o potencial energético, além de se analisar as propriedades do carvão vegetal produzido por esse material. No Capítulo 2, intitulado “Produção de biogás utilizando biomassa de poda e lodo de esgoto”, buscou-se uma alternativa para geração de energia renovável com a biomassa de poda, visto que o material é utilizado pelo município para produção de composto orgânico para uso nas áreas verdes, e os subprodutos da biodigestão anaeróbia são o biogás e o biofertilizante; para isso, foram avaliadas diferentes concentrações da composição entre poda e lodo de esgoto a fim de determinar qual apresenta melhor eficiência para produção de metano, além de realizar análise nutricional para comparação dos fertilizantes obtidos pelas digestões aeróbia e anaeróbia. Diante das duas formas de obter energia a partir da conversão da biomassa de poda da cidade do Recife avaliadas neste trabalho, a conversão do material em carvão vegetal e seu uso é a atividade mais indicada para geração de energia, visto que apresentou produção em kWh quase 350 vezes maior que os avaliados para a produção de biogás, contribuindo anualmente com cerca de 21,9% da iluminação pública da cidade. Como características, apresenta alto teor de umidade, necessitando de uma secagem prévia para geração de energia, poder calorífico suficiente para produção de energia calorífica e conversão em energia elétrica, alto teor de cinzas, satisfatórios teores de lignina e extrativos e baixo teor de carbono; e carvão vegetal com baixo teor de voláteis, alto teor de cinzas e rendimento gravimétrico satisfatório para a conversão. O biogás gerado pela biomassa de poda e lodo de esgoto apresentou baixo teor de metano, sendo esta atividade economicamente inviável para as composições e condições avaliadas neste trabalho, não sendo eficientes para produção de fertilizantes. A biomassa de poda urbana da cidade do Recife pode ser utilizada para produção de energia a partir da sua conversão em carvão vegetal para geração energia elétrica.

Palavras-chave: energia de biomassa; energia calorífica; biogás; fertilizantes orgânicos

SILVA, THIAGO CARDOSO. Use of the urban pruning biomass of the city of Recife-PE for energy generation. 2019. Advisor: Rafael Leite Braz.

GENERAL ABSTRACT

The solid residues accumulated in landfills when interacting chemically and biologically with the organic material from pruning produce effects of biochemical reactor and generate impacts to soil, water and air quality. The City Hall of Recife, in Pernambuco, initiated in 2006 the process of reuse of pruning as composting by aerobic biodigestion, with production of compound with high nutritional contents, but without taking advantage of the gases produced from the biodegradation processes. Given this scenario, the reuse of organic solid materials is shown as a fast, cheap and resource-efficient alternative to reduce the amount of accumulated waste. Therefore, the objective of this research was to characterize urban pruning waste from the city of Recife, aiming at the production of energy by means of digestion (aerobic and anaerobic) of the material for biogas production and analysis of the potential of the use of biomass for heat energy production assessing the economic viability of these activities. The material used in the development of the research was the biomass from urban pruning carried out in the city of Recife by EMLURB/PCR. In Chapter 1, titled "Characterization of the pruning biomass of Recife-PE for heat energy generation", evaluations of physical-chemical properties and chemical analyzes (elemental, structural and immediate) of the pruning biomass were carried out in order to correlate these characteristics with the energy potential, in addition to analyzing the properties of the charcoal produced by this material.. In Chapter 2, titled "Biogas production using pruning biomass and sewage sludge", an alternative was sought for renewable energy generation with pruning biomass, since the material is used by the municipality for the production of organic compost for use in the green areas, and the by-products of anaerobic biodigestion are biogas and biofertilizer; for this, different concentrations of the composition between pruning and sewage sludge were evaluated in order to determine which one presents better efficiency for methane production, besides performing nutritional analysis to compare the fertilizers obtained by aerobic and anaerobic digestion. In the face of the two ways of obtaining energy from the conversion of the pruning biomass of the city of Recife evaluated in this work, the conversion of the material into charcoal and its use is the activity more indicated for generation of energy, since it presented production in kWh almost 350 times greater than for the production of biogas, contributing annually with about 21.9% of the street lighting of the city. As characteristics, it presents high moisture content, requiring a previous drying for energy generation, sufficient calorific power for the production of heat energy and conversion to electric energy, high ash content, satisfactory lignin and extractive contents and low carbon content; and charcoal with low volatiles, high ash content and satisfactory gravimetric yield for conversion. The biogas generated by the biomass of pruning and sewage sludge presented low methane content, being this activity economically unfeasible for the compositions and conditions evaluated in this work, being not efficient for the production of fertilizers. The urban pruning biomass of the city of Recife can be used to produce energy from its conversion into charcoal for electric power generation.

Keywords: biomass energy; heat energy; biogás; organic fertilizers

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	16
2. HIPÓTESES DA PESQUISA	18
3. REVISÃO DE LITERATURA	19
3.1. Biomassa Florestal	19
3.1.1. Energia de biomassa florestal	20
3.1.2. Características físicas da biomassa florestal	21
3.1.2.1. Umidade	21
3.1.2.2. Densidade	21
3.1.2.3. Poder calorífico	22
3.1.3. Características químicas da biomassa florestal	23
3.1.4. Processo de carbonização da biomassa florestal	24
3.1.5. Biomassa de poda no Recife-PE	25
3.2. Biodigestão da matéria orgânica	26
3.2.1. Biodigestão aeróbia	26
3.2.1.1. Processo de compostagem da EMLURB/PCR	27
3.2.2. Biodigestão anaeróbia	28
3.2.2.1. Biogás	30
3.2.2.2. Biofertilizante	30
CAPÍTULO 1 - CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA DE PODA DO RECIFE/PE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA CALORÍFICA	35
RESUMO	36
ABSTRACT	37
1. INTRODUÇÃO	38
2. MATERIAL E MÉTODOS	40
2.1. Coleta da biomassa de poda	40
2.2. Propriedades físicas da biomassa de poda	41
2.2.1. Teor de umidade	42
2.2.2. Densidade à granel	42
2.2.3. Poder calorífico	43
2.3. Análise do carvão vegetal de biomassa de poda	44
2.3.1. Carbonização	45
2.3.2. Rendimento gravimétrico da carbonização	45
2.3.3. Teor de umidade do carvão vegetal	46
2.3.4. Análise imediata do carvão vegetal	46

2.3.5. Poder calorífico superior do carvão vegetal	48
2.4. Análises químicas da biomassa de poda	48
2.4.1. Preparo da amostra pré-seca.....	48
2.4.2. Determinação da composição química estrutural.....	49
2.4.2.1. Teor de cinzas.....	49
2.4.2.2. Teor de extrativos	50
2.4.2.3. Teor de holocelulose e lignina.....	51
2.4.3. Análise química imediata da biomassa de poda.....	54
2.4.4. Análises elementar e nutricional	54
2.4.4.1. Teor de carbono	54
2.4.4.2. Teor de nitrogênio	55
2.4.4.3. Digestão para análise de minerais	57
2.4.4.4. Teor de fósforo	57
2.4.4.5. Teor de potássio, cálcio e sódio.....	58
2.4.4.6. Teor de enxofre.....	59
2.4.4.7. Teor de oxigênio.....	60
2.5. Análises estatísticas	60
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
3.1. Propriedades físicas da biomassa de poda.....	61
3.2. Análise imediata da biomassa de poda	64
3.2.1. Biomassa <i>in natura</i>	64
3.2.2. Carvão vegetal produzido com a biomassa de poda urbana.....	67
3.3. Química estrutural da biomassa de poda	70
3.4. Química elementar da biomassa de poda	72
4. CONCLUSÃO.....	75
REFERÊNCIAS	76
CAPÍTULO 2 - PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO BIOMASSA DE PODA E LODO DE ESGOTO	81
RESUMO.....	82
ABSTRACT	83
1. INTRODUÇÃO	84
2. MATERIAL E MÉTODOS	86
2.1. Inoculação dos substratos para digestão anaeróbia	86
2.2. Caracterização do biogás	88
2.3. Caracterização química dos biofertilizantes	89

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
3.1. Produção de metano	91
3.2. Caracterização química dos biofertilizantes	94
4. CONCLUSÃO	97
REFERÊNCIAS	98
CONCLUSÕES GERAIS	100
APÊNDICES	101

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 01	Matriz energética brasileira em 2017..... 19
Figura 02	Leiras formadas por restolhos de poda triturados na Estação de Tratamento do Curado. A) Biomassa de poda no processo de compostagem; e B) Composto orgânico finalizado..... 27
Figura 03	Fluxograma do processo de biodigestão anaeróbia da matéria orgânica..... 29
Figura 04	Mapa da cidade do Recife destacando as Regiões Político-Administrativas (RPAs)..... 40
Figura 05	Biomassa de poda <i>in natura</i> triturada proveniente da arborização urbana da cidade do Recife, Pernambuco..... 41
Figura 06	Determinação da densidade à granel em proveta da biomassa de poda urbana do Recife, Pernambuco..... 42
Figura 07	Calorímetro utilizado para determinação do poder calorífico superior da biomassa de poda urbana do Recife, Pernambuco..... 43
Figura 08	Carvão macerado para análise imediata. A) Partículas de carvão macerado retidas em peneira de 60 mesh; B) partículas de carvão que passaram na peneira de 60 mesh e ficaram retidas em peneira de 100 mesh..... 45
Figura 09	Pré-aquecimento do conjunto cadinho+tampa para determinação do teor de materiais voláteis..... 47
Figura 10	Preparo de amostra pré-seca da biomassa de poda urbana do Recife, Pernambuco. A) biomassa de poda pré-seca; B) secagem em estufa; e C) material moído..... 49
Figura 11	Etapas das carbonização e calcinação da biomassa de poda <i>in natura</i> para a determinação do teor de cinza. A) Amostra de biomassa de poda <i>in natura</i> ; B) Amostra carbonizada; C) Amostra calcinada..... 50
Figura 12	Esquema de extração por sistema de Soxhlet..... 51
Figura 13	Amostra de biomassa de poda urbana para avaliação dos teores de extrativos. A) Amostra em extração; B) Extrativos após o processo..... 51
Figura 14	Processo de deslignificação da biomassa de poda urbana para determinação dos teores de holocelulose A) Amostra acondicionada em banho-maria para determinação de holocelulose; B) Amostra após o processo de deslignificação da biomassa..... 52
Figura 15	Resíduo de holocelulose com adição de KOH antes (à esquerda) e após (à direita) o aquecimento, para determinação do teor de celulose na biomassa de poda..... 53
Figura 16	Digestão das amostras para oxidação da matéria orgânica e análise de carbono orgânico na biomassa de poda..... 55

Figura 17	Amostra para determinação do teor de carbono orgânico na biomassa de poda antes da titulação em coloração púrpura (à esquerda) e após a titulação em coloração verde (à direita).....	55
Figura 18	Sistema de destilação de Kjeldahl para determinação do teor de nitrogênio total na biomassa de poda.....	56
Figura 19	Amostra com presença de nitrogênio em coloração verde (à esquerda) e ausência de nitrogênio em coloração azulada (à direita).....	56
Figura 20	Curva padrão de fósforo construída a partir da relação entre diferentes concentrações do elemento e sua absorvância.....	58
Figura 21	Análise de potássio, cálcio e magnésio em fotômetro de chama, nas amostras digeridas de biomassa de poda.....	58
Figura 22	Curva padrão de enxofre construída a partir da relação entre diferentes concentrações do elemento e sua absorvância.....	59
Figura 23	Valores médios da análise química imediata da biomassa de poda urbana <i>in natura</i> da arborização urbana do Recife, Pernambuco.....	64
Figura 24	Etapa pós-corte da poda realizada em Recife/PE. A) Biomassa de poda após corte aguardando no solo para posterior trituração; B) Trituração da biomassa de poda.....	65
Figura 25	Valores médios da análise química imediata do carvão vegetal de biomassa de poda da arborização urbana do Recife, Pernambuco.....	68
Figura 26	Composição química estrutural da biomassa de poda da arborização urbana do Recife, Pernambuco.....	71
Figura 27	Composição química elementar da biomassa de poda da arborização urbana do Recife, Pernambuco.....	73
Figura 28	Biodigestores utilizados para produção de biogás a partir de biomassa de poda urbana e lodo de esgoto.....	87
Figura 29	Biodigestor devidamente lacrado em simulação das condições de campo.....	88
Figura 30	Cromatógrafo gasoso utilizado para caracterização do biogás produzido pela biodigestão anaeróbia de biomassa de poda urbana inoculada com lodo de esgoto.....	89
Figura 31	Biofertilizantes obtidos pela digestão da biomassa de poda urbana após o processo de secagem para análises químicas. A) Obtido pelo processo de compostagem; B) Obtido pela biodigestão anaeróbia.....	90
Figura 32	Produção de metano, em cm ³ , em função das diferentes composições e dias de digestão de substrato composto por biomassa de poda urbana e lodo de esgoto.....	93

LISTA DE TABELAS

	Pág.	
Tabela 01	Composição média das características químicas elementar, estrutural e imediata da biomassa florestal de espécies folhosas.....	23
Tabela 02	Valores médios dos teores de umidade (%), densidade à granel (g.cm^{-3}) e poder calorífico (kcal.kg^{-1}) da biomassa de poda urbana de Recife/PE, em função das Regiões Político-Administrativas (RPA).....	61
Tabela 03	Valores médios da análise química imediata em relação aos dos teores cinzas (%Cz), materiais voláteis (%MV) e carbono fixo (%CF) da biomassa de poda urbana de Recife/PE, em função das Regiões Político-Administrativas (RPA).....	64
Tabela 04	Valores médios da análise química imediata do carvão da biomassa de poda urbana de Recife/PE, em função das Regiões Político-Administrativas (RPA).....	67
Tabela 05	Composição química estrutural da biomassa de poda urbana de Recife/PE, em função das Regiões Político-Administrativas (RPA).....	70
Tabela 06	Composição química elementar da biomassa de poda urbana de Recife/PE, em função das Regiões Político-Administrativas (RPA).....	72
Tabela 07	Composição percentual e massa total inoculada nos biodigestores.....	87
Tabela 08	Calibragem do pH dos biodigestores.....	87
Tabela 09	Metodologias utilizadas na caracterização química dos biofertilizantes.....	90
Tabela 10	Médias do volume total de metano (cm^3) produzido por cada tratamento após 60 dias de biodigestão.....	91
Tabela 11	Correlação entre os volumes de metano e a energia elétrica a ser produzida a partir da biodigestão da biomassa de poda.....	93
Tabela 12	Composição química das matérias primas utilizadas na produção dos fertilizantes.....	94
Tabela 13	Avaliação nutricional dos fertilizantes produzidos nos processos de compostagem e biodigestão anaeróbia da biomassa de poda do Recife, Pernambuco	95

1. INTRODUÇÃO GERAL

A crescente geração de lixo torna a capacidade dos aterros sanitários em comportá-lo cada vez mais limitada. Atualmente, ainda há em muitos municípios brasileiros grande quantidade de descarte de materiais que apresentam potencial de reciclagem ou composição favorável ao reuso como fontes de matéria-prima, sem contar os investimentos públicos utilizados para o processamento e destinação destes rejeitos, que poderiam ser minimizados. Tal fato vem se transformando em grandes problemas para a sociedade e para os gestores públicos.

Dentre a composição do resíduo sólido urbano, encontram-se os recicláveis e reutilizáveis (plástico, papel, metal, vidro, dentre outros), restos de alimentos e rejeitos úmidos, material proveniente de construção e resíduos de poda, sendo este último, inserido na biomassa florestal, de forma geral, caracterizado como a alternativa mais promissora para geração de energia proveniente de fontes renováveis (LOPES; BRITO; MOURA, 2016).

O Recife, no estado de Pernambuco, é uma das capitais brasileiras com a maior quantidade de áreas verdes na zona urbana, chegando a aparecer no ranking das vinte cidades mais verdes do mundo, pelo *World Travel Guide* (BOLDRINI, 2015). Por isso, a poda urbana é uma das principais geradoras de resíduos sólidos da cidade, sendo as normas e técnicas a serem adotadas na prática regulamentadas pela lei nº 17.666/2010 (RECIFE, 2010), proibindo-se o destino inadequado desses resíduos, apesar de não definir qual seria a destinação correta deste material.

Quando destinados aos aterros, os resíduos acumulados interagem química e biologicamente com o material orgânico proveniente de poda, produzindo efeitos de reator bioquímico que geram impactos à qualidade do solo, água e ar.

Espera-se que, em grandes cidades, como Recife, por exemplo, o gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos, em especial os provenientes da poda, ocorra de forma que haja a correlação entre a redução desses recursos em locais inadequados para descarte e a geração de recursos energéticos e financeiros, que provêm de material descartado, otimizando os processos de reciclagem e reuso do lixo urbano.

Fátima (2006) estimou que cerca de 3.000 toneladas de resíduos provenientes de poda são descartados em aterro sanitário na cidade do Recife, sendo aproveitados apenas 13% desse material para produção de energia, e o restante sendo destinado a aterros e até queimados como forma de redução de entulhos, o que leva ao aumento dos teores de CO₂ que contribuem com o efeito estufa e outras complicações ambientais. Por isso, ainda segundo a autora, o município

iniciou em 2006 o processo de reutilização da poda através da compostagem por biodigestão aeróbia, com produção de composto com altos valores nutricionais a ser utilizado na arborização urbana da cidade, porém sem aproveitamento dos gases produzidos dos processos de biodegradação.

Diante disso, seria interessante o aproveitamento de outras fontes de matérias-primas para biodigestão e obtenção do biogás, como no caso dos resíduos gerados pelas podas urbanas. Outra alternativa para evitar o acúmulo desse material em aterros sanitários seria sua utilização como fonte de energia calorífica. A biomassa de origem florestal nas formas de lenha ou carvão vegetal gera grande parte do quadro energético brasileiro (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013). Assim, os resíduos de poda urbana podem trilhar os mesmos caminhos, objetivando utilização como fonte combustível para geração de energia na forma de calor de acordo com as características provenientes da composição lenhosa das árvores.

Diante desse cenário, o reuso de materiais sólidos orgânicos que são destinados a aterros, como os resíduos de poda urbana da cidade do Recife, mostra-se como alternativa rápida, barata e geradora de recursos para redução da quantidade de lixo acumulado nos centros urbanos.

Neste contexto, o objetivo geral deste estudo foi caracterizar os resíduos de poda urbana da cidade do Recife, visando a produção de energia por meio da digestão (aeróbia e anaeróbia) do material para produção de biogás e análise da viabilidade do uso da biomassa para produção de energia calorífica, avaliando alguns aspectos econômicos destas atividades. Os objetivos específicos foram: avaliar se a obtenção da biomassa de poda em diferentes áreas interferem nas características desse material; caracterizar física e quimicamente a biomassa de resíduos de poda visando a produção de energia calorífica, estimando a produção total de energia proveniente desta biomassa; analisar, quantificar e caracterizar os gases formados a partir da digestão anaeróbia, estimando a produção de metano; comparar as características nutricionais dos compostos formados pelas digestões aeróbia e anaeróbia; e avaliar alguns aspectos econômicos destas atividades de geração de energia.

2. HIPÓTESES DA PESQUISA

O trabalho foi estruturado em dois capítulos: Capítulo 1 – Caracterização da biomassa de poda do Recife/PE para geração de energia calorífica; Capítulo 2 – Produção de biogás utilizando biomassa de poda e lodo de esgoto; cujas hipóteses são:

CAPÍTULO 1

A biomassa de poda urbana apresenta características energéticas, físicas e químicas com potencial para geração de energia calorífica e conversão em energia elétrica.

CAPÍTULO 2

A partir da biodigestão da biomassa de poda é possível produzir biogás com teores de metano suficientes para cogeração de energia elétrica.

De acordo com o processo de degradação, os fertilizantes obtidos pelo processo de compostagem e pela biodigestão anaeróbia devem apresentar diferença entre os teores nutricionais e a relação C/N.

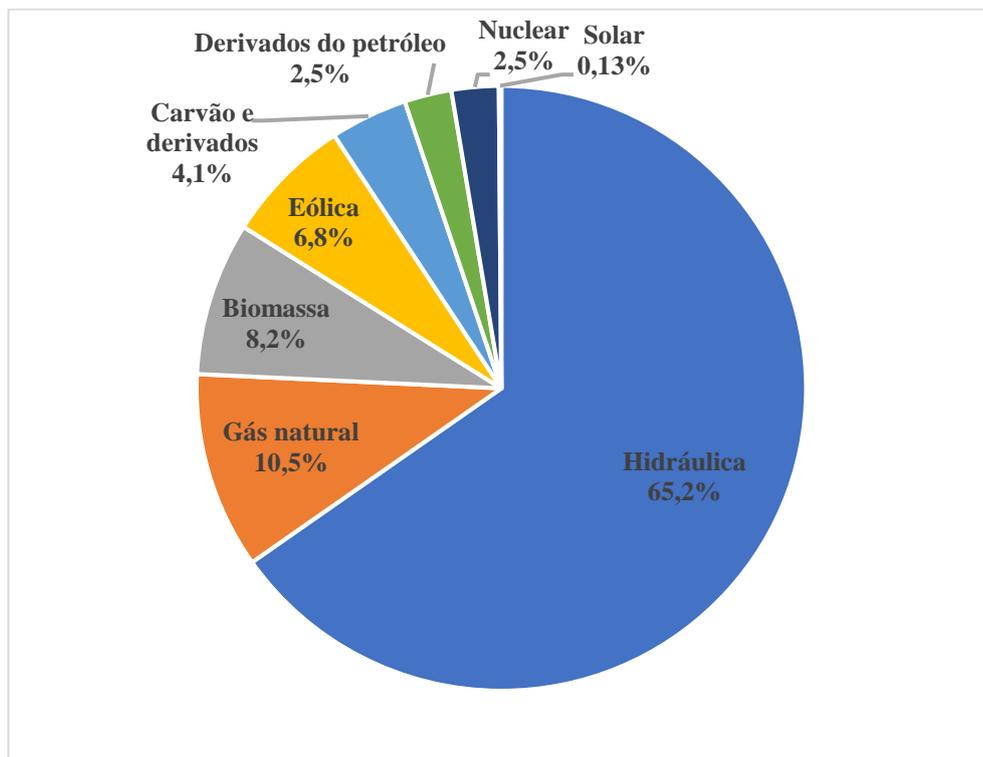
3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Biomassa Florestal

A biomassa é definida como todo material de origem orgânica (vegetal ou animal) proveniente de atividades agrícolas, silvícolas, pesca e suas atividades agroindustriais, que resulte de forma direta ou indireta do processo de fotossíntese, logo, como armazenamento de energia que pode ser convertida em energias calorífica e elétrica e em combustíveis nos estados líquidos e gasosos através dos processos termoquímicos ou biológicos (ANDRADE; LORA, 2013).

No Brasil, o uso da biomassa para geração de energia se iniciou no século passado a partir da implementação do programa de produção de etanol e a prática de reflorestamentos para produção de madeira (GOLDEMBERG; PALETTA, 2012). Desde então, a biomassa vem contribuindo como fonte renovável na matriz energética brasileira, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2018). Atualmente, a biomassa constitui cerca de 8,2% da energia gerada, ficando atrás apenas da energia hidráulica e do gás natural, que contribuem com 65,2% e 10,5%, respectivamente (Figura 01).

Figura 01: Matriz energética brasileira em 2017.



Fonte: BEN (2018).

Segundo Brand (2010), a biomassa de origem florestal se caracteriza como todo material orgânico: produzido por sistemas florestais nativos ou implantados; derivado da manufatura dos produtos na indústria de base florestal; e resíduos sólidos urbanos, provenientes do uso ou manejo dos produtos florestais urbanos. Assim, em geral, a biomassa florestal é composta por material lenhoso (lenho de fustes, galhos, cascas e raízes), folhas, flores e inflorescências, frutos, serapilheira, extrativos e os resíduos dos setores de base florestal, que apresentam forma e tamanho variados, assim podendo estar nas formas sólidas ou líquidas.

De certa forma, a atividade florestal desenvolvida na indústria madeireira em todo o Brasil é altamente geradora de resíduos, assim como o uso da madeira no meio urbano, descarte de embalagens e produtos lignocelulósicos, além de poda da arborização urbana, que acarretam em um volume expressivo de resíduos nos centros urbanos (TORRES *et al.*, 2014), mas que podem ser aproveitados tanto na forma de composto orgânico, como para produção de energia de diversas formas.

A utilização da biomassa florestal é variada, pois este material possui potencial para produção de energia pela queima direta, pela produção de carvão vegetal, aproveitamento dos resíduos dos setores de base florestal, óleos essenciais, dentre outros fins não energéticos (SOARES *et al.*, 2006).

3.1.1. Energia de biomassa florestal

A biomassa pode ser utilizada de diversas formas, tanto diretamente quanto pela conversão em outros materiais, sendo a forma mais simples de utilização a combustão direta para geração de energia calorífera (TRUGILHO, 2009).

Com isso, no Brasil está consolidado o uso da biomassa para gerar eletricidade em termoelétricas pelos ciclos a vapor em pequenas escalas, podendo variar a composição pela utilização exclusiva da biomassa ou em conjunto com outros combustíveis (DIAS JÚNIOR *et al.*, 2017).

Segundo Protásio *et al.* (2014), para a produção de energia a partir da biomassa florestal, destacam-se o uso dos materiais lenhosos *in natura* e a sua transformação em carvão vegetal. Porém, características como a dimensão, volume produzido, baixa densidade energética, alta higroscopicidade e o teor de umidade são os principais fatores que implicam em problemas no uso da biomassa de resíduos florestais para produção de energia (SANTOS; COLODETTE; QUEIROZ, 2013). Portanto, tem-se a necessidade de avaliar tais características para melhorar a eficiência do processo de geração energética.

3.1.2. Características físicas da biomassa florestal

Basicamente, o potencial calorífero da biomassa florestal pode ser caracterizado pela avaliação dos parâmetros ligados às propriedades físico-químicas e composição química elementar, estrutural e imediata dos componentes (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013). Dentre as propriedades físico-químicas, as que apresentam maior interferência na geração de energia são umidade, densidade e poder calorífico superior.

3.1.2.1. Umidade

A umidade da biomassa corresponde à quantidade de água livre na composição vegetal. Os diferentes órgãos das plantas apresentam diferentes teores de umidade, sendo que comumente há mais água em folhas, frutos e cascas, do que nos tecidos lenhosos, que geralmente apresentam teores correspondentes à metade do peso da biomassa (BEZERRA NETO; BARRETO, 2011).

O teor de umidade da amostra é fator importante a ser levado em consideração ao classificar o material para o processamento energético, por ser inversamente proporcional à densidade da madeira, e além disso, a quantidade de água presente na biomassa florestal possui correlação com a presença de elementos no material, principalmente em relação à química estrutural, como celulose, hemicelulose e lignina (FOELKEL; BRASIL; BARRICHELO, 1971). Tal comportamento também ocorre em relação às outras fontes de biomassa, como no caso da poda, já que grande porcentagem de sua massa seca é composta por materiais lenhosos.

De acordo com o Relatório de Oportunidades para Florestas Energéticas na Geração de Energia no Brasil (AGROICONE, 2015), a geração de energia pelo processo de combustão da madeira seca (com 0% de umidade) apresenta cerca de 80% de eficiência, e quando utilizada a madeira verde no processo (50% em base úmida), a eficiência para gerar energia cai para 67%.

3.1.2.2. Densidade

A densidade é a relação entre a massa e o volume de biomassa em determinada umidade, em $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Este parâmetro varia entre espécies, entre indivíduos da mesma espécie e entre órgãos/localização da biomassa no mesmo indivíduo (VITAL; CARNEIRO; PEREIRA, 2013). Portanto, apresenta grande heterogeneidade em determinadas biomassas que apresentam fontes de matéria-prima compostas por vários órgãos e materiais genéticos diferentes.

A densidade da biomassa é uma característica que influencia no planejamento de seu manejo, visto que os custos com transportes são avaliados de acordo com o peso, e quanto menor for a densidade, maior o volume necessário para produzir a mesma quantidade de energia. Além disso, segundo Brand (2010), é uma informação importante para o dimensionamento das unidades de geração de energia, e para avaliar o rendimento gravimétrico e a eficiência da biomassa.

Um dos meios de melhorar a eficiência energética da biomassa e reduzir os inconvenientes em relação ao tamanho de partículas e a relação peso-volume é a densificação, caracterizada como uma forma de se obter um produto com melhores características para gerar energia (NAKASHIMA *et al.*, 2017). Sendo assim, técnicas para produção de *pellets* e briquetes constituem um meio de agregar valor à biomassa.

3.1.2.3. Poder calorífico

O poder calorífico de um combustível é definido como a quantidade de energia que é liberada na forma de calor no decorrer de uma combustão completa de uma unidade de massa do combustível, podendo ser apresentado nas unidades kJ.kg^{-1} ou kcal.kg^{-1} (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Essa característica apresenta alguns tipos de representação, destacando-se, de acordo com Nogueira e Lora (2003) e Lima (2010):

- Poder calorífico superior (PCS): quando considera o calor latente utilizado na condensação dos vapores de água presentes nos gases liberados no processo de combustão;
- Poder calorífico inferior (PCI): quando esse calor latente não é considerado, caracterizado como o calor que pode ser efetivamente utilizado nos combustíveis; e
- Poder calorífico líquido ou útil (PCU): quantidade de calor efetivo produzido, descontando-se a energia gasta no processo de combustão necessária para evaporar toda a água referente à umidade contida na biomassa.

Além de se avaliar as diferentes características da biomassa, é a partir do poder calorífico que se define o seu potencial de geração de energia. De acordo com o BEN (2018), o poder calorífico de materiais lenhosos com cerca de 25% de umidade é de $3.300 \text{ kcal.kg}^{-1}$.

3.1.3. Características químicas da biomassa florestal

A composição química da biomassa, segundo Brand (2010) e Klock e Andrade (2013), pode ser categorizada de três formas:

- Composição química elementar: conteúdo percentual em massa seca dos principais elementos que constituem quimicamente a biomassa, sendo estes: carbono, oxigênio, hidrogênio, enxofre, nitrogênio e elementos minerais (cinzas);
- Composição química imediata: conteúdo percentual em massa do combustível referente ao carbono fixo, materiais voláteis, cinzas e umidade; e
- Composição química estrutural: corresponde aos conteúdos de holocelulose e lignina, importantes elementos que conferem características estruturais, mecânicas e químicas ao material; e extrativos, podendo comprometer o potencial de geração de energia da biomassa. Estes elementos são encontrados em elevados teores da matéria que compõe os vegetais, principalmente os arbóreos.

Avaliando as características químicas da biomassa de espécies folhosas, os teores médios são apresentados na Tabela 01.

Tabela 01: Composição média das características químicas elementar, estrutural e imediata, da biomassa florestal de espécies folhosas

Características químicas da biomassa	Teores médios (massa/massa - %)	
Composição química elementar	Carbono	49,00
	Hidrogênio	5,87
	Oxigênio	43,97
	Nitrogênio	0,30
	Enxofre	0,01
	Minerais (cinzas)	0,72
Composição química imediata	Materiais voláteis	81,42
	Carbono fixo	17,82
Composição química estrutural	Extrativos	3,00
	Celulose	45,00
	Hemicelulose	30,00
	Lignina	20,00

Fonte: Cortez, Lora e Gómez (2008), Brand (2010) e Klock e Andrade (2013).

Sendo assim, de acordo com Nogueira e Lora (2003) e Brand (2010), a biomassa destinada à produção de energia devem apresentar as seguintes características:

- Quanto à química elementar, é composta em sua maioria por carbono e oxigênio, sendo que carbono e hidrogênios são os responsáveis pelo processo de ignição devido às suas características combustíveis;
- Quanto à química imediata, deve apresentar baixo teor de cinzas (inferior a 1%) e alto teor de materiais voláteis (superiores à 80%), sendo o carbono fixo o principal responsável pela durabilidade do processo de combustão;
- Quanto à química estrutural, os teores de lignina e extrativos devem ser suficientes para manter o processo de combustão devido à sua composição de carbono e materiais inflamáveis; e
- Alto poder calorífico (superiores à $3.300 \text{ kcal.kg}^{-1}$), que é influenciado pelas características físico-químicas.

3.1.4. Processo de carbonização da biomassa florestal

Um dos meios de agregar valor e gerar vantagens para o uso da biomassa florestal na geração de energia é a sua conversão em carvão vegetal, cujo produto apresenta menor umidade, maior densidade energética e homogeneidade (NOGUEIRA; LORA, 2003; BRAND, 2010).

Segundo Silva *et al.* (2018), a origem e a qualidade da biomassa estabelecem as propriedades do carvão vegetal, sendo que a temperatura final da combustão e a velocidade de aquecimento no processo de combustão podem influenciar a qualidade e o rendimento da conversão da biomassa em carvão vegetal.

O processo de carbonização da biomassa apresenta uma série de fenômenos ligados à temperatura de combustão, que culmina na liberação e conversão de compostos presentes no material. Basicamente, a carbonização acontece em quatro etapas (TRUGILHO; SILVA, 2001; CEMIN, 2010):

- Etapa 1: Ocorre em temperaturas inferiores à 200°C , quando acontece a liberação da umidade da biomassa no processo de secagem (a evaporação e liberação da água ocorre na faixa entre 110°C e 200°C);
- Etapa 2: Ocorre em temperaturas entre 200°C e 280°C , a partir da degradação dos componentes químicos estruturais e os materiais menos densos (como ácido acético, metanol, água e CO_2) começam a se volatilizar. É nessa faixa de temperatura que há a predominância das reações endotérmicas;

- Etapa 3: Ocorre em temperaturas entre 280°C e 500°C, havendo liberação de gases com potencial combustível (como monóxido de carbono e metano), além de grande parte do alcatrão solúvel e do ácido pirolenhoso presente na biomassa. É nessa faixa de temperatura que há a predominância das reações exotérmicas; e
- Etapa 4: Ocorre em temperaturas superiores a 500°C, culminando na liberação de parte dos materiais voláteis ainda restantes no carvão vegetal.

Além disso, de acordo com Rodrigues (2016), a partir das características obtidas pela análise de sua composição, o carvão vegetal obtido pela queima parcial da biomassa pode ser destinado à siderurgia e metalurgia, além do uso doméstico.

Portanto, a depender da temperatura empregada na conversão da biomassa florestal em carvão vegetal, o produto final sofre alterações nas quantidades de compostos que auxiliam a combustão, resultando em interferências nos teores de materiais voláteis, elementos minerais e carbono fixo que compõem a química imediata do carvão e no rendimento gravimétrico do processo de carbonização.

3.1.5. Biomassa de poda no Recife-PE

As orientações e referências técnicas da arborização urbana da cidade do Recife, bem como a poda para remoção de galhos, inflorescências ou folhagens, com a finalidade de promover o desenvolvimento adequado das árvores são recomendadas pelo Manual de Arborização Urbana do município (SDSMA, 2017). A poda urbana em árvores de domínio público só tem execução permitida à: uma empresa pública, como a Empresa de Limpeza Urbana da Prefeitura da Cidade do Recife (EMLURB/PCR); empresa privada sob a concessão do poder público e mediante autorização do órgão gestor ambiental (como a CELPE, por exemplo); ou corpo de bombeiros.

Com isso, as normas e técnicas adotadas na prática da poda urbana na cidade do Recife, Pernambuco, são regulamentadas pela Lei Municipal nº 17.666/2010, que “disciplina a arborização urbana no município do Recife e dá outras providências”, proibindo-se o destino inadequado desses resíduos, apesar de não definir a sua destinação correta. Porém, os restolhos de poda são encaminhados para a Estação de Tratamento do Curado, onde seguem para o processo de compostagem com objetivo de fomentar o uso de composto em áreas públicas e na sementeira da prefeitura do Recife.

Como recomendado pelo manual, as podas da cidade devem ser conduzidas em dias ensolarados e em épocas de repouso vegetativo das espécies arbóreas, sem ocorrência de floração e frutificação. Portanto, geralmente os resíduos encaminhados à EMLURB não contém esses materiais (flores e frutos) em sua composição. Sendo assim, a composição da biomassa de poda da cidade é basicamente lenho e casca de galhos e fuste, além de folhas.

3.2. Biodigestão da matéria orgânica

Alguns dos problemas ambientais decorrem da destinação incorreta dos resíduos. Diante desta problemática, os resíduos sólidos podem, por meio dos processos de biodigestão (com presença ou ausência de oxigênio) para formação de biocomposto, ser reutilizados para nutrição mineral de plantas.

3.2.1. Biodigestão aeróbia

A biodigestão aeróbia, comumente associada ao processo de compostagem, pode ser definida como o processo de decomposição da matéria orgânica que ocorre de forma controlada, exotérmica e biooxidativa por micro-organismos favorecidos pelas condições de ambiente úmido, aquecido e aeróbio, resultando na produção de CO₂, água, elementos minerais e matéria orgânica estabilizada, definida como composto (RODRIGUES *et al.*, 2006).

Portanto, a condição para realização de compostagem é a disponibilidade de matéria orgânica para os micro-organismos realizarem o processo de mineralização em níveis de aeração e umidade adequados ao processo. O tamanho das partículas também influencia no processo em relação às trocas gasosas e controle de temperatura na pilha.

Segundo o Manual de Implantação de Compostagem (MMA, 2010), os resíduos utilizados no processo de compostagem são classificados em três fontes geradoras, a depender da logística de coleta:

- Geradores de resíduos comerciais e de serviços (feiras, mercados, restaurantes, etc.);
- Residências e outros serviços de equiparação de potencial gerador de resíduos; e
- Atividades de poda, remoção de árvores e jardinagem pública e privada.

Dentre as vantagens de optar pelo processo de compostagem para reutilização de resíduos sólidos orgânicos, pode-se observar: economia, em espaço físico e financeira, em relação ao depósito desses resíduos em aterros sanitários; redução dos gastos com transporte

dos resíduos; produção de composto com potencial nutritivo para aporte de nutrientes para os solos; e reciclagem da matéria orgânica em sistemas silviagrícolas (MEIRA; CAZZONATTO; SOARES, 2003; BARROS, 2012).

Por ser um material que está em processo de decomposição avançado, o efeito do composto no solo é relativamente rápido, porém contribui com a fração orgânica do solo para suprir as necessidades nutricionais e melhorar, de maneira geral, as características físicas, químicas e biológicas desse solo, proporcionando um bom desenvolvimento do vegetal (AYRES *et al.*, 2018).

3.2.1.1. Processo de compostagem da EMLURB/PCR

A cidade do Recife, em Pernambuco, iniciou em 2006 o processo de reutilização da poda através da compostagem por biodigestão aeróbia, com produção de composto com altos valores nutricionais a ser utilizado na arborização urbana da cidade (FÁTIMA, 2006).

Todo o processo é realizado a partir das atividades rotineiras: realização da poda urbana; coleta dos restolhos da poda; trituração dessa biomassa; montagem das leiras com a biomassa triturada (Figura 02); acompanhamento da aeração das leiras, a partir do revolvimento das pilhas; umidificação da pilha para controle de umidade e temperatura, se necessário; limpeza dos espaços entre as leiras; finalização do composto, passando o material em peneira rotativa; e encaminhamento do composto para as áreas verdes (SOBRAL; MAGALHÃES, 2009; EMLURB, 2017).

Figura 02: Leiras formadas por restolhos de poda triturados na Estação de Tratamento do Curado. A) Biomassa de poda no processo de compostagem; e B) Composto orgânico finalizado.



Fonte: O Autor.

Para a EMLURB (2017), seu processo de produção de composto orgânico apresenta as seguintes vantagens:

- Ambientais, pois há redução da produção de CO₂, chorume e odor, e produção de um composto isento de metais pesados, em relação aos aterros sanitários;
- Econômicas, pois apresenta baixo custo de implantação, gerando economia pela redução na compra de fertilizantes; e
- Sociais, pela inclusão de catadores no mercado formal de trabalho e geração de embasamento científico para pesquisas.

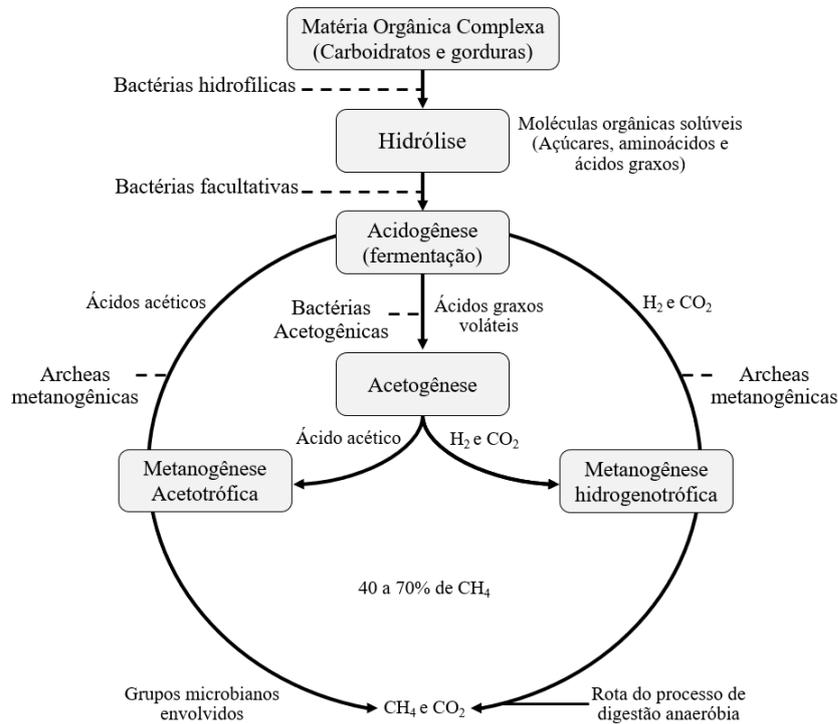
3.2.2. Biodigestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica consiste na mineralização parcial das fontes de carbono deste material realizada por micro-organismos anaeróbios e facultativos, ocorrendo produção de gases com metano em sua composição (VIRIATO *et al.*, 2015).

De forma geral, a biodigestão anaeróbia ocorre em quatro fases (Figura 03) (AIRES; LUCAS JUNIOR, 2009; KARLSSON *et al.*, 2014):

- Hidrólise: redução das moléculas orgânicas por meio de processos enzimáticos, culminando na transformação de compostos mais complexos, como carboidratos, proteínas e lipídios, em monossacarídeos, aminoácidos e ácidos graxos. Os micro-organismos que realizam essa fase são facultativos e/ou anaeróbios estritos.
- Acidogênese: fase em que há a fermentação do material, ocorrendo a redução dos compostos hidrolisados, formando ácidos orgânicos (como ácido acético, butírico e lático), álcoois e amônia. Os produtos formados na acidogênese dependem da composição de micro-organismos presentes e fatores ambientais no processo. A grande maioria das bactérias que realizam a fase da hidrólise estará ativa nesta fase.
- Acetogênese: oxidação dos compostos formados nas etapas de hidrólise e acidogênese, convertendo-os em ácido acético, hidrogênio e CO₂. Para que haja maior eficiência dessa fase, precisa-se de uma maior interação entre as Archeas acetogênicas e metanogênicas, pois é necessário que as Archeas metanogênicas consumam o hidrogênio formado.
- Metanogênese: fase de fermentação do ácido acético pela ação dos micro-organismos metanogênicos acetotróficos, com conversão do hidrogênio e CO₂ em uma mistura de gases (metano, CO₂, dentre outros).

Figura 03: Fluxograma do processo de biodigestão anaeróbia da matéria orgânica.



Fonte: Barros (2012).

Ao se comparar os processos biológicos de digestão, os que ocorrem na ausência de oxigênio apresentam vantagens em relação aos processos aeróbios, tais como: menor área de reação para implantação do sistema; menor consumo de energia para manutenção, menor produção de resíduos e viabilidade do uso dos gases gerados como combustível (WEBER, 2006; CAPATAN; CAPATAN; CAPATAN, 2011).

Apesar disso, como desvantagens estão o maior tempo de retenção dos resíduos, produção de H₂S (que pode gerar odores desagradáveis e corrosão nos biodigestores) e em alguns casos necessita de temperaturas acima de 35°C para otimização do processo digestivo (CORTEZ *et al.*, 2008).

Segundo Silva e Palha (2016), ao realizarem um levantamento do potencial de produção de biogás a partir do aproveitamento de dejetos animais, resíduos de lavouras e perdas na produção pós-colheita, estimaram que no ano de 2013, caso esses resíduos fossem utilizados para produzir biogás, apenas na cidade do Recife seriam gerados 47 milhões de m³ de gases que poderiam ser aproveitados para geração de energia. Portanto, a biodigestão anaeróbia dos resíduos vegetais se caracteriza como uma alternativa viável para a produção de energia proveniente de fontes renováveis, gerando gases com alto potencial energético.

3.2.2.1. Biogás

De forma tradicional, como já mencionado, o uso da biomassa para produção de energia se dá pela combustão, porém pesquisas apontam a viabilidade desse material para uso energético dos gases emanados no processo de decomposição da matéria orgânica, chamado de biogás (TEIXEIRA JUNIOR, 2016).

Segundo Karlsson *et al.* (2014), de maneira geral, o biogás é constituído por 1/3 de gás metano, 1/3 de CO₂ e 1/3 de outros gases, como H₂S, O₂ e NH₃, podendo chegar a cerca de 60% de metano, a depender da composição do material utilizado nos biodigestores. Este metano, dependendo da sua eficiência de produção, qualidade, purificação e disponibilidade, apresenta-se como uma fonte energética renovável e economicamente viável.

De acordo com Goldemberg e Paletta (2012), por se apresentar como material extremamente inflamável, o biogás pode ser destinado a dois processos: 1- queima direta para produção de calor; e 2- conversão desses gases em energia elétrica.

Em relação à conversão do biogás em eletricidade, Abreu (2014) realizou uma comparação entre as turbinas a gás e os motores de combustão interna, e concluiu que estes últimos possuem maior eficiência para esse processo, podendo ser motores do ciclo Otto ou Diesel, sendo que os do ciclo Otto possuem maior adaptação para funcionar com biogás.

3.2.2.2. Biofertilizante

Além da produção do biogás, a digestão anaeróbia de resíduos sólidos apresenta como subproduto um biofertilizante, sendo fonte dos macronutrientes e outros minerais, e apresenta vantagens de alternativa para diminuição do custo de manutenção de plantios e para a sustentabilidade ambiental.

Por não apresentar contato direto com oxigênio durante o processo de degradação, alguns compostos não são oxidados, garantindo bons teores de matéria orgânica ao biofertilizante do processo anaeróbio, e a depender a fluidez do biocomposto, este poderia ser incorporado à etapa de fertirrigação (VALDERRAMA, 2013; SANTOS; DOS SANTOS; RODRÍGUEZ, 2017).

Segundo Fukayama (2008), tais compostos podem ser utilizados para diversos fins, em diferentes tipos de solos, culturas vegetais e estágios de desenvolvimento das plantas, podendo ainda serem utilizados para controle biológico de patógenos das culturas, para controle de plantas daninhas e para recuperação de solos degradados.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. V. **Biogás: economia, regulação e sustentabilidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 196p.
- AGROICONE. **Oportunidades para florestas energéticas na geração de energia no Brasil**. Relatório final 05ACN0115 R00. Curitiba: AGROICONE/IMPUT, 2015. 56p.
- AIRES, A. M.; LUCAS JUNIOR, J. **Biodigestão anaeróbia da cama de frangos de corte para produção de biogás** (Revisão). UNESP, Jaboticabal. 2009. Disponível em <<http://pt.engormix.com/MA-Avicultura/administracao/artigos/biodigestao-anaerobia-camafrangos-t180/124-p0.htm>>; Acesso em: 01 out. 2018.
- ANDRADE, R. V.; LORA, E. E. S. Gaseificação da madeira. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa-MG: Os Editores, 2013. P. 483-508.
- AYRES, M. I. C.; PUENTE, R. J. A.; FERNANDES NETO, J. G.; UGUEN, K.; ALFAIA, S. **S. Cartilha para produtores rurais: compostagem**. Manaus: Editora INPA, 2018. 12 p.
- BARROS, R. M. **Tratado sobre resíduos sólidos: gestão, uso e sustentabilidade**. Rio de Janeiro: Interciência; Minas Gerais: Acta, 2012. 342p.
- BEN. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**. 2018. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 30 nov. 2018.
- BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Recife: UFRPE, Editora Universitária da UFRPE, 2011. 267p.
- BOLDRINI, T. **Recife está no ranking das vinte cidades mais verdes do mundo**. Diário de Pernambuco, publicado em 25/04/2015. Disponível em: <<http://www.joaualberto.com/2015/04/25/recife-esta-no-ranking-das-vinte-cidades-mais-verdes-do-mundo/>>; Acesso em: 22 out. 2016.
- BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.
- CAPATAN, A; CAPATAN, D. C; CAPATAN, E. A. Formas alternativas de geração de energia elétrica a partir do biogás: uma abordagem do custo de geração da energia. **Custos e Agronegócio**, v. 7, n. 1, jan/abr 2011.
- CEMIN, D. S. **Desenvolvimento de um forno para carbonização de resíduos agroflorestais em pequena escala**. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Brasília: Universidade de Brasília, 2010. 81f.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Caracterização da biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. p. 31-52.

CORTEZ, L. A. B.; SILVA, A.; LUCAS JÚNIOR, J.; JORDAN, R. A.; CASTRO, L. Biodigestão de efluentes. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. p. 493-530.

DIAS JÚNIOR, A. F.; LANA, A. Q.; BERNARDES, F. F.; BRITO, J. O. Madeira, energia e geração de termoeletricidade. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 32, n. 2, p.157-163, abr./jun. 2017.

EMLURB. EMPRESA DE LIMPEZA URBANA DO RECIFE. **Relatório do aproveitamento de restos de poda urbana do Recife para o processo de compostagem - 2016**. Recife: EMLURB/PCR, 2017. 7p.

FÁTIMA, M. **Manejo integrado dos resíduos de poda urbana**. Ambiente Brasil, publicado em 24/01/2006. Disponível em: <<http://noticias.ambientebrasil.com.br/artigos/2006/01/24/22790-manejo-integrado-dos-residuos-de-poda-urbana.html>>; Acesso em: 16/10/2018.

FOELKEL, C. E. B.; BRASIL, M. A. M.; BARRICHELO, L. E. G. Métodos para determinação da densidade básica de cavacos para coníferas e folhosas. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais - IPEF**, n.2/3, p. 65-74, 1971.

FUKAYAMA, E. H. **Características quantitativas e qualitativas da cama de frango sob diferentes reutilizações**: efeitos na produção de biogás e biofertilizante. Tese (Doutorado em Zootecnia). Jaboticabal: UNESP, 2008. 99f.

GOLDEMBERG, J.; PALETTA, F. C. (Org.). **Energias Renováveis**. São Paulo: Blucher, 2012. 110p.

KARLSSON, T.; KONRAD, O.; LUMI, M.; SCHMEIER, N. P.; MARDER, M.; CASARIL, C. E.; KOCH, F. F.; PEDROSO, A. G. **Manual básico de biogás**. Lajeado: Ed. da Univates, 2014. 69 p.

KLOCK, U.; J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 4. ed., revisada. Curitiba: UFPR, 2013. 85p.

LIMA, E. A. **Alternativa para estimar o preço da madeira para energia**. Comunicado técnico, 260. Colombo: Embrapa Florestas, 2010. 3p.

LOPES, G. A.; BRITO, J. O.; MOURA, L. F. Uso energético de resíduos madeireiros na produção de cerâmicas no estado de São Paulo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 679-686, abr./jun. 2016.

MEIRA, A. M.; CAZZONATTO, A. C.; SOARES, C. A. **Manual básico de compostagem – série: conhecendo os resíduos**. Piracicaba: USP Recicla, 2003. 15p.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Manual para implantação de compostagem e de coleta seletiva no âmbito de consórcios públicos**. Projeto internacional de cooperação técnica para a melhoria da gestão ambiental urbana no Brasil – BRA/OEA/08/001. Brasília: Ministério do Meio Ambiente – MMA, Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano, 2010. 69p.

NAKASHIMA, G. T.; ADHMANN, I. C. S.; HANSTED, A. L. S.; BELINI, G. B.; WALDMAN, W. R.; YAMAJI, F. M. Materiais lignocelulósicos: caracterização e produção de briquetes. **Revista Virtual de Química**, v. 9, n. 1, p. 150-162, jan./fev. 2017.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia**: fundamentos e aplicações. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199p.

PROTÁSIO, T. P.; GOULART, S. L.; NEVES, T. A.; TRUGILHO, P. F.; RAMALHO, F. M. G.; QUEIROZ, L. M. S. B. Qualidade da madeira e do carvão vegetal oriundos de floresta plantada em Minas Gerais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, p. 111-123, 2014.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; SIQUEIRA, H. F.; NOGUEIRA, MELO, I. C. N. A.; ANDRADE, C. R.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B. Caracterização energética de *pellets in natura* e torreficados produzidos com madeira residual de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 435-442, out./dez. 2015.

RECIFE. **Lei Nº 17666**. Disciplina a arborização urbana no Município do Recife e dá outras providências. Recife, 16 de dezembro de 2010.

RODRIGUES, M. S.; SILVA, F. C.; BARREIRA, L. P.; KOVACS, A. Compostagem: reciclagem de resíduos sólidos orgânicos. In: SPADOTTO, C.; RIBEIRO, W. **Gestão de resíduos na agricultura e agroindústria**. Botucatu: FEPAF, 2006. p. 63-94.

RODRIGUES, T. I. **Diagnóstico ambiental da produção de carvão vegetal no município de Tabai - RS**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Lajeado: UNIVATES, 2016. 86f.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. **Bioenergia e biorrefinaria**: cana-de-açúcar e espécies florestais. Viçosa, MG: Os Editores, 2013. 551p.

SANTOS, M. A.; DOS SANTOS, R. G. A.; RODRÍGUEZ, A. A. Biotecnologia em casa: obtenção de biogás e biofertilizante empregando esterco e resíduos de alimentos. **Marupiara | Revista Científica do CESP/UEA**, [S.l.], n. 1, mai. 2017.

SDSMA. SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E MEIO AMBIENTE. **Manual de arborização: orientações e procedimentos técnicos básicos para a implantação e manutenção da arborização da cidade do Recife**. 2. Ed. Recife: SDSMA - Prefeitura da Cidade do Recife, 2017. 55 p.

SILVA, R. C.; MARCHESAN, R.; FONSECA, M. R.; DIAS, A. C. C.; VIANA, L. C. Influência da temperatura final de carbonização nas características do carvão vegetal de espécies tropicais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 38, e201801573, p. 1-10, 2018.

SILVA, S. P. R.; PALHA, M. L. A. P. F. **Inventário da biomassa produtora de biogás de Pernambuco**. Recife: Gráfica & Copiadora Nacional, 2016. 125 p.

SOARES, T. S.; CARNEIRO, A. C. O.; GONÇALVES, E. O.; LELLES, J. G. Uso da biomassa florestal na geração de energia. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal/FAEF**, Garça, ano IV, n. 8, ago. 2006.

SOBRAL, J. A.; MAGALHÃES, K. M. Avaliação operacional da compostagem dos resíduos de poda realizada em Aterro de Resíduos Sólidos da cidade do Recife, PE. In: IX Jornada de Ensino, Pesquisa e Extensão da UFRPE. **Anais...** Recife: IX JEPEX, 2009.

TEIXEIRA JUNIOR, L. C. **Biogás**: alternativa para geração de energia. 1. ed. Curitiba: Appris, 2016. 101p.

TORRES, N. H.; AMÉRICO, J. H. P.; ROMANHOLO FERREIRA, L. F.; RIBEIRO-GRANJA, A. C.; HARDER, M.N. C. Aproveitamento sustentável dos subprodutos da madeira e das folhas para extração de óleos essenciais. **Bioenergia em revista: diálogos**, ano 4, n. 1, p. 10-22, jan./jun. 2014.

TRUGILHO, P. F. **Energia da Biomassa Florestal**. Lavras: UFLA, 2009. Disponível em: <<http://malinovski.com.br/CongressoFlorestal/Palestras/Palestra-05.pdf> > Acesso em: 28 set. 2018.

TRUGILHO, P. F.; SILVA, D. A. Influência da temperatura final de carbonização nas características físicas e químicas do carvão vegetal de jatobá (*Himenea courbaril* L.). **Scientia Agraria**, v. 2, n. 1, p. 45-53, 2001.

VALDERRAMA, A. **Biodegradación de residuos sólidos agropecuarios y uso del bioabono como acondicionador del suelo**. Dissertação (Especialista em Biotecnología). Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ingenierías, 2013. 54f.

VIRIATO, C. L.; LEITE, V. D.; SOUSA, J. T.; LOPES, W. S.; OLIVEIRA, E. G.; GUIMARÃES, H. S. Influência da granulometria de sólidos totais na codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos. **Revista de Estudos Ambientais**, Blumenal-SC, v.17, p. 6-15, 2015.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Eds.). **Bioenergia & Biorrefinaria**: cana-de-açúcar e espécies florestais. Viçosa: Ed. da UFV, 2013. P. 321-354.

WEBER, M. I. **Avaliação da eficiência de um reator anaeróbio de leito fluidizado para tratamento de resíduos líquidos da indústria de refrigerantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2006. 166 f.

CAPÍTULO 1

CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA DE PODA DO RECIFE/PE PARA GERAÇÃO DE ENERGIA CALORÍFICA

RESUMO

A biomassa florestal apresenta potencial para produção de energia na forma de calor e conversão para energia elétrica, podendo suprir as necessidades energéticas em âmbitos locais, regionais e nacional. Apesar de ter contribuição de várias fontes, um dos componentes da biomassa florestal em ambientes urbanos é o restolho de poda, que muitas vezes não apresenta destinação adequada ou reaproveitamento para os diversos fins. Na cidade do Recife, em Pernambuco, há uma alta produção de biomassa de poda, acumulando cerca de 4500 toneladas de restolhos de poda ao ano. Portanto, o objetivo deste capítulo foi caracterizar a biomassa de poda da cidade do Recife-PE para produção de energia calorífica e elétrica, realizando-se avaliações dos parâmetros físicos e químicos da biomassa *in natura* e da análise imediata do carvão produzido com a poda. A biomassa de poda foi coletada junto à Empresa de Limpeza Urbana da Prefeitura da Cidade do Recife (EMLURB/PCR), sendo coletadas três amostras contendo cerca de 50 kg de cinco áreas diferentes, denominadas Regiões Político-Administrativas (RPAs), que posteriormente formaram uma amostra composta para cada área. Deste material foram analisadas as propriedades físico-químicas (teor de umidade, densidade à granel e poder calorífico) e a composição química estrutural, elementar e imediata da biomassa, sendo este último parâmetro avaliado para a biomassa *in natura* e para o carvão vegetal. Foi possível observar que o local de origem do material (as diferentes RPAs) interferiu apenas nos teores de elementos minerais e de carbono, não influenciando nas demais características. Quanto às propriedades físicas, a biomassa de poda apresenta alto teor de umidade, necessitando de uma secagem prévia para geração de energia, e poder calorífico suficiente para produção de energia calorífica e conversão em energia elétrica. Em relação à química imediata, foi possível observar a redução dos teores de materiais voláteis e aumento do teor de cinzas após o processo de carbonização. Além disso, apresenta bom rendimento para produção de carvão. A biomassa de poda apresentou alto teor de cinzas, o que pode comprometer a durabilidade dos fornos para conversão em energia. Quanto à química estrutural, a biomassa apresenta altos teores de holocelulose e teores satisfatórios de extrativos e lignina. Com o uso da biomassa de poda para gerar energia na cidade do Recife poderiam ser obtidos $7,6 \times 10^6$ kWh, contribuindo com cerca de 12% do consumo de energia para iluminação pública, o que resultaria em uma economia de cerca de 5,6 milhões de reais por ano nos gastos com energia elétrica no município. Porém, com a biomassa de poda seca poderiam ser gerados $1,1 \times 10^7$ kWh, contribuindo com cerca de 17,2% do consumo de energia para iluminação pública, gerando economia de 8,1 milhões de reais por ano, e com o carvão vegetal seriam gerados $1,4 \times 10^7$ kWh por ano, contribuindo com 21,9% do consumo de energia para iluminação pública do município, o que resultaria em uma economia de cerca de 10,0 milhões. Portanto, a conversão da biomassa de poda urbana em carvão e seu uso energético é a melhor alternativa para geração de energia elétrica.

Palavras-chave: energia de biomassa; características físico-químicas da biomassa de poda; carvão vegetal

ABSTRACT

Forest biomass presents potential for energy production in the form of heat and conversion to electric energy, and can meet the energy needs at local, regional and national levels. Despite contributions from several sources, one of the components of forest biomass in urban environments is residue of pruning, which often does not have adequate disposal or reuse for the various purposes. In the city of Recife, in Pernambuco, there is a high production of pruning biomass, accumulating about 4500 tons of pruning stubble a year. Therefore, the objective of this chapter was to characterize the pruning biomass of the city of Recife-PE for the production of heat and electric energy, evaluating the physical and chemical parameters of the *in natura* biomass and the immediate analysis of the coal produced with the pruning. The pruning biomass was collected from the Urban Cleaning Company of the City of Recife (EMLURB / PCR), a series of about 50 kg from five different areas, called Political-Administrative Regions (RPAs), were sampled, which subsequently formed a composite sample for each area. From this material, the physical-chemical properties (moisture content, bulk density and calorific value) and the structural, elemental and immediate chemical composition of the biomass were analyzed, the latter parameter being evaluated for *in natura* biomass and for charcoal. It was possible to observe that the site of origin of the material (the different RPAs) interfered only in the contents of mineral and carbon elements, not influencing the other characteristics. As for the physical properties, the pruning biomass it presents high moisture content, requiring a previous drying for energy generation, and sufficient calorific power for the production of heat energy and conversion into electric energy. In relation to the immediate chemistry, it was possible to observe the reduction of the contents of volatile materials and increase of the ash content after the carbonization process. In addition, it presents good yield for coal production. The pruning biomass presented high ash content, which may compromise the kiln's durability for energy conversion. As for structural chemistry, pruning biomass presents high levels of holocellulose and satisfactory levels of extractives and lignin. With the use of pruning biomass to generate energy in the city of Recife, 7.6×10^6 kWh could be obtained, contributing about 12% of the energy consumption for public lighting, which would result in a saving of around 5.6 million on year in electricity consumption in the municipality. However, with the dry pruning biomass, 1.1×10^7 kWh could be generated, contributing about 17.2% of the energy consumption for public lighting, generating savings of 8.1 million per year, and with charcoal would generate 1.4×10^7 kWh per year, contributing with 21.9% of the energy consumption for public lighting of the municipality, which would result in an economy of around 10.0 million. Therefore, the conversion of urban pruning biomass into coal and its energy use is the best alternative for electric power generation.

Keywords: biomass energy; physical-chemical characteristics of pruning biomass; charcoal

1. INTRODUÇÃO

As buscas por fontes energéticas para os mais diversos fins, como para segurança, aquecimento ou cocção, fizeram com que os humanos sempre procurassem matérias-primas para gerar energia e suprir suas necessidades.

O uso da biomassa como fonte de energia ocorre desde os tempos antigos; porém com a crise do petróleo na década de 1970, houve um impulsionamento do uso da biomassa na matriz energética brasileira, fomentando o uso de fontes renováveis de energia em substituição aos derivados de petróleo, destacando-se os biocombustíveis, dejetos de animais, madeira e resíduos florestais (GOLDEMBERG; PALETTA, 2012).

Além disso, a biomassa florestal apresenta potencial para produção de energia na forma de calor e conversão para energia elétrica, podendo suprir as necessidades energéticas em âmbitos locais, regionais e nacional. Segundo a avaliação de 2017 do Balanço Energético Nacional (BEN, 2018), a contribuição da biomassa na matriz energética brasileira em relação às fontes renováveis é de cerca de 8,2%, sendo menor apenas em relação à energia hidráulica e ao gás natural, que contribuem com 65,2% e 10,5%, respectivamente.

Apesar de ter contribuição de várias fontes, um dos componentes da biomassa florestal em ambientes urbanos é o restolho de poda, que muitas vezes não apresenta destinação adequada ou reaproveitamento para os diversos fins. Na cidade do Recife, em Pernambuco, foi implantado em 2006 um sistema de compostagem utilizando a poda para produzir fertilizantes a serem usados nas áreas verdes da cidade, sendo que uma pequena parte do material lenhoso de galhos grossos e fustes coletada é destinada à combustão.

Segundo Nones *et al.* (2017), o potencial da biomassa para fins energéticos é avaliado pelos seguintes aspectos: quantidade, localização, disponibilidade e qualidade energética do resíduo. Realizando uma avaliação prévia de acordo com esses aspectos, só em 2016, o Recife conseguiu coletar cerca de 4500 toneladas de restolhos de poda (EMLURB, 2017), além de estarem disponíveis e localizados em uma das maiores metrópoles brasileiras. Portanto, resta avaliar qualitativamente a biomassa de poda para que se possa classificar se esse material teria potencial para produção de energia.

Dentre os parâmetros utilizados para definir o potencial energético de uma fonte de biomassa estão a densidade, a granulometria, o poder calorífico e a composição química do material (elementar, estrutural e imediata), além das características do material quando carbonizado (BRAND, 2010; PROTÁSIO *et al.*, 2011).

Por ser um material bastante heterogêneo, as variações nas características da biomassa podem influenciar negativamente ou positivamente na geração de energia e na qualidade do carvão produzido por esse material, devido à diversidade de espécies que compõem a arborização urbana, a origem do material e os diferentes órgãos que compõe a biomassa de poda (folha, galhos, fuste, casca, frutos e flores).

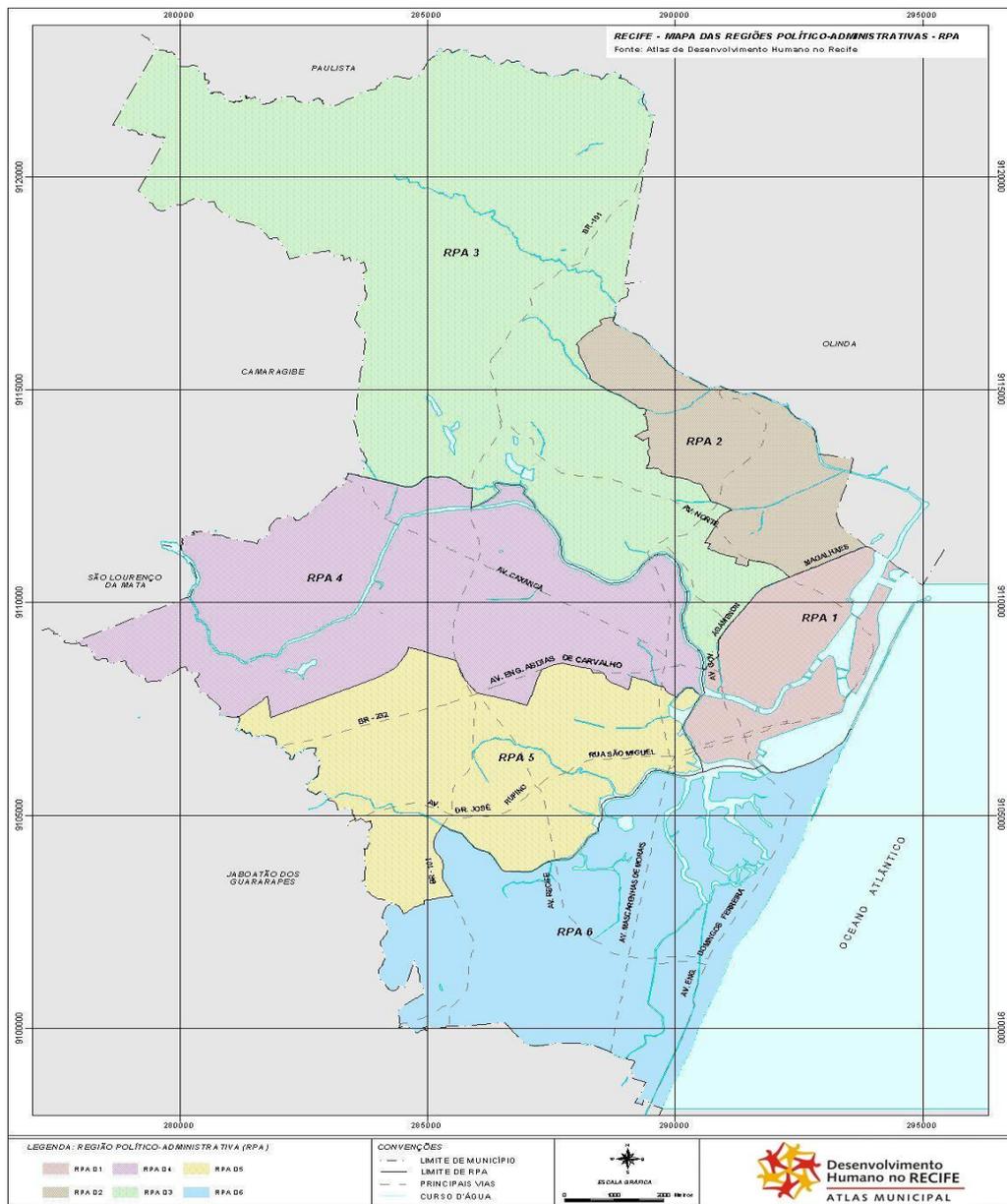
O objetivo deste capítulo foi caracterizar a biomassa de poda da cidade do Recife-PE para produção de energia calorífica e elétrica, realizando avaliações dos parâmetros físicos e químicos da biomassa *in natura* e da análise imediata do carvão produzido com a poda, e avaliando alguns aspectos econômicos desta atividade. Os objetivos específicos foram: avaliar se a obtenção da biomassa de poda em diferentes áreas interfere nas características desse material; caracterizar física e quimicamente a biomassa de resíduos de poda e o carvão vegetal produzido com este material, visando a produção de energia calorífica, para estimativa da produção total de energia proveniente desta biomassa; e avaliar alguns aspectos econômicos destas atividades de geração de energia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Coleta da biomassa de poda

A biomassa de poda foi coletada junto à Empresa de Limpeza Urbana da Prefeitura da Cidade do Recife (EMLURB/PCR) na unidade de Tratamento de Resíduos do Curado, sendo amostradas em cinco áreas diferentes, denominadas Regiões Político-Administrativas (RPAs), sendo coletadas das RPAs 1, 2, 3, 4 e 6 (Figura 04).

Figura 04: Mapa da cidade do Recife destacando as Regiões Político-Administrativas (RPAs).



Fonte: Prefeitura do Recife (2005).

As amostras coletadas foram devidamente trituradas ainda verdes, após corte (Figura 05). A biomassa de poda do Recife é constituída em sua grande maioria por lenho e casca de galhos e folhas, pois os materiais lenhosos com maiores dimensões são separados e não são triturados. Nas coletas realizadas pela EMLURB são misturadas todas as espécies podadas, portanto as amostras desse trabalho apresentam essa característica.

Figura 05: Biomassa de poda triturada *in natura* proveniente da arborização urbana da cidade do Recife, Pernambuco.



Fonte: O Autor.

Para cada RPA, foram coletadas três amostras, contendo cerca de 50 kg cada, que foram devidamente homogeneizadas e constituíram uma amostra composta para cada RPA.

A partir deste material, foram determinados o potencial calorífico da biomassa de poda urbana, de acordo com os parâmetros ligados às propriedades físico-químicas, e a composição química elementar, estrutural e imediata dos componentes.

2.2. Propriedades físicas da biomassa de poda

As avaliações das propriedades físicas da biomassa de poda urbana do Recife foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Florestal, Departamento de Ciência Florestal da Universidade Federal Rural de Pernambuco, onde foram determinados os teores de umidade e densidade à granel; e Laboratório de Energia de Biomassa, Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, onde foi determinado o poder calorífico.

2.2.1. Teor de umidade

Foram determinados teores de umidade destas amostras, a partir da determinação do peso úmido, e em seguida as amostras foram secas em estufa a $102^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$, até atingirem peso constante. Foram realizadas 10 repetições de cada RPA, das quais foram determinados os teores médios de umidade para cada área. O teor de umidade foi determinado pela avaliação da base úmida, por meio da seguinte equação:

$$\%U = ((\text{PU}-\text{PS})/\text{PU}) * 100$$

Sendo:

%U = Teor de umidade (%);

PS = Peso da biomassa seca (g); e

PU = Peso da biomassa úmida (g).

2.2.2. Densidade à granel

A avaliação da densidade à granel da biomassa de poda foi realizada de acordo com a norma ABNT NBR NM45 (2006), na qual foram determinadas as massas em relação à um volume conhecido. A biomassa foi transferida para uma proveta de 500 mL (Figura 06), sendo devidamente pesada para determinação da densidade, em g/cm^3 .

Figura 06: Determinação da densidade à granel, em proveta, da biomassa de poda urbana do Recife, Pernambuco



Fonte: O Autor.

Foram determinadas as densidades à granel em relação à amostra verde (*in natura*), sendo avaliadas 10 amostras de cada RPA.

2.2.3. Poder calorífico

O poder calorífico superior (PCS) foi obtido em calorímetro, modelo IKA® WERKE C5003 (Figura 07). A calibração do calorímetro foi realizada com base no aquecimento de ácido benzoico PA, resultando em $2959 \pm 30,4 \text{ cal.}^\circ\text{C}^{-1}$ (CV = 1,03%), sendo este valor utilizado na base do cálculo do PCS, conforme equação:

$$\text{PCS} = (2959 * \Delta T)/m$$

Sendo:

PCS = Poder calorífico superior (cal.g^{-1} ; ou Kcal.Kg^{-1});

ΔT = variação de temperatura do início ao fim da combustão ($^\circ\text{C}$); e

m = massa de amostra utilizada no procedimento (g), cerca de 0,7 g.

Figura 07: Calorímetro utilizado para determinação do poder calorífico superior da biomassa de poda urbana do Recife, Pernambuco



Fonte: O Autor.

Foram avaliadas duas repetições para cada RPA.

Em seguida, a partir dos valores obtidos para o PCS foi possível determinar o poder calorífico inferior (PCI), segundo equação descrita por Brand (2010):

$$PCI = PCS - 600 * (0,09H)$$

Sendo:

PCI = Poder calorífico inferior (cal.g⁻¹; ou Kcal.Kg⁻¹);

600 = valor médio considerado, em Kcal, para evaporar 1 kg de água em material vegetal; e

H = teor de hidrogênio na biomassa (%).

Nesta etapa, foi adotado o valor 5,87% como teor de hidrogênio, pois segundo Brand (2010), este é o teor médio encontrado na composição química elementar da biomassa de espécies de Angiosperma. Portanto, o PCI foi determinado pela equação:

$$PCI = PCS - 316,98$$

Considerando que a biomassa de poda apresenta teor de umidade que possa interferir na sua eficiência energética, foi obtido o poder calorífico líquido na base úmida, também conhecido como poder calorífico útil (PCU). Segundo Ferreira et al. (2014), o PCU pode ser obtido pela seguinte relação:

$$PCU = (PCI * (1 - (0,01 * \%U))) - (600 * 0,01 * \%U)$$

Sendo:

PCU = poder calorífico útil (cal.g⁻¹; ou Kcal.Kg⁻¹); e

%U = teor de umidade da biomassa de poda (%).

Depois de quantificado o potencial energético da biomassa, foi estimada a capacidade de geração de energia calorífera utilizando-se resíduos de poda urbana da cidade do Recife, adquiridos pela EMLURB/PCR em 2016, fazendo-se a conversão para energia elétrica (1 kcal = 0,0011622 kwh).

2.3. Análise do carvão vegetal de biomassa de poda

As avaliações do carvão vegetal da biomassa de poda urbana do Recife foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Florestal, DCFL/UFRPE.

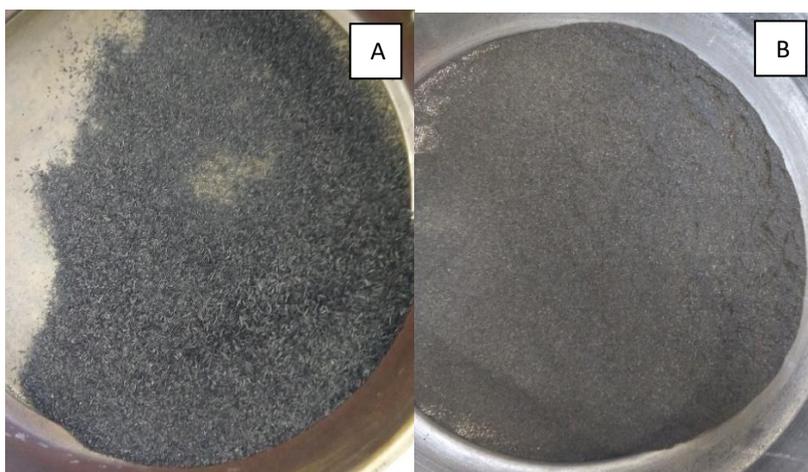
2.3.1. Carbonização

A carbonização da biomassa de poda foi realizada em uma caixa de metal, onde foram adicionados 200,0 g da biomassa, e a caixa devidamente tampada foi levada para mufla. O processo de carbonização foi realizado no período de 210 minutos, no qual inicialmente a amostra ficou 30 minutos exposta a uma temperatura de 150°C. Posteriormente, a temperatura foi elevada à 250°C, permanecendo nesta temperatura por mais 30 minutos. Em seguida, foi adicionada uma taxa de aquecimento de 1,4°C.min⁻¹, sendo acompanhado o aquecimento até que completasse o período de carbonização e alcançasse uma temperatura de 460±10°C.

Foram realizadas três carbonizações para cada RPA, das quais foram determinados o rendimento gravimétrico e realizada a análise imediata do carvão vegetal, totalizando 15 carbonizações.

Posteriormente, o material carbonizado foi macerado e peneirado em peneiras de 60 e 100 mesh (Figura 08). As partículas que passaram pela peneira de 60 e ficaram retidas na peneira de 100 mesh foram utilizadas na análise imediata do carvão vegetal, de acordo com a NBR 8112 (ABNT, 1986).

Figura 08: Carvão macerado para análise imediata. A) Partículas de carvão macerado retidas em peneira de 60 mesh; B) partículas de carvão que passaram na peneira de 60 mesh e ficaram retidas em peneira de 100 mesh



Fonte: O Autor.

2.3.2. Rendimento gravimétrico da carbonização

O rendimento gravimétrico da carbonização da biomassa de poda foi calculado a partir da equação:

$$\text{RGC} = (\text{Pcarb}/\text{Pbiomassa}) * 100$$

Sendo:

RGC = Rendimento gravimétrico da carbonização (%);

Pcarb = Peso do material carbonizado (g); e

Pbiomassa = Peso da biomassa de poda utilizada (g).

2.3.3. Teor de umidade do carvão vegetal

O teor de umidade do carvão vegetal foi obtido de acordo com a NBR 8112 (ABNT, 1986), adaptada, a partir da pesagem de 3,0 g do carvão macerado em pesa-filtro devidamente seco e tarado. O material foi levado à estufa regulada a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, onde permaneceu até obter peso constante. Por fim, em temperatura ambiente obtida em dessecador, o pesa-filtro contendo o material seco foi pesado, sendo posteriormente estimado o teor de umidade do carvão pela diferença de peso. Foram realizadas cinco repetições para cada material carbonizado, totalizando 15 repetições por RPA.

2.3.4. Análise imediata do carvão vegetal

A análise imediata do carvão foi realizada a partir da metodologia descrita na norma NBR 8112 (ABNT, 1986), sendo determinados os teores de materiais voláteis, cinzas, carbono fixo e rendimento em carbono fixo.

Para determinar o teor de materiais voláteis foi pesado 1,0 g de carvão macerado em um conjunto de cadinho com tampa previamente seco e tarado, e este foi levado à mufla regulada à $900 \pm 10^\circ\text{C}$, onde permaneceu três minutos na tampa (Figura 09) e sete minutos no interior da mufla fechada, totalizando 10 minutos de aquecimento. Depois de transcorrido esse tempo, o conjunto foi levado a um dessecador até temperatura ambiente. Posteriormente o material foi pesado, e o teor de materiais voláteis foi determinado pela equação:

$$\%MV = ((m2-m3)/m) * 100$$

Sendo:

%MV = Teor de materiais voláteis (%);

m = massa de carvão utilizada no ensaio (g);

m2 = massa final após o ensaio (g); e

m3 = tara do conjunto cadinho + tampa (g).

Figura 09: Pré-aquecimento do conjunto cadinho+tampa para determinação do teor de materiais voláteis



Fonte: O Autor.

Para determinar o teor de cinzas foi pesado 1,0 g de carvão macerado em um cadinho previamente seco e tarado, e este foi levado à mufla regulada à $700 \pm 10^\circ\text{C}$, onde permaneceu no interior da mufla fechada até a calcinação total do carvão, por cerca de duas horas. Após terminar este processo, o cadinho foi levado a um dessecador até obter temperatura ambiente. Posteriormente o material foi pesado, e o teor de cinzas foi estimado pela equação:

$$\%Cz = ((m_2 - m_3)/m) * 100$$

Sendo:

$\%Cz$ = Teor de cinzas (%);

m = massa de carvão utilizada no ensaio (g);

m_2 = massa final após o ensaio (g); e

m_3 = tara do cadinho (g).

O teor de carbono fixo ($\%CF$) do carvão foi estimado a partir da exclusão dos teores de materiais voláteis e cinzas, de acordo com a equação:

$$\%CF = 100 - \%MV - \%Cz$$

Foram realizadas cinco repetições para cada material carbonizado, totalizando 15 repetições por RPA.

Por fim, foi obtido em rendimento do carbono fixo (RCF) a partir da avaliação descrita por Scremin (2012), correlacionando o rendimento gravimétrico do carvão e o teor de carbono fixo, no qual:

$$\text{RCF} = (\text{RGC} * \% \text{CF}) / 100$$

2.3.5. Poder calorífico superior do carvão vegetal

O poder calorífico superior (PCS, em kcal.kg⁻¹) do carvão vegetal de biomassa de poda foi estimado a partir dos valores encontrados da análise imediata utilizando a seguinte equação proposta por Vale et al. (2002) para carvão vegetal:

$$\text{PCS} = 4934,43 + 33,27 * \% \text{CF}$$

Sendo:

%CF = Teor de carbono fixo do carvão vegetal (%)

Foram estimados os PCS médios de cada RPA, sendo também estimado a média para a biomassa de poda urbana carbonizada.

2.4. Análises químicas da biomassa de poda

2.4.1. Preparo da amostra pré-seca

O preparo da amostra pré-seca da biomassa de poda foi realizado no Laboratório de Bioquímica Vegetal, Departamento de Química (Química Agrícola) da Universidade Federal Rural de Pernambuco.

Parte dos resíduos de poda coletados passou por processo de desidratação em estufa de secagem e aeração regulada à 65°C±5°C por 48-72 horas, até atingirem peso constante (Figuras 10A e 10B). Depois de seco, o material foi moído em moinho de facas do tipo Willey com peneira de seleção de partículas de 2,0 mm (Figura 10C), e preservados em recipientes hermeticamente fechados para não tornarem a umedecer (BEZERRA NETO; BARRETO, 2011).

Figura 10: Preparo de amostra pré-seca da biomassa de poda urbana do Recife, Pernambuco. A) biomassa de poda pré-seca; B) secagem em estufa; e C) material moído



Fonte: O Autor.

2.4.2. Determinação da composição química estrutural

A composição química estrutural da biomassa de poda foi realizada nos Laboratório Bioquímica Vegetal (DQ/UFRPE) e Laboratório de Microbiologia Ambiental, Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco.

Para a determinação da composição química estrutural da biomassa de poda, foram obtidos os teores de materiais estruturais (holocelulose e lignina) e materiais acidentais (cinzas e extrativos).

2.4.2.1. Teor de cinzas

O teor de cinzas na biomassa foi determinado a partir da metodologia proposta por Bezerra Neto e Barreto (2011).

Em cadinhos previamente secos e tarados, foram pesados cerca de 2,0 g de amostra pré-seca, e em seguida foram levados à chapa de aquecimento a fim de realizar uma prévia carbonização da amostra até cessar a liberação de fumaça. Após a pré-carbonização, os cadinhos foram levados à mufla, onde permaneceram por cerca de quatro horas à uma temperatura de $575 \pm 25^\circ\text{C}$ (Figura 11). Depois de transcorrido este tempo, os cadinhos foram levados ao dessecador até temperatura ambiente na ausência de umidade. Após esfriarem, os cadinhos foram pesados, e o teor de cinzas foi determinação a partir da seguinte equação:

$$\%Cz = ((P_{\text{final}} - P_{\text{cad.}})/A_{\text{ps}}) * 100$$

Sendo:

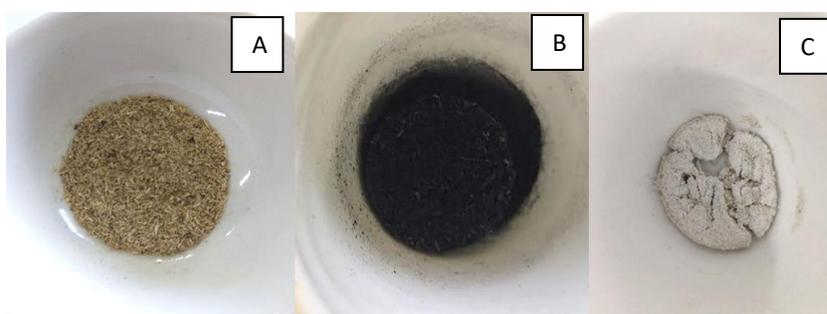
$\%Cz$ = Teor de cinzas (%);

P_{final} = Peso seco do cadinho mais resíduo mineral (g);

$P_{\text{cad.}}$ = Tara do cadinho (g); e

A_{ps} = Amostra pré-seca (g).

Figura 11: Etapas das carbonização e calcinação da biomassa de poda in natura para a determinação do teor de cinza. A) Amostra de biomassa de poda *in natura*; B) Amostra carbonizada; C) Amostra calcinada



Fonte: O Autor.

Foram realizadas cinco repetições para cada RPA, sendo obtido o teor médio de cinzas da biomassa de cada área.

2.4.2.2. Teor de extrativos

Para a quantificação dos extrativos na biomassa de poda, seguiu-se a norma ABCP M3/69 (ABTCP, 1974) atualizada pela NBR 14853 (ABNT, 2010), a partir da extração por sistema de *Soxhlet* (Figura 12), utilizando-se hexano como solvente.

Utilizando cerca de 3,0 g de amostra pré-seca, o material permaneceu no sistema por duas horas de extração (Figura 13), sendo no final avaliado a diferença de massa entre o balão coletor previamente seco e tarado e o peso do balão contendo os extrativos, de acordo com a seguinte equação:

$$\%Ext = ((P_{\text{final}} - P_{\text{balão}})/A_{\text{ps}}) * 100$$

Sendo:

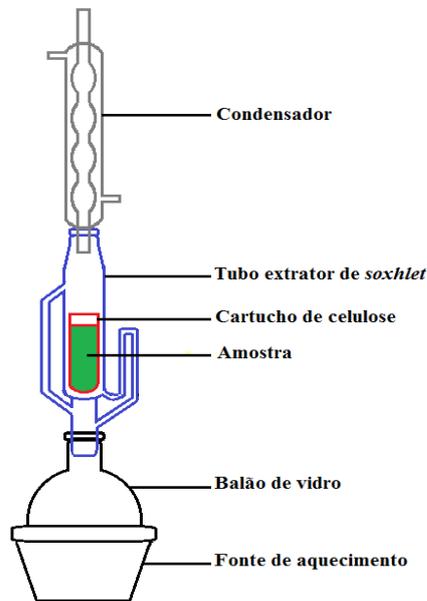
$\%Ext$ = Teor de extrativos (%);

P_{final} = Peso seco do balão coletor contendo os extrativos (g);

$P_{\text{balão}}$ = Tara do balão coletor (g); e

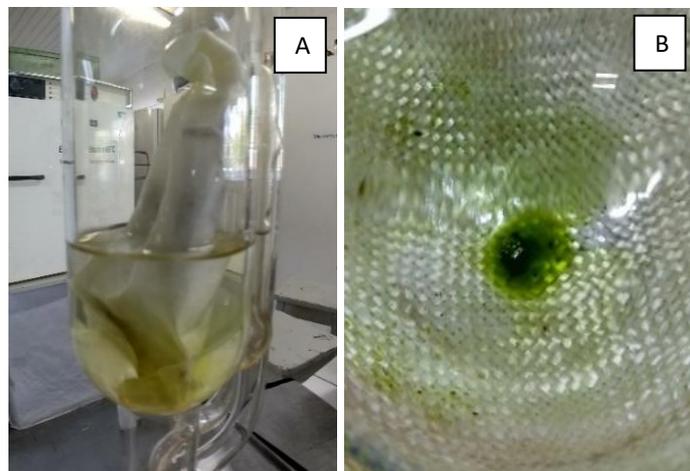
A_{ps} = Amostra pré-seca (g).

Figura 12: Esquema de extração por sistema de *Soxhlet*



Fonte: Silva (2016).

Figura 13: Amostra de biomassa de poda urbana para avaliação dos teores de extrativos. A) Amostra em extração; B) Extrativos após o processo



Fonte: O Autor.

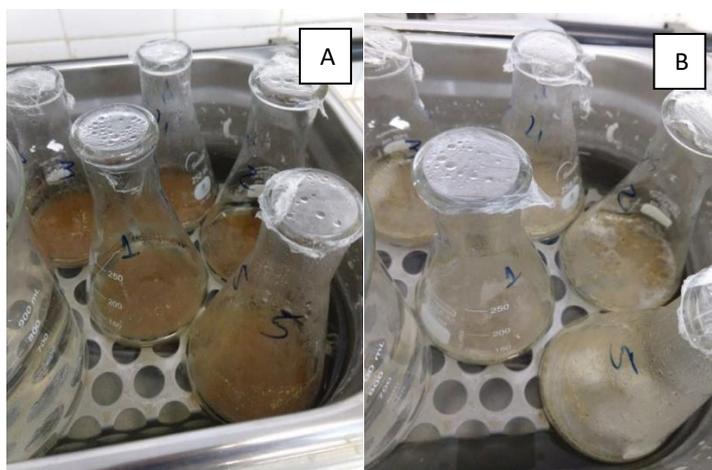
Foram realizadas cinco repetições para cada RPA, sendo obtido o teor médio de extrativos da biomassa de cada área.

2.4.2.3. Teor de holocelulose e lignina

A determinação do teor de holocelulose na biomassa de poda foi realizada a partir da adaptação da metodologia de Browning (1963) descrita por Silva et al. (2015b).

Em um erlenmeyer contendo cerca de 2,0 g de amostra livre de extrativos, foram adicionados 5,0 mL de hipoclorito de sódio (6%), 3,5 mL de ácido acético glacial PA e 30 mL de água destilada. O erlenmeyer foi tampado com plástico filme e levado ao banho-maria com temperatura regulada a $70\pm 5^{\circ}\text{C}$ por cerca de três horas (Figura 14A). A adição de hipoclorito e ácido acético foi repetida após a primeira e a segunda hora de exposição, até branqueamento da biomassa que caracteriza a deslignificação da amostra (Figura 14B).

Figura 14: Processo de deslignificação da biomassa de poda urbana para determinação dos teores de holocelulose A) Amostra acondicionada em banho-maria para determinação de holocelulose; B) Amostra após o processo de deslignificação da biomassa



Fonte: O Autor.

Após transcorrer as três horas, a mistura foi resfriada e filtrada à vácuo em funil de Buchner previamente seco em estufa e tarado. Por fim, o funil contendo o resíduo de holocelulose foi levado para estufa à $103\pm 2^{\circ}\text{C}$ até peso constante. O teor de holocelulose foi determinado a partir da equação:

$$\% \text{Holo} = ((P_{\text{final}} - P_{\text{funil}}) / A_{\text{ps}}) * 100$$

Sendo:

%Holo = Teor de holocelulose (%);

P_{final} = Peso seco do funil de Buchner contendo a celulose (g);

P_{funil} = Tara do funil de Buchner (g); e

A_{ps} = Amostra pré-seca (g).

A determinação do teor de celulose foi realizada a partir da norma M9/71 (ABTCP, 1974), adaptada.

Para tal, o resíduo da holocelulose foi transferido para um erlenmeyer onde foi adicionado 100 mL de solução de KOH a 15% em estado de fervura, e este material foi levado para aquecimento em ebulição suave por 30 minutos (Figura 15). Em seguida, com o material totalmente frio, a solução foi filtrada à vácuo em funil de Buchner previamente seco em estufa e tarado. Por fim, o funil foi levado para estufa à $103\pm 2^\circ\text{C}$ até peso constante. O teor de celulose foi determinado pela seguinte equação:

$$\% \text{Celu} = ((P_{\text{final}} - P_{\text{funil}}) / A_{\text{ps}}) * 100$$

Sendo:

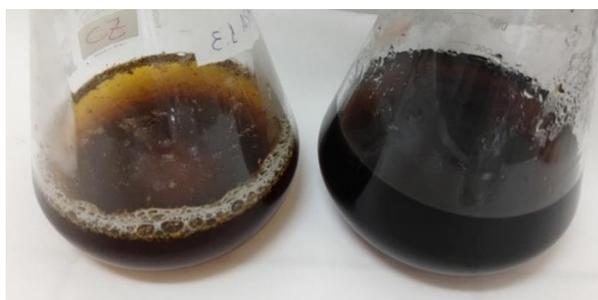
%Celu = Teor de celulose (%);

P_{final} = Peso seco do funil de Buchner contendo a celulose (g);

P_{funil} = Tara do funil de Buchner (g); e

A_{ps} = Amostra pré-seca utilizada para determinação de holocelulose (g).

Figura 15: Resíduo de holocelulose com adição de KOH antes (à esquerda) e após (à direita) o aquecimento, para determinação do teor de celulose na biomassa de poda



Fonte: O Autor.

Por fim, o teor de hemiceluloses (%Hemi) foi estimado a partir da seguinte equação:

$$\% \text{Hemi} = \% \text{Holo} - \% \text{Celu}$$

Para tais determinações foram utilizadas cinco repetições para cada RPA, e em seguida foram estimados os teores médios para cada parâmetro.

O teor de lignina (%Lig) foi estimado a partir da diferença percentual da soma das cinzas, extrativos e holocelulose, de acordo com a equação:

$$\% \text{Lig} = 100 - \% \text{Cz} - \% \text{Ext} - \% \text{Holo}$$

2.4.3. Análise química imediata da biomassa de poda

A análise de materiais voláteis da biomassa de poda foi realizada pela mesma metodologia utilizada para carvão, utilizando amostra *in natura*, em cinco repetições para cada RPA. Nessa etapa, foi utilizado o teor de cinzas determinado na análise química estrutural. Por fim, foram determinados os teores de carbono fixo na biomassa de poda.

2.4.4. Análises elementar e nutricional

As análises elementares da biomassa de poda foram realizadas no Laboratório de Microbiologia (DEQ/UFPE); no Centro de Apoio à Pesquisa – CENAPESQ da UFRPE; e no Laboratório de Saneamento Ambiental, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFPE.

2.4.4.1. Teor de carbono

Para determinar os teores de carbono orgânico total nas amostras de biomassa de poda foi utilizado o método volumétrico proposto por Bezerra Neto e Barreto (2011), ajustado por Araujo et al. (2018), baseando-se na estequiometria em que cada milímetro de dicromato de potássio 1,0N equivale a 3,0 mg de carbono oxidado.

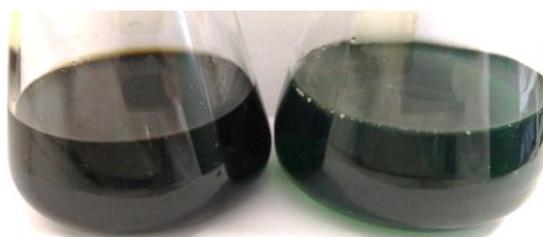
Em um erlenmeyer contendo cerca de 0,1 g da amostra pré-seca foi adicionado 20 mL de dicromato de potássio 1,0N e 10 mL de ácido sulfúrico concentrado. Este material foi levado para aquecimento em fervura branda por cinco minutos, com o erlenmeyer tampado com vidro de relógio (Figura 16), e em seguida foi agitado por cerca de um minuto e foi deixado em repouso por cerca de 30 minutos. Depois de transcorrido esse tempo, foram adicionados 200 mL de água destilada, 10 mL de ácido fosfórico concentrado e 1,0 mL de difenilamina. Este material foi titulado com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,5N, sendo o parâmetro de reatividade a mudança da coloração púrpura para verde (Figura 17).

Figura 16: Digestão das amostras para oxidação da matéria orgânica e análise de carbono orgânico na biomassa de poda



Fonte: O Autor.

Figura 17: Amostra para determinação do teor de carbono orgânico na biomassa de poda antes da titulação em coloração púrpura (à esquerda) e após a titulação em coloração verde (à direita)



Fonte: O Autor.

Foram realizadas cinco repetições para cada RPA, sendo obtido o teor médio de carbono da biomassa de cada área.

2.4.4.2. Teor de nitrogênio

O teor de nitrogênio total na biomassa de poda foi determinado a partir do método de arraste de vapor (Kjeldahl) ajustado dos *Standard Methods* 4500 NH₃-C da APHA/AWWA/WEF (2005) e Silva (2009).

Em um tubo digestor, foram adicionados 0,1 g de amostra pré-seca, 1,0 g da mistura digestora 10:1 de K₂SO₄:CuSO₄ e 8,0 mL de ácido sulfúrico concentrado. Em seguida, este tubo foi levado para um bloco digestor para aquecimento à 360°C até total digestão. Em paralelo foi realizada uma amostra em branco.

Depois de digerido e frio, foram adicionados 50 mL de água destilada ao tubo digestor e este foi acoplado ao destilador de Kjeldahl, onde procedeu-se a destilação utilizando 25 mL de NaOH a 40%, recolhendo o destilado em um erlenmeyer contendo 25 mL de solução de

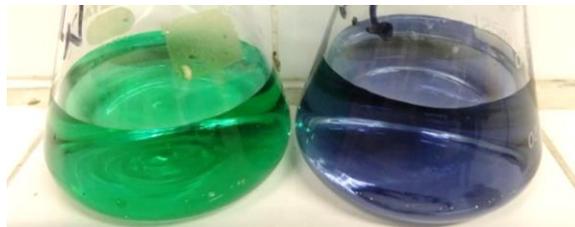
ácido bórico com indicador misto até adquirir coloração verde e dobrar o volume (Figura 18). Em seguida, este material foi titulado com solução de H_2SO_4 0,02N até a mudança de coloração de verde para azulada (Figura 19).

Figura 18: Sistema de destilação de Kjeldahl para determinação do teor de nitrogênio total na biomassa de poda



Fonte: O Autor.

Figura 19: Amostra com presença de nitrogênio em coloração verde (à esquerda) e ausência de nitrogênio em coloração azulada (à direita)



Fonte: O Autor.

O teor de nitrogênio na biomassa de poda foi obtido pela equação:

$$N = ((\text{Vol. A} - \text{Vol. B}) * [\text{N}] * F * 1000 * 14) / m$$

Sendo:

N = quantidade de nitrogênio total na amostra (mg);

Vol. A = volume de ácido titulado na amostra digerida (mL);

Vol. B = volume de ácido titulado no branco (mL);

[N] = concentração do ácido sulfúrico utilizado na titulação, em normalidade (N);

F = fator de correção da padronização do ácido sulfúrico utilizado na titulação;

m = massa da amostra utilizada na digestão (g)

Foram realizadas três repetições para cada RPA, sendo obtido o teor médio de nitrogênio total da biomassa de cada área.

2.4.4.3. Digestão para análise de minerais

A fim de preparar extratos para realização de análises elementares da biomassa de poda, foi realizada a digestão nítrica com peróxido de hidrogênio.

Em tubos devidamente limpos com ácido nítrico e secos, foram adicionados 0,2 g de amostra pré-seca, 5,0 mL de ácido nítrico PA e 5,0 mL de peróxido de hidrogênio PA. Em seguida, os tubos foram tampados e levados para o digestor em micro-ondas MarsXpress, onde permaneceu por 40 minutos, sendo os 20 primeiros minutos destinados ao aquecimento até 160°C e os outros 20 minutos para digestão nesta temperatura.

Depois de digerido e resfriado, o material foi transferido para um balão volumétrico de 25 mL, completando-se o volume com água destilada. Por fim, os extratos foram acondicionados em frascos e mantidos sob refrigeração até o momento das análises.

Foram realizadas cinco digestões para cada RPA.

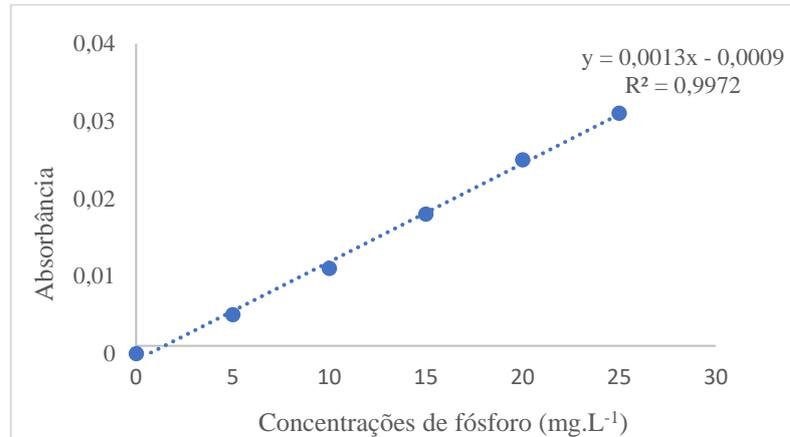
2.4.4.4. Teor de fósforo

O teor de fósforo na biomassa de poda foi determinado a partir do método colorimétrico do molibdo-vanadato descrito por Bezerra Neto e Barreto (2011).

Em um tubo de ensaio foi adicionado 1,0 mL do extrato obtido pela digestão nítrica, 5,0 mL de água destilada de 2,0 mL de reagente molibdo-vanadato de amônio (solução 1:1 em volume preparada a partir das soluções aquosas de molibdato de amônio a 5% e vanadato de amônio a 0,25%). Este material foi deixado em repouso por cinco minutos e, em seguida, foi realizada a leitura da absorbância em espectrofotômetro com comprimento de onda de 470 nm.

Além disso, foram analisadas soluções padrões de fósforo (concentrações: 0; 25; 50; 75; 100; 200 e 500 mg.L⁻¹) a fim de construir a curva padrão a partir da leitura da absorbância destes padrões (Figura 20), utilizando software Microsoft Office Excel, obtendo-se uma equação de regressão para o cálculo da concentração de fósforo (mg.Kg⁻¹).

Figura 20: Curva-padrão de fósforo construída a partir da relação entre diferentes concentrações do elemento e sua absorvância



O teor de fósforo foi obtido a partir da equação regressão $y = 0,0013x - 0,0009$, onde y corresponde à leitura da absorvância nos extratos e x corresponde a quantidade do elemento, sendo estimado a quantidade de fósforo em g.Kg^{-1} de biomassa.

Para a determinação do teor de fósforo foram realizadas duas repetições por extrato, sendo obtido o teor médio.

2.4.4.5. Teor de potássio, cálcio e sódio

Os teores de potássio, cálcio e sódio foram obtidos em fotômetro de chama DIGIMED DM-61 (Figura 21), devidamente calibrado com soluções padrões de concentrações conhecidas destes elementos, e estimados em mg.Kg^{-1} de matéria seca da biomassa.

Figura 21: Análise de potássio, cálcio e magnésio em fotômetro de chama, nas amostras digeridas de biomassa de poda



Fonte: O Autor.

Os extratos da digestão nítrica foram previamente filtrados em membrana de nylon, com auxílio de seringa.

Foi obtido o teor destes elementos em cada extrato da digestão nítrica.

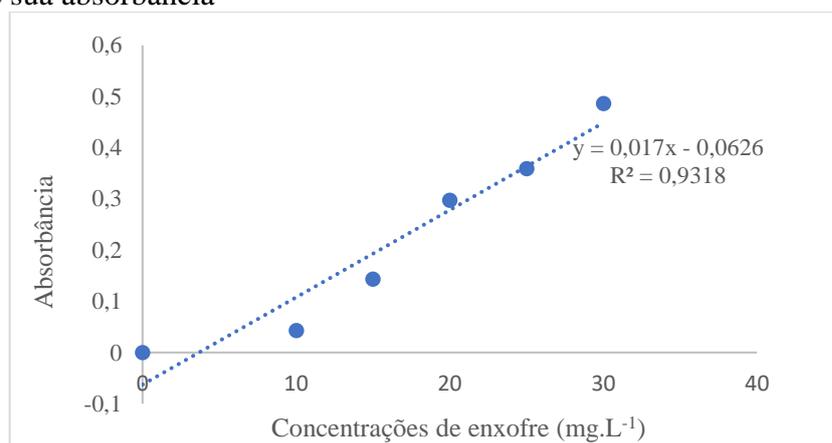
2.4.4.6. Teor de enxofre

O teor de enxofre na biomassa de poda foi determinado a partir do método turbidimétrico do sulfato de bário descrito por Bezerra Neto e Barreto (2011).

Em um tubo de ensaio foram adicionados 2,0 mL do extrato obtido pela digestão nítrica, 0,2 mL de solução de HCl 6N contendo 20 mg.L⁻¹ de enxofre, e 100 mg de cristais de BaCl₂.2H₂O finamente moído. Esse material ficou em repouso por um minuto. Em seguida, agitou-se por 30 segundos e foi realizada a leitura em espectrofotômetro com comprimento de onda de 420 nm.

Além disso, foram analisadas soluções padrões de enxofre (concentrações: 0, 10, 15, 20; 25, 30, 40 e 50 mg.L⁻¹) a fim de construir a curva-padrão a partir da leitura da absorbância destes padrões (Figura 22), utilizando software Microsoft Office Excel, obtendo-se uma equação de regressão para o cálculo da concentração de enxofre (mg.Kg⁻¹).

Figura 22: Curva padrão de enxofre construída a partir da relação entre diferentes concentrações do elemento e sua absorbância



O teor de enxofre foi obtido a partir da equação regressão $y = 0,017x - 0,0626$, onde y corresponde à leitura da absorbância nos extratos e x corresponde a quantidade do elemento, sendo estimado a quantidade de enxofre em g.Kg⁻¹ de biomassa.

Foi obtido o teor de enxofre em três extratos digerido por RPA.

2.4.4.7. Teor de oxigênio

O teor de oxigênio na biomassa de poda foi estimado a partir da seguinte equação descrita por Eufrade Junior (2015):

$$O = 100 - (C + H + N + S + \%Cz)$$

Foi adotado o valor 5,87% como teor de hidrogênio na biomassa (BRAND, 2010).

2.5. Análises estatísticas

Para todas as variáveis analisadas neste trabalho foram realizadas a análise de variância (ANOVA) e, quando apresentaram diferença significativa, foram submetidas ao teste de Tukey a 95% de probabilidade utilizando o software Assistat 7.7, a fim de determinar se a heterogeneidade do material influencia nas características da biomassa de poda em cada área de aquisição.

A variabilidade dos dados em relação à média geral de cada parâmetro foi avaliada de acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980), na qual coeficientes de variação (CV) menores que 12% apresentam baixa variabilidade, entre 12% e 60% apresentam variabilidade média, e os CVs acima de 60% apresentam alta variabilidade dos dados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Propriedades físicas da biomassa de poda

Quanto às propriedades físicas observadas para biomassa de poda (Tabela 02), não foi possível observar diferença estatística significativa entre as diferentes RPAs para o teor de umidade e densidade à granel, de acordo com as análises de variância (Apêndices 01, 02 e 03).

Tabela 02: Valores médios dos teores de umidade (%), densidade à granel (g.cm^{-3}) e poder calorífico (kcal.kg^{-1}) da biomassa de poda urbana de Recife/PE, em função das Regiões Político-Administrativas (RPA)

RPA	UMIDADE (%)	DENSIDADE À GRANEL (g.cm^{-3})	PODER CALORÍFICO (kcal.kg^{-1})		
			PCS	PCI	PCU
1	57,87	0,2654	4446,3	4129,3	1392,5
2	59,45	0,2663	4552,2	4235,2	1360,7
3	58,06	0,2655	4620,2	4303,2	1456,4
4	56,70	0,2666	4894,9	4577,9	1642,0
6	55,77	0,2655	4543,6	4226,7	1534,8
Média Geral	57,57	0,2659	4616,4	4294,4	1477,3
DP	3,87	0,0040	170,4	170,38	109,99
CV (%)	6,72	1,51	3,69	3,97	7,44

Onde: PCS = Poder calorífico superior; PCI = Poder calorífico inferior; PCU = Poder calorífico útil

Em relação ao teor de umidade, a biomassa de poda pode apresentar valores muito variáveis, que provêm da relação do material e a umidade relativa (UR) do ambiente. No Recife, a UR anual é de 84% (MOREIRA, GALVÍNCIO, 2007). O teor de umidade da biomassa de poda do Recife se encontra um pouco acima do que é esperado para a biomassa florestal, podendo esse fato também ser atribuído por ser composta por vários órgãos, principalmente folhas, lenho e casca. Essa característica está de acordo com o esperado, visto que, de acordo com Bezerra Neto e Barreto (2011), as plantas apresentam cerca de 50% de água nos órgãos lenhosos e teores superiores em outros órgãos, como folhas e frutos.

Essa quantidade de água presente no material apresenta relação negativa com a geração de energia, visto que parte do calor empregado no processo seria direcionado para a vaporização da água e secagem da biomassa, interferindo na combustão.

A depender do teor de umidade da biomassa de poda, os resíduos gerados em Recife, após passarem por um processo de secagem, poderiam ser utilizados para gerar energia na forma de calor e/ou fazer parte da cogeração de energia elétrica, pois de acordo com Vaz Júnior

(2015), apresentam objetivos de consumir um passivo ambiental (em relação às fontes de energia não renováveis) e gerar receita para o município.

Segundo o que aponta o Relatório de Oportunidades para Florestas Energéticas na Geração de Energia no Brasil (AGROICONE, 2015), a depender da umidade, a eficiência energética pode cair de 80% quando utilizada matéria seca para cerca de 67% ao usar madeira verde processo (50% em base úmida).

Esse incremento na eficiência energética devido à secagem do material seria de grande importância para melhoria das características energéticas da biomassa de poda.

Resultados semelhantes foram observados por Sacramento *et al.* (2017), ao avaliarem a biomassa de poda urbana de Londrina para utilização em processos de compostagem, cujo teor de umidade da poda foi de 56,62%; e por Brand *et al.* (2014), ao utilizarem biomassa de *Pinus teada* L. para geração de energia, no qual apresentou teor médio de 57,67% em relação à copa, galho e folhas em diferentes anos de plantio. Apesar disso, os resultados foram superiores aos teores encontrados por Pedrosa *et al.* (2013) em poda de jurema-preta e marmeleiro (34,30% e 36,47%, respectivamente).

Ao observar a densidade à granel, os restolhos de poda coletados pela EMLURB apresentam diferentes granulometrias em função da heterogeneidade durante o processo de trituração devido à presença de matérias lenhosos, cascas e folhas.

Caso as partículas da biomassa de poda fossem regulares e menores, proporcionariam maior eficiência energética, pois a redução do volume impactaria no melhor rendimento energético em relação às dimensões de partículas e das unidades de geração de energia.

Os valores de densidade à granel determinados para a biomassa de poda urbana são superiores aos encontrados por Pereira *et al.* (2016) para cavacos de *Eucalyptus sp.* com 5,5 anos, que correspondeu a $0,212 \text{ g.cm}^{-3}$; e inferiores pelo IPT (2009) para resíduos de pinus, resíduos de eucalipto, lenha comercial e lenha catada, nos valores médios de $0,350 \text{ g.cm}^{-3}$, $0,374 \text{ g.cm}^{-3}$, $0,390 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,300 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente.

Quanto à outras fontes de biomassa, a densidade à granel da biomassa de poda se apresentou inferior às encontradas por Protásio *et al.* (2011) para casca do café, com $0,462 \text{ g.cm}^{-3}$, e superiores para serragem de madeira de eucalipto e resíduos moídos da cultura de milho, com $0,224 \text{ g.cm}^{-3}$ e $0,222 \text{ g.cm}^{-3}$, respectivamente.

Para a biomassa de poda da cidade do Recife foi encontrado um valor médio de PCS igual a $4616,4 \text{ kcal.kg}^{-1}$. Portanto, devido à heterogeneidade da biomassa de poda, o PCS obtido neste trabalho corrobora com valores apresentados por Brand (2010), que ao descrever 11

espécies para avaliar o potencial em biomassa contendo tora, tronco inteiro, copa, casca, galhos e folhas, observou PCS médio num intervalo entre 4474 e 5034 kcal.kg⁻¹.

Apesar disso, ainda de acordo com a autora, o poder calorífico da lenha corresponde à 3300 kcal.kg⁻¹. A partir da avaliação do PCS da biomassa de poda urbana do Recife, este material apresenta alta geração de energia calorífica, visto que não apresenta apenas materiais lenhosos na sua composição.

A presença de outros compostos químicos provenientes das folhas e das cascas, principalmente teor de extrativos e outros materiais voláteis, podem ter causado incremento no poder calorífico da biomassa de poda urbana.

Ao comparar com outras fontes de biomassa, a poda apresentou valor médio maior de PCS que os encontrados por Protásio *et al.* (2011), para casca do café e serragem de eucalipto, com 4403,33 kcal.kg⁻¹ e 4412,33 kcal.kg⁻¹, respectivamente. Em outra pesquisa, Protásio *et al.* (2015) encontraram um PCS de 4815 kcal.kg⁻¹ em *pellets in natura* confeccionados com madeira residual de *Pinus*, porém quando torrificadas à 250°C este material apresentou um aumento de cerca de 10%. Diante disso, tal técnica poderia ser aplicada à biomassa de poda para melhorar o desempenho para geração de energia.

Quando extrapolados os valores dos PCS, PCI e PCU em relação ao total de material proveniente da poda coletada pela EMLURB em 2016, é possível obter quantidades de calor correspondentes a 2,0x10¹⁰ kcal, 1,9x10¹⁰ kcal e 6,5x10⁹ kcal, respectivamente. Verificou-se que ao converter em energia elétrica o valor em relação ao PCU que seria possível gerar no ano de 2017 a partir da combustão da poda, poderiam ser obtidos com esse material 7,6x10⁶ kWh.

Segundo a Base de Dados do Estado de Pernambuco (BDE, 2017), em 2017 foram gastos cerca de 6,4x10⁷ kWh com iluminação pública no município do Recife. Sendo assim, a biomassa de poda poderia contribuir com cerca de 11,86% da iluminação pública da cidade anualmente se optassem pela combustão direta desse material coletado pela EMLURB.

Além disso, em janeiro de 2019, a taxa cobrada pela CELPE (Companhia Elétrica de Pernambuco) correspondeu à R\$ 0,72 por kWh consumido. Portanto, se optasse pela geração de energia pela combustão da biomassa de poda, poderia ser poupada uma renda bruta de cerca de 5,5 milhões de reais nos gastos com energia elétrica no município.

Caso fosse considerado o PCS (4616,4 kcal.kg⁻¹), com a produção anual de biomassa seca correspondente à 2400 toneladas, poderiam ser gerados 1,1x10⁷ kWh por ano, correspondendo então à 17,2% do consumo de energia para iluminação pública do município. Fazendo então a relação com a taxa da CELPE, poderia ser poupada uma renda bruta de cerca de 7,9 milhões de reais nos gastos com energia elétrica na cidade do Recife.

Nesse caso, a secagem da biomassa de poda urbana incrementaria em cerca de 30% na renda obtida pela sua conversão em energia elétrica, sendo recomendado o processo de secagem prévia para gerar maior quantidade de energia e melhoria das características energéticas da biomassa.

3.2. Análise imediata da biomassa de poda

3.2.1. Biomassa *in natura*

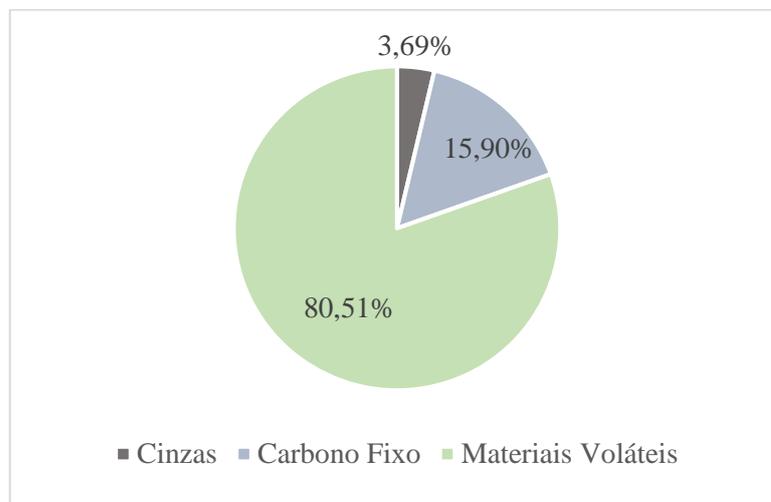
Quanto à química imediata da biomassa de poda (Tabela 03), não foi possível observar diferença estatística significativa entre as diferentes RPAs para os teores de cinzas, materiais voláteis e carbono fixo, de acordo com as análises de variância (Apêndices 04 e 05).

Tabela 03: Valores médios da análise química imediata em relação aos dos teores cinzas (%Cz), materiais voláteis (%MV) e carbono fixo (%CF) da biomassa de poda urbana de Recife/PE, em função das Regiões Político-Administrativas (RPA)

RPA	%Cz	%MV	%CF
1	3,62	80,35	16,02
2	3,64	81,19	15,17
3	3,52	81,24	15,46
4	3,94	79,89	16,17
6	3,72	79,87	16,41
Média Geral	3,69	80,51	15,90
DP	0,27	2,54	0,55
CV (%)	7,68	3,14	3,49

Portanto, decorrente da homogeneidade entre os valores obtidos para cada RPA, a química imediata da biomassa de poda é representada pelos seus teores médios (Figura 23).

Figura 23: Valores médios da análise química imediata da biomassa de poda urbana *in natura* da arborização urbana do Recife, Pernambuco



Para a biomassa de poda, foi encontrado um valor médio de cinzas igual a 3,69% da massa seca. Segundo Bezerra Neto e Barreto (2011), a quantidade de minerais que corresponde ao teor de cinzas dos vegetais está diretamente relacionada com a atividade metabólica dos diferentes órgãos da planta, sendo que os órgãos lenhosos apresentam baixos teores, enquanto que as folhas apresentam maiores conteúdos de minerais. Portanto, o alto teor de cinzas encontrados na biomassa de poda pode estar relacionado com a presença de folhas e cascas.

Além disso, outro fator que pode interferir no teor de cinzas é a contaminação com solos nas fases de corte, colheita, transporte e armazenamento da biomassa florestal. De acordo com Nogueira e Rendeiro (2008), ao expor à altas temperaturas uma grande quantidade de elementos minerais constituintes das cinzas pode ocorrer uma interferência no equipamento utilizado para a combustão da biomassa, levando à perda de eficiência no processo de troca de calor do equipamento.

Ao analisar o processo da poda realizada no Recife, pode-se observar que o material é cortado e depositado no solo (Figura 24), onde permanece até o momento da coleta e transporte da biomassa. Nesta etapa pode ocorrer a incorporação de elementos minerais e partículas do solo, e conseqüentemente, pode ter influenciado nos valores obtidos para o teor de cinza. Caso o material tenha sido contaminado com resíduos de silicatos, a lavagem da biomassa seria uma alternativa para eliminação de parte desses compostos que resultariam na redução da eficiência energética.

Figura 24: Etapa pós-corte da poda realizada em Recife/PE. A) Biomassa de poda após corte aguardando no solo para posterior trituração; B) Trituração da biomassa de poda



Fonte: O Autor.

Os teores de materiais voláteis e carbono fixo estiveram próximos aos que Brand (2010) aponta para madeira de espécies folhosas, sendo 81,42% e 17,82%, respectivamente. cuja variação pode ter sido relacionada à presença de folhas e cascas na composição da poda.

A biomassa de poda apresenta uma quantidade de compostos que pode proporcionar uma queima rápida devido à liberação destes durante o processo de combustão.

Como os materiais voláteis representam a quantidade de compostos que volatilizam com o aquecimento, seus teores influenciam na ignição e nas primeiras etapas de combustão da biomassa, sendo que quanto maior for o teor, mais fácil e rápido será o processo de ignição do combustível (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008; VIEIRA, 2012).

A biomassa de poda apresentou teor de materiais voláteis próximos aos de *pellets* de madeira de *Pinus*, com 81,29% (SPANHOL *et al.*, 2015), porém foram inferiores aos teores encontrados em biomassas lenhosas, como aos encontrados por Pereira *et al.* (2016) para cavacos de eucalipto, por Protásio *et al.* (2015) para *pellets* de madeira residual de *Pinus* e por Silva *et al.* (2015a) para madeira de *Eucalyptus benthamii*, que corresponderam à 86,86%, 84,5% e 83,98%, respectivamente.

Quando comparados com outras fontes de biomassa não lenhosas, os materiais voláteis foram semelhantes aos encontrados por Rocha, Perez e Cortez (2004) para bagaço de cana (79,70%), por Paula *et al.* (2011) para sabugo de milho (81,31%) e por Simeone *et al.* (2018) para *pellets* de sorgo (79,6%). Além disso, os teores foram superiores aos encontrados por Morais *et al.* (2011) para casca de arroz (64,24%), porém inferiores que os teores em resíduos

de soja encontrados por Vieira (2012) e em casca de pequi por Morais *et al.* (2016), que corresponderam a 89,90% e 85,26%, respectivamente.

A biomassa de poda apresenta uma pouca quantidade de carbono fixo, o que implica numa carbonização rápida do material. Esse teor baixo pode ser influenciado pela composição química estrutural.

Como relação inversa ao teor de substâncias voláteis, o teor de carbono fixo apresenta relação direta com o poder calorífico do combustível, pois ocorre a degradação da celulose e demais polioses da biomassa, fazendo com que sobressaia a concentração de lignina, que apresenta melhores características energéticas em relação aos demais componentes estruturais (VITAL *et al.*, 2013; SOARES *et al.*, 2014).

Portanto, caso haja um processo de aquisição da biomassa de poda sem resquícios de solo, que é o provável fator relacionado ao alto teor de resíduos minerais, esta poderia ser empregada para a geração de energia calorífica de acordo com as características da química imediata.

3.2.2. Carvão vegetal produzido com a biomassa de poda urbana

Quanto à química imediata do carvão de biomassa de poda (Tabela 04), não foi possível observar diferença estatística significativa entre as diferentes RPAs para todas as variáveis analisadas, de acordo com as análises de variância (Apêndices 06 a 11).

Tabela 04: Valores médios da análise química imediata do carvão da biomassa de poda urbana de Recife/PE, em função das Regiões Político-Administrativas (RPA)

RPA	%U	%RG	%Cz	%MV	%CF	%RCF	PCS (kcal.kg ⁻¹)
1	4,34	38,80	8,89	25,55	65,56	25,44	7115,50
2	4,81	39,32	9,25	25,07	65,68	25,83	7119,50
3	4,29	38,40	8,71	25,03	66,26	25,44	7138,94
4	4,11	38,48	9,29	26,13	64,57	24,84	7082,81
6	4,24	38,83	8,93	26,77	64,30	24,97	7073,66
Média Geral	4,36	38,77	9,01	25,71	65,27	25,30	7106,08
DP	0,78	0,58	0,67	2,12	1,86	0,78	-
CV (%)	17,92	1,49	7,45	8,25	2,85	3,08	-

Legenda: Teor de umidade (%U), rendimento gravimétrico (%RG), teor de cinzas (%Cz), teor de materiais voláteis (%MV), teor de carbono fixo (%CF), rendimento em carbono fixo (%RCF) e Poder Calorífico Superior (PCS)

Com rendimento de cerca de 39%, a conversão das 4500 toneladas de biomassa de poda adquiridas pela EMLURB resultaria em cerca de 1750 toneladas de carvão vegetal, a serem destinados à geração de energia calorífica e conversão em eletricidade.

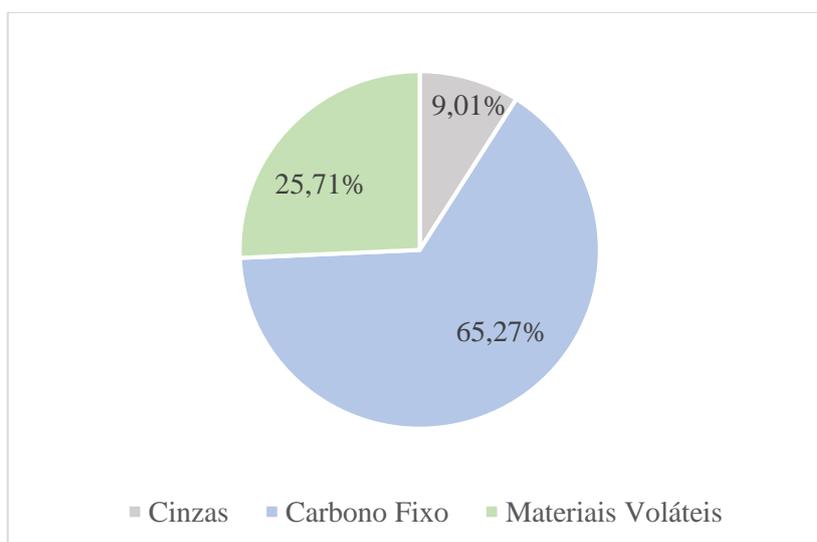
Esse rendimento da conversão da biomassa de poda em carvão vegetal é satisfatório, visto que outros materiais lenhosos apresentam valores semelhantes, geralmente entre 30% e 40%. De acordo com Silva (2016), quando se avalia a conversão da biomassa em carvão, o rendimento gravimétrico indica esse potencial, correlacionando as características de produtividade e qualidade em relação à química imediata.

O rendimento gravimétrico do carvão da biomassa poda foi superior aos encontrados para diferentes idades de clone de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* estudados por Assis *et al.* (2012), que apresentaram valores entre 30,0% e 32,97%, com rendimento médio de 31,63%. Apesar disso, este clone apresentou rendimento em carbono fixo de 25,09%, observando-se semelhança com obtidos para poda de Recife, com 25,30%.

O rendimento da poda foi superior aos valores encontrados pela ENGASP (2014) para poda de kiwi e madeira de *Pinus sp.*, com 9% e 16%, respectivamente; e por Silva *et al.* (2007) para resíduos de madeiras de maçaranduba, sapucaia e timborana, com 25,37%, 21,47% e 29,55%, respectivamente.

Assim como ocorreu na biomassa de poda *in natura*, foi possível observar homogeneidade entre os valores obtidos para cada RPA, portanto a química imediata do carvão vegetal da biomassa de poda é representada pelos seus teores médios (Figura 25).

Figura 25: Valores médios da análise química imediata do carvão vegetal de biomassa de poda da arborização urbana do Recife, Pernambuco



A presença de folhas e cascas, além da possibilidade de contaminação por partículas de solo, influenciaram na produção de um carvão com elevado teor de resíduos minerais, com cerca de 9% de sua composição. Esse alto teor de cinzas implica na redução do teor de carbono fixo no carvão da poda, além da possibilidade de diminuição do poder calorífico e consequente eficiência energética do material. Segundo Santos *et al.* (2016), altas quantidades de cinzas podem causar danos aos altos-fornos e, no setor siderúrgico, podem comprometer a qualidade dos produtos.

Como já destacada anteriormente, o fato de a biomassa ficar exposta ao solo durante o processo de poda pode ter contribuído para o alto teor de cinzas do carvão vegetal, além de que a presença de folhas e cascas na composição da biomassa de poda também podem ter alterado a quantidade de resíduos minerais. Portanto, a não colocação da biomassa no solo e a separação dos materiais lenhosos possivelmente contribuiriam para redução da quantidade de cinzas no carvão vegetal.

Em relação aos teores de materiais voláteis, o valor médio obtido para a poda urbana, 25,71%, foi superior aos encontrados por Miranda *et al.* (2017) para carvão de poda de cajueiro, que apresentou teor de 21%. Porém, foram inferiores a madeiras de *Eucalyptus* sp. avaliadas por Jesus *et al.* (2017), com valores entre 26% e 36%, e por Costa (2004) para biomassa de bambu, com teor médio de 29,33%.

Foi possível observar que após o processo de carbonização da biomassa houve redução na quantidade de materiais voláteis de 80,51% para 25,71% e aumento do teor de cinzas de 3,69% para 9,01%. Esse fenômeno foi causado pela redução da matéria orgânica durante a liberação de gases pela queima e fixação do carbono orgânico para conversão da biomassa em carvão.

Segundo Brand (2010), materiais com maiores teores de carbono fixo apresentarão combustão lenta, e poderão requerer mais tempo nos fornos até queima total. Portanto, a conversão da biomassa em carvão implica num combustível que apresenta alta durabilidade e potencial energético.

O carvão vegetal da biomassa de poda urbana apresentou um PCS de 7106,08 kcal.kg⁻¹, um valor superior à média para carvão vegetal, que é de 6800 kcal.kg⁻¹ (BRAND, 2010). Assim, tanto a composição de espécies, quando os diferentes órgãos da planta, podem ter contribuído para que o material apresentasse bom rendimento energético em função do PCS.

Caso fosse considerado o PCS do carvão vegetal (7106,08 kcal.kg⁻¹), com a produção anual de biomassa seca correspondente à 1750 toneladas, poderiam ser gerados 1,4x10⁷ kWh por ano, correspondendo então à 21,9% do consumo de energia para iluminação pública do

município. Fazendo então a relação com a taxa da CELPE, poderia ser poupada uma renda bruta de cerca de 10,0 milhões de reais nos gastos com energia elétrica na cidade do Recife.

Este resultado foi superior ao obtido quando estipulados os valores para a carbonização da biomassa de poda *in natura*. Portanto, a produção do carvão vegetal utilizando a biomassa de poda urbana da cidade do Recife seria melhor alternativa para geração de energia calorífica e elétrica.

3.3. Química estrutural da biomassa de poda

Quanto à química estrutural da biomassa de poda (Tabela 05), não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre as diferentes RPAs para os teores dos componentes da química estrutural da biomassa de poda, de acordo com as análises de variância (Apêndices 04, e 12 a 14).

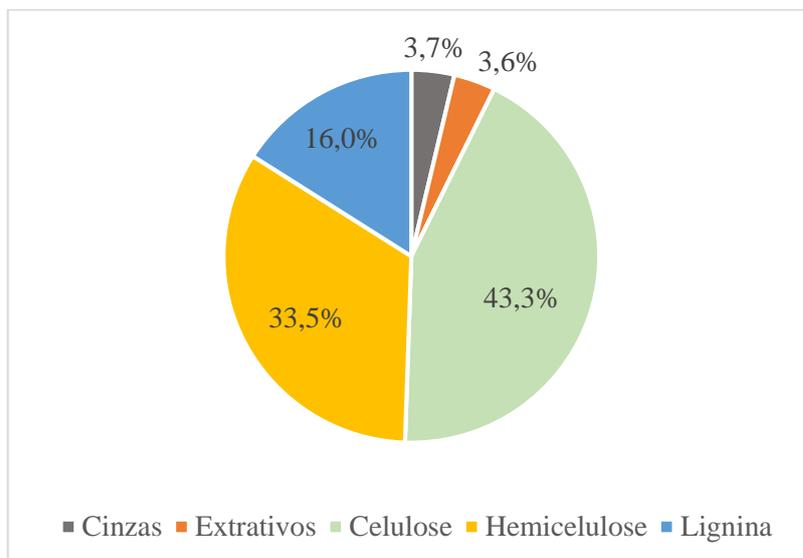
Tabela 05: Composição química estrutural da biomassa de poda urbana de Recife/PE, em função das Regiões Político-Administrativas (RPA)

RPA	Composição química estrutural média (%)					
	Cinzas	Extrativos	Holocelulose			Lignina*
			Celulose	Hemicelulose	Total	
1	3,62	3,44	44,45	32,01	76,46	16,48
2	3,64	3,81	42,93	34,02	76,95	15,60
3	3,52	3,70	42,96	33,69	76,65	16,13
4	3,94	3,90	42,86	33,84	76,70	15,46
6	3,72	3,06	43,14	33,83	76,97	16,25
Média Geral	3,69	3,58	43,27	33,48	76,75	15,98
DP	0,27	0,77	1,57	2,20	-	0,44
CV (%)	7,68	21,48	3,64	6,58	-	2,74

*Obtido por diferença: %Lig = 100 - %Cz - %Ext - %Holo

Dentre os componentes estruturais da biomassa de poda, os valores obtidos para os extrativos apresentaram variabilidade média (CV = 21,48%), sendo que os demais componentes obtiveram baixa variabilidade entre os valores obtidos para cada RPA. A composição química estrutural da biomassa de poda está apresentada na Figura 26.

Figura 26: Composição química estrutural da biomassa de poda da arborização urbana do Recife, Pernambuco



O teor de extrativos da biomassa de poda correspondeu a 3,58%, sendo que, segundo Brand (2010), apesar de corresponder à uma pequena porcentagem, as substâncias que compõem os extrativos apresentam maior poder calorífico que os demais constituintes da biomassa, e juntamente com a lignina, têm alta produção de calor durante a combustão.

Em relação a outros componentes de biomassas, os teores de extrativos da biomassa de poda se comportaram de maneira semelhante aos encontrados por Cipriano (2015), que corresponderam a 3% em fibras de madeira mista e bagaço de cana.

Quanto à holocelulose, a biomassa de poda apresentou teor médio correspondente à 76,75%, sendo 43,27% de celulose e 33,48% de hemicelulose. Apesar deste material ser composto por lenho, casca e folhas, ambos os resultados corroboram com Klock e Andrade (2013), que descreveram que as espécies folhosas apresentam em sua madeira teores de celulose e hemicelulose de $45\pm 2\%$ e $30\pm 5\%$, respectivamente.

Quando comparados com outras fontes de biomassa, a biomassa de poda apresentou teores de holocelulose semelhantes aos de capim elefante e bambu, com 74,15% e 73,67%, respectivamente (MACEDO; ROUSSET; VALE, 2014).

Em relação à lignina, segundo Klock e Andrade (2013), as madeiras de espécies folhosas podem apresentar um teor de $20\pm 4\%$ deste componente estrutural. Mesmo contendo outros elementos além da madeira, como casca e folhas, a biomassa de poda apresentou um teor médio de lignina de cerca de 16%, corroborando com os resultados apresentados pelos autores.

A biomassa de poda apresentou teor de lignina inferior em relação à diferentes clones de *Eucalyptus* sp. com teor médio de 17,79% (BOTREL *et al.*, 2010), e entre 17,12% e 20,0%

(TEIXEIRA *et al.*, 2016). Porém, ao comparar com outras biomassas, o teor de lignina da biomassa de poda foi inferior aos valores encontrados por Macedo, Rousset e Vale (2014) para casca de arroz, bagaço de cana, casca de pinhão-manso, capim elefante e bambu, que variou entre 23,2% e 27,0%.

Segundo Santos *et al.* (2011), a quantidade de lignina na biomassa está diretamente relacionada com sua conversão durante o processo de carbonização, no qual o carvão apresentará maior presença de estruturas condensadas decorrentes da lignina.

3.4. Química elementar da biomassa de poda

Para os valores obtidos em relação à química elementar da biomassa de poda (Tabela 06), não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre as diferentes RPAs para os teores de nitrogênio e enxofre da biomassa de poda, de acordo com as análises de variância (Apêndices 16 e 17). Os teores de carbono, fósforo, potássio, cálcio e sódio apresentaram diferença estatística significativa (Apêndices 15, e 18 a 21). Portanto, para esses elementos, a heterogeneidade em relação aos diferentes espécies e órgãos que compõem os restolhos de poda interfere em seus teores.

Tabela 06: Composição química elementar da biomassa de poda urbana de Recife/PE, em função das Regiões Político-Administrativas (RPA)

RPA	Composição química elementar média (%)										
	C	H*	O**	N	S	ELEMENTOS MINERAIS					Relação C/N
						P	K	Ca	Na	Outros	
1	36,22bc	5,87	53,10	1,18	0,18	0,17 ^a	0,51a	0,46a	0,15b	2,16	30,69
2	38,37ab	5,87	50,80	1,08	0,24	0,15b	0,49ab	0,46a	0,15b	2,39	35,53
3	35,43c	5,87	54,29	0,88	0,19	0,13c	0,45c	0,41b	0,16a	2,20	40,26
4	37,60bc	5,87	51,74	1,01	0,20	0,15bc	0,46bc	0,42b	0,15b	2,40	37,23
6	40,75a	5,87	48,86	0,90	0,20	0,14b	0,47bc	0,42b	0,14b	2,25	45,28
Média Geral	37,67	5,87	51,76	1,01	0,18	0,15	0,48	0,43	0,15	2,28	37,80
DP	2,26	-	-	0,14	0,04	0,02	0,03	0,03	0,01	-	-
CV(%)	6,01	-	-	13,42	20,44	11,01	5,79	6,84	6,08	-	-

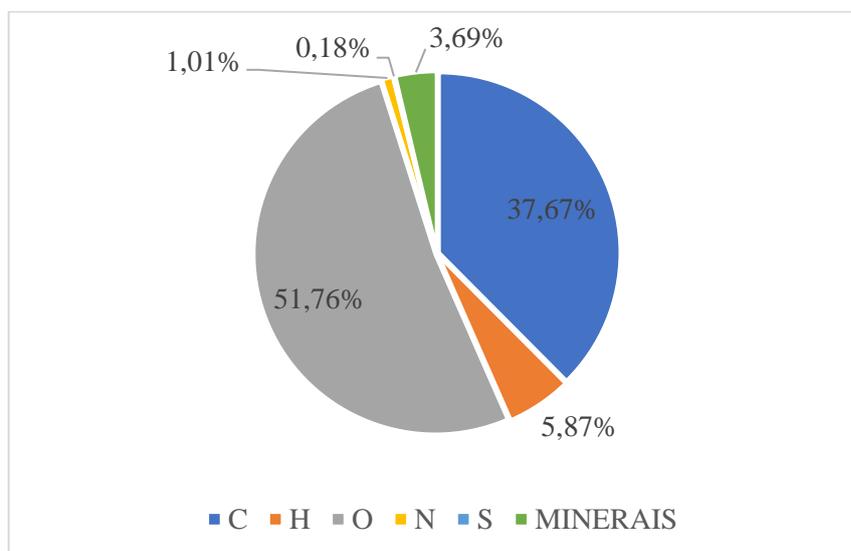
Médias seguidas de mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey à 95% de probabilidade.

*Adotado o teor médio de hidrogênio na biomassa de folhosas segundo Brand (2010).

**Obtido por diferença: O = 100 - (C + H + N + S + %Cz)

Assim sendo, a composição química elementar média da biomassa de poda está apresentada na Figura 27.

Figura 27: Composição química elementar da biomassa de poda da arborização urbana do Recife, Pernambuco



A biomassa de poda apresentou uma quantidade carbono e hidrogênio correspondente à 43,54%, sendo esta a quantidade de elementos que participarão do processo de combustão, pois são relacionados com a produção de calor.

Os demais elementos orgânicos (O, N e S) correspondem à cerca de 53% da composição elementar da biomassa de poda, e serão estes liberados na forma de gases durante a combustão.

Carbono e oxigênio constituem quase que totalmente a composição química da lignina e, por isso, dentre os compostos estruturais, são os que proporcionam maior poder calorífico. Além disso, a biomassa apresenta mais de 80% da sua composição formada por carbono e oxigênio (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). Tal comportamento foi observado para a biomassa de poda, visto que os dois elementos representaram uma média próxima a 90%.

O teor de carbono encontrado para a biomassa de poda (37,67%) se apresentou bem abaixo do que se espera para a biomassa de espécies folhosas, que segundo Brand (2010), apresentam em média 49% de carbono nos materiais lenhosos. O fato de a biomassa de poda conter cascas e folhas pode ter influenciado nos teores do elemento, apesar de que a casca apresenta maiores teores de carbono do que a madeira de espécies folhosas, e pode influenciar na produção de energia devido à necessidade de fixação do elemento na carbonização e na combustão total.

Além disso, contribuiu pra uma relação C/N acima de 30, o que contribui pra uma menor liberação de nitrogênio para a atmosfera, necessitando de maior fixação de carbono para evitar a liberação de grande quantidade de CO₂.

Como os elementos minerais apresentam ponto de fusão elevado, a composição das cinzas não influencia diretamente na combustão da biomassa, apesar de o teor total de minerais influenciar nos teores de carbono fixo e na eficiência energética, como já discutido anteriormente.

4. CONCLUSÃO

Sobre a caracterização da biomassa de poda urbana da cidade do Recife/PE, pode-se concluir que:

- A composição da biomassa referente às diferentes espécies interferiu apenas nos teores de elementos minerais e de carbono. As demais características não foram influenciadas pelo local.
- Quanto às propriedades físicas, apresenta alto teor de umidade, há necessidade de uma secagem prévia para geração de energia, e poder calorífico suficiente para produção de energia calorífica e conversão em energia elétrica.
- Houve a redução dos teores de materiais voláteis e aumento do teor de cinzas após o processo de carbonização. Além disso, apresenta alto rendimento para produção de carvão.
- A biomassa de poda apresentou alto teor de cinzas, o que pode comprometer a durabilidade dos fornos para conversão em energia.
- Quanto à química estrutural, a biomassa apresenta altos teores de holocelulose e teores dentro do recomendado de extrativos e lignina.
- O uso da biomassa de poda pode gerar $7,6 \times 10^6$ kWh na cidade do Recife, contribuindo com cerca de 12% do consumo de energia para iluminação pública, o que resultaria em uma economia de cerca de 5,6 milhões de reais nos gastos com energia elétrica no município.
- Com a biomassa de poda seca poderiam ser gerados $1,1 \times 10^7$ kWh, contribuindo com cerca de 17,2% do consumo de energia para iluminação pública, o que resultaria em uma economia de cerca de 8,1 milhões de reais nos gastos com energia elétrica no município.
- A conversão da biomassa de poda em carvão vegetal tem potencial para geração de $1,4 \times 10^7$ kWh por ano, contribuindo com 21,9% do consumo de energia para iluminação pública do município, o que resultaria em uma economia de cerca de 10,0 milhões de reais nos gastos com energia elétrica na cidade do Recife.
- A conversão da biomassa de poda urbana em carvão e seu uso energético é a melhor alternativa para geração de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14853**: determinação do material solúvel em etanol-tolueno e em diclorometano e em acetona. Rio de Janeiro: ABNT, 2010. 3p.
-
- _____. **NBR 8112**: Carvão Vegetal – Análise Imediata. Rio de Janeiro: ABNT, 1986. 5p.
-
- _____. **NBR NM45**: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, abr. 2006.
- ABTCP. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA TÉCNICA DE CELULOSE E PAPEL. **Normas técnicas ABCP**. São Paulo: ABTCP, 1974. Np.
- AGROICONE. **Oportunidades para florestas energéticas na geração de energia no Brasil**. Relatório final 05ACN0115 R00. Curitiba: AGROICONE/IMPULS, 2015. 56p.
- APHA. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; AWWA. AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; WEF. WATER ENVIRONMENT FEDERATION. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**. 21ª ed. Washington, D.C: USA, 2005. Np.
- ARAÚJO, E. C. G.; SILVA, T. C.; COELHO, J. B. M.; BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. Determinação de carbono em amostra vegetal pelo método volumétrico com diferentes volumes de ácido sulfúrico. In: X Simpósio Brasileiro de Pós-Graduação em Ciências Florestais, 13 a 15 de junho de 2018, Natal/PE. **Anais...** Natal: X Simpósio, 2018.
- ASSIS, M. R.; PROTÁSIO, T. P.; ASSIS, C. O.; TRUGILHO, P. F.; SANTANA, W. M. S. Qualidade e rendimento do carvão vegetal de um clone híbrido de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 71, p. 291-302, jul./set. 2012.
- BDE. BASE DE DADOS DO ESTADO DE PERNAMBUCO. **Consumo de energia elétrica**. Governo do Estado de Pernambuco, 2017. Disponível em: <http://www.bde.pe.gov.br/visualizacao/Visualizacao_formato2.aspx?CodInformacao=416&Cod=3>; Acesso em: 30/11/2018.
- BEN. **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL**. 2018. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>>. Acesso em: 30 nov. 2018.
- BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Recife: UFRPE, Editora Universitária da UFRPE, 2011. 267p.
- BOTREL, M. C. G.; TRUGILHO, P. F.; ROSADO, S. C. S.; SILVA, J. R. M. Seleção de clones de *Eucalyptus* para biomassa florestal e qualidade da madeira. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 38, n. 86, p. 237-245, jun. 2010.
- BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.

BRAND, M. A.; STÄHELIN, T. S. F.; FERREIRA, J. C. NEVES, M. D. Produção de biomassa para geração de energia em povoamentos de *Pinus taeda* L. com diferentes idades. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.38, n.2, p.353-360, 2014.

BROWNING, B. L. **The chemistry of wood**. New York: Interscience, 1963. 574p.

CELPE. **Companhia Energética de Pernambuco**. Disponível em: <<http://servicos.celpe.com.br/Pages/index.aspx>>; Acesso em: 30 jan. 2019.

CIPRIANO, D. F. **Análise quantitativa dos teores de lignina e celulose em materiais de biomassa por RMN de ¹³C no estado sólido**. Dissertação (Mestrado em Física). Vitória: UFES, 2015. 110f.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Caracterização da biomassa. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. P. 31-52.

COSTA, T. M. S. **Estudo da viabilidade técnica do emprego do bambu da espécie *Bambusa vulgaris* Shard. Como carvão vegetal**. Dissertação (Mestre em ciências na área de Tecnologia Nuclear-Materiais). São Paulo: USP, 2004. 74 f.

EMLURB. EMPRESA DE LIMPEZA URBANA DO RECIFE. **Relatório do aproveitamento de restos de poda urbana do Recife para o processo de compostagem - 2016**. Recife: EMLURB/PCR, 2017. 7p.

ENGASP. **Estudo do poder calorífico de biomassa agrícola e florestal carbonizado pelo processo de pirólise**. Projeto n.º 34001. Portugal: Ibero Massa Florestal, Lda, 2014. 49p.

EUFRADE JUNIOR, H. J. **Caracterização físico-química da biomassa produzida em sistemas florestais de curta rotação para geração de energia**. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Botucatu: UNESP, 2015. 118 f.

FERREIRA, I. T. M.; SCHIMER, W. N.; MACHADO, G. O.; GUERI, M. V. D. Estimativa do potencial energético de resíduos celulósicos da fabricação de papel através de análise imediata. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 3, p. 284-297, 2014.

GOLDEMBERG, J.; PALETTA, F. C. (Org.). **Energias Renováveis**. São Paulo: Blucher, 2012. 110p.

IPT. INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório Anual**. São Paulo: Secretaria de Desenvolvimento do Estado de São Paulo, 2009. 106p.

JESUS, M. S.; COSTA, L. J.; FERREIRA, J. C.; FREITAS, F. P.; SANTOS, L. C.; ROCHA, M. F. V. Caracterização energética de diferentes espécies de *Eucalyptus*. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 47, n. 1, p. 11-16, jan./mar. 2017.

KLOCK, U.; J. A.; ANDRADE, A. S. **Química da madeira**. 4. ed., revisada. Curitiba: UFPR, 2013. 85p.

MACEDO, L. A.; ROUSSET, P. L. A.; VALE, A. T. Influência da composição da biomassa no rendimento em condensáveis da torrefação de resíduos vegetais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 80, p. 417-424, out./dez. 2014.

MIRANDA, N. O.; PIMENTA, A. S.; SILVA, G. G. C.; OLIVEIRA, E. M. M.; CARVALHO, M. A. B. Biochar as soil conditioner in the succession of upland rice and cowpea fertilized with nitrogen. **Revista da Caatinga**, Mossoró, v. 30, n. 2, p. 313-323, abr./jun. 2017.

MORAIS, M. J.; OLIVEIRA, M. S.; BARBOSA, E. G.; CRUZ, G. H. T. Caracterização da casca de pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.) para sua utilização como biomassa. In: III Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão da UEG, 19 a 21 de outubro de 2016. **Anais...** Pirenópolis: III CEPE/UEG, 2016.

MORAIS, M. R.; SEYE, O.; FREITAS, K. T.; RODRIGUES, M.; SANTOS, E. C. S.; SOUZA, R. C. R. **Obtenção de briquetes de carvão vegetal de cascas de arroz utilizando baixa pressão de compactação**. 2011. Disponível em: <<http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v2/089.pdf>>. Acesso em: 05 dez. 2018.

MOREIRA, E. B. M.; GALVÍNCIO, J. D. Espacialização das temperaturas à superfície na cidade do Recife, utilizando imagens TM-LANDSAT 7. **Revista de Geografia**, Recife, v. 24, n. 3, p. 101-115, set./dez. 2007.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. Caracterização energética da biomassa vegetal. In: BARRETO, E. J. F. (Coord). **Combustão e gaseificação da biomassa sólida: soluções energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

NONES, D. L.; BRAND, M. A.; AMPRESSAN, C. G. M.; FRIEDERICHS, G. Biomassa residual agrícola e florestal na produção de compactados para geração de energia. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v. 16, n. 2, p. 155-164, 2017.

PAULA, L. E. R.; TRUGILHO, P. F.; NAPOLI, A.; BIANCHI, M. L. Characterization of residues from plant biomass for use in energy generation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 2, p. 237-246, abr./jun. 2011.

PEDROSA, T. D.; FARIAS, A. S.; PEREIRA, R. A.; FARIAS, E. T. R. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos na compostagem de resíduos agroindustriais. **Nativa**, Sinop, v. 01, n. 01, p. 44-48, out./dez. 2013.

PEREIRA, M. P. C. F.; COSTA, E. V. S.; PEREIRA, B. L. C.; CARVALHO, A. M. M. L. C.; CARNEIRO, A. C. O.; COSTA, A. Torrefação de cavacos de eucalipto para fins energéticos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 36, n. 87, p. 269-275, jul./set. 2016.

PREFEITURA DO RECIFE. **Atlas Municipal**: Mapa das RPAs. Recife: Desenvolvimento Humano do Recife, 2005. Disponível em: <https://www.recife.pe.gov.br/pr/secplanejamento/pnud2005/mapa_rpas.jpg>; Acesso em: 14 nov. 2018.

PROTÁSIO, T. P.; ALVES, I. C. N.; TRUGILHO, P. F.; SILVA, V. O.; BALIZA, A. E. R. Comparação da biomassa vegetal visando à produção de biocombustíveis sólidos. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 31, n. 68, p. 273-283, out./dez. 2011.

PROTÁSIO, T. P.; TRUGILHO, P. F.; SIQUEIRA, H. F.; NOGUEIRA, MELO, I. C. N. A.; ANDRADE, C. R.; GUIMARÃES JUNIOR, J. B. Caracterização energética de *pellets in natura* e torreficados produzidos com madeira residual de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 435-442, out./dez. 2015.

ROCHA, J. D.; PÉREZ, J. M. M.; CORTEZ, L. A. B. **Aspectos teóricos e práticos do processo de pirólise de biomassa**. Curso - Energia na Indústria de Açúcar e Alcool. Itajubá: UNIFEI, 2004. 22p.

SACRAMENTO, B. H.; NONAKA, F. M.; COSTA, L. R. L.; SHIRAIISHI, I. S.; BOSCO, T. C. D. Degradação de podas de árvores, resíduos orgânicos alimentares, palitos de fósforo e guardanapos usados por meio do processo de vermicompostagem. In: Fórum Internacional de Resíduos Sólidos, 8, 2017, Curitiba. **Anais...** Curitiba: UTFPR, 2017.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; CASTRO, A. F. M.; CASTRO, R. V. O.; BIANCHE, J. J.; SOUZA, M. M.; CARDOSO, M. T. Correlações entre os parâmetros de qualidade da madeira e do carvão vegetal de clones de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 90, p. 221-230, 2011.

SANTOS, R. C.; CARNEIRO, A. C. O.; VITAL, B. R.; CASTRO, R. V. O.; VIDAURRE, G. B.; TRUGILHO, P. F.; CASTRO, A. F. N. M. Influência das propriedades químicas e da relação siringil/guaiacil da madeira de eucalipto na produção de carvão vegetal. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 657-669, 2016.

SCREMIN, A. L. T. **Estudo energético e fisicoquímico do carvão vegetal de *Eucalyptus dunnii* Maiden**. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, 2012. 103f.

SILVA, D. A.; MÜLLER, B. V.; KUIASKI, E. C.; ELOY, E.; BEHLING, A.; COLAC, C. M. Propriedades da madeira de *Eucalyptus benthamii* para produção de energia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 35, n. 84, p. 481-485, out./dez. 2015a.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2ª Ed. Brasília: EMBRAPA, 2009. 627p.

SILVA, M. G.; NUMAZAWA, S.; ARAUJO, M. M.; NAGAISHI, T. Y. R.; GALVÃO, G. R. Carvão de resíduos de indústria madeireira de três espécies florestais exploradas no município de Paragominas, PA. **Acta Amazônica**, v. 37, n. 1, p. 61-70, 2007.

SILVA, T. C. **Potencial antifúngico de extratos de casca de três espécies arbóreas da caatinga sobre *Ganoderma sp.*** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal). Recife: UFRPE, 2016. 71f.

SILVA, T. C.; ARAUJO, E. C. G.; FRANÇA, P. H. T.; BARRETO, L. P. Determinação dos componentes estruturais da madeira de angico-do-cerrado. In: II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira, 20 a 22 de setembro de 2015, Belo Horizonte/MG. **Anais...** Belo Horizonte: II CBCTEM, 2015b.

SIMEONE, M. L. F.; PARRELLA, R. A. C.; MAY, A.; SCHAFFERT, R. E. Produção e caracterização de *pellets* de sorgo biomassa. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v. 2, n. 5, p. 1682-1695, out./dez. 2018.

SOARES, V. C.; BIANCHI, M. L.; TRUGILHO, P. F.; PEREIRA, A. J.; HÖFLER, J. Correlações entre as propriedades da madeira e do carvão vegetal de híbridos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 3, p. 543-549, 2014.

SPANHOL, A.; NONES, D. L.; KUMABE, F. J. B.; BRAND, M. A. Qualidade dos *pellets* de biomassa florestal produzidos em Santa Catarina para a geração de energia. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 45, n. 4, p. 833-844, out./dez. 2015.

TEIXEIRA, C. M.; MARTINS, M. P.; YAMAMOTO, H.; CHRISOSTOMO, W.; YAMAJI, F. M. Caracterização química de resíduos de *Eucalyptus sp.* de floresta de curta rotação para a produção de bioenergia. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 5, p. 1693-1701, 2016.

VALE, A. T.; ABREU, V. L. S.; GONÇALEZ, J. C.; COSTA, A. F. Estimativa do Poder Calorífico Superior do carvão vegetal de madeiras de *Eucalyptus grandis* em função do teor de carbono fixo e do teor de material volátil. **Revista Brasil Florestal**, n. 73, 2002.

VAZ JÚNIOR, S. **Análise química da biomassa**. Brasília: Embrapa, 2015. 146p.

VIEIRA, A. C. **Caracterização da biomassa proveniente de resíduos agrícolas para geração de energia**. Dissertação (Mestrado em Energia na Agricultura). Cascavel: UNIOESTE, 2012. 56f.

VITAL, B. R.; CARNEIRO, A. C. O.; PEREIRA, B. L. C. Qualidade da madeira para fins energéticos. In: SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. H. (Eds.). **Bioenergia & Biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais**. Viçosa: Ed. da UFV, 2013. 321-354p.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 350p.

CAPÍTULO 2

PRODUÇÃO DE BIOGÁS UTILIZANDO BIOMASSA DE PODA E LODO DE ESGOTO

RESUMO

A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos culmina na melhor administração dos materiais que muitas vezes são desprezados sem avaliação prévia do seu reuso ou reciclagem, além do fato de que muitas vezes geram acúmulos nos aterros e alteram a sua composição química. Uma das formas de reutilização dos resíduos sólidos urbanos orgânicos, como os resíduos da poda, é a transformação desse material em fertilizante. A cidade do Recife, em Pernambuco, apresenta produção em volume de biomassa de poda considerável, portanto seria importante avaliar o potencial dessa fonte de biomassa para a produção de biogás, visto que também há como resíduo final um biofertilizante com boas características nutricionais. O objetivo deste capítulo foi avaliar a produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbia da biomassa de poda utilizando lodo como inóculo, além de comparar as características químicas dos fertilizantes adquiridos pelos processos aeróbios e anaeróbios. Para tal, a matéria-prima utilizada como substrato foi constituída por lodo de esgoto da estação de tratamento de efluentes da Reserva Camará, em Camaragibe, e biomassa de poda da cidade de Recife, Pernambuco. Os experimentos foram realizados em laboratório, onde foram avaliadas diferentes composições entre biomassa de poda, lodo de esgoto e água, a fim de se determinar qual a composição entre biomassa de poda e lodo de esgoto apresentaria melhor eficiência para produção de biogás. Para simular as condições em campo, os biodigestores foram mantidos em temperatura ambiente e ausência de iluminação. Os gases liberados foram analisados em cromatógrafo para determinar os teores de metano produzidos. Tanto o fertilizante do processo de compostagem realizado pela EMLURB quanto o biofertilizante da digestão anaeróbia foram caracterizados quimicamente em relação aos macronutrientes, carbono e relação C/N. Como resultados, a composição T8 (12,5% biomassa de poda, 37,5% lodo e 50% água) foi a que apresentou maiores produções de metano. Caso optasse por estas condições, a biomassa de poda coletada na cidade do Recife apresentaria potencial para gerar 40,2 MWh de energia elétrica a partir da biodigestão anaeróbia e produção de metano. Portanto, convertendo tais valores para relação financeira do processo, observando-se que a taxa cobrada pela CELPE (Companhia Elétrica de Pernambuco), em janeiro de 2019, corresponde à R\$ 0,72 por kWh consumido, caso optasse pela geração de energia do biogás obtido pela biodigestão da biomassa de poda, poderia ser poupada uma renda bruta de cerca de 29,6 mil reais ao ano nos gastos com energia elétrica no município. Em relação à produção do biofertilizante, os processos de compostagem e digestão anaeróbia apresentaram compostos com relação C/N de 9,7 e 18,6, respectivamente, não diferindo nos teores de N, K, P e Ca. Sendo assim, considerando os investimentos para instalação de biodigestões e para manutenção do processo, a produção de biogás com este material deixaria um déficit nas contas públicas, devendo-se desenvolver novas pesquisas para melhoria da eficiência e da produção para gerar energia elétrica.

Palavras-chave: energia de biomassa; biodigestão anaeróbia; metano; biofertilizantes

ABSTRACT

Proper management of municipal solid waste culminates in better management of materials that are often neglected without prior evaluation of their reuse or recycling, as well as the fact that they often generate accumulations in landfills and alter their chemical composition. One way to reuse organic solid waste, such as pruning stubble, is to convert this material into fertilizer. The city of Recife, in Pernambuco, presents considerable volume production of pruning biomass, so it would be important to evaluate the potential of this source of biomass for the production of biogas, since there is also as a final residue a biofertilizer with good nutritional characteristics. The objective of this chapter was to evaluate the biogas production from the anaerobic biodigestion of the pruning biomass using sludge as inoculum, in addition to comparing the chemical characteristics of the fertilizers acquired by the aerobic and anaerobic processes. For this purpose, the raw material used as substrate was composed of sewage sludge from the effluent treatment plant of the Camará Reserve in Camaragibe and pruning biomass from the city of Recife, Pernambuco. The experiments were carried out in the laboratory, where different compositions were evaluated between pruning biomass, sewage sludge and water, in order to determine which composition between pruning biomass and sewage sludge would present better efficiency for biogas production. To simulate the field conditions, the biodigesters were kept at room temperature and no lighting. The gases released were analyzed in a chromatograph to determine the methane contents produced. Both the fertilizer of the composting process carried out by EMLURB and the biofertilizer of the anaerobic digestion were characterized chemically in relation to the macronutrients, carbon and C/N ratio. As a result, the composition T8 (12.5% pruning biomass, 37.5% sludge and 50% water) was the one with the highest methane production. In case of opting for these conditions, pruning biomass collected in the city of Recife would have the potential to generate 40.2 MWh of electricity from anaerobic biodigestion and methane production. Therefore, converting these values to the financial relation of the process, observing that the rate charged by CELPE (Companhia Elétrica de Pernambuco) in January 2019 corresponds to R \$ 0.72 per kWh consumed, if it chose to generate energy from the biogas obtained by biodigestion of pruning biomass, a gross income of about 29.6 thousand reais on year could be saved in electric energy expenditures in the municipality. In relation to the biofertilizer production, the composting and anaerobic digestion processes presented compounds with a C/N ratio of 9.7 and 18.6, respectively, with no difference in N, K, P and Ca contents. Therefore, considering the investments to install biodigestions and to maintain the process, the production of biogas with this material would leave a deficit in the public accounts, and new research should be developed to improve efficiency and production to generate electricity.

Keywords: biomass energy; anaerobic biodigestion; methane; biofertilizers

1. INTRODUÇÃO

A gestão adequada dos resíduos sólidos urbanos culmina na melhor administração dos materiais que muitas vezes são desprezados sem avaliação prévia do seu reuso ou reciclagem, além do fato de que muitas vezes geram acúmulos nos aterros e alteram a sua composição química.

Quanto à reciclagem de resíduos sólidos urbanos, há uma viabilização para uso dos gases liberados no processo de decomposição da matéria orgânica, denominado biogás. Na composição do biogás se encontram em maiores concentrações o metano e dióxido de carbono, sendo o primeiro uma importante fonte energética, além de seu uso para este fim contribuir para a diminuição das concentrações desse gás na atmosfera (TEIXEIRA JUNIOR, 2016). Portanto, quando avaliado como fonte de energia, o biogás está relacionado com sustentabilidade por ser obtido a partir de matérias-primas que são rejeitos das atividades agroindustriais e atividades urbanas.

Em relação ao Brasil, até pouco tempo, o biogás era tratado apenas como subproduto do processo de decomposição anaeróbia dos resíduos urbanos e de animais e dos rejeitos de estações de tratamento de efluentes domésticos (GOLDEMBERG; PALETTA, 2012). Porém, a partir de diversos estudos com estas matérias, foi possível perceber o potencial dessas fontes de matéria-prima que apresentam características econômicas viáveis e atrativas ao seu uso para fomentar a produção e consumo de energias renováveis.

Segundo Abreu (2014), quando se avalia um projeto de produção de biogás, a composição do material a ser digerido é um dos fatores mais importantes a ser levado em consideração, principalmente quanto à fração orgânica do composto, pois servirá como fonte nutricional para ocorrência dos processos biológicos de decomposição.

Desse modo, a disponibilidade de biomassa para ser utilizada no processo de produção de gases com potencial energético está ligada à alta produção de resíduos das mais diversas atividades. Os resíduos que compõem a biomassa de origem agrícola e florestal apresentam características viáveis para geração de energia das mais diversas formas para a conversão em energia calorífica ou elétrica (CORTEZ *et al.*, 2008; BRAND, 2010), sendo a poda uma das atividades geradoras de resíduos na área urbana.

Na cidade do Recife, em Pernambuco, anualmente pode-se ter uma produção de biomassa de poda superior a 4500 toneladas (EMLURB, 2017). Em 2006, foi implementado um programa de gerenciamento dos resíduos da prática da poda na área urbana, que resulta em material utilizado num processo de digestão aeróbia para produção de fertilizante que é

utilizado para melhoria nutricional das áreas verdes e da arborização urbana em geral da cidade. Portanto, seria importante avaliar o potencial dessa fonte de biomassa para a produção de biogás, visto que também há como resíduo final um biofertilizante com boas características nutricionais.

Sendo assim, o objetivo deste capítulo foi avaliar a produção de biogás a partir da biodigestão anaeróbia da biomassa de poda utilizando lodo como inoculante, além de comparar as características químicas dos fertilizantes adquiridos pelos processos aeróbios e anaeróbios. Os objetivos específicos foram: analisar, quantificar e caracterizar os gases formados a partir da digestão anaeróbia; caracterizar e comparar nutricionalmente os fertilizantes formados pelas digestões aeróbia e anaeróbia da biomassa de poda; estimar a produção de composto por digestão aeróbia e anaeróbia; e estimar a produção de biogás e avaliar alguns aspectos econômicos desta atividade.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Inoculação dos substratos para digestão anaeróbia

A matéria-prima utilizada como substrato foi constituída por lodo de esgoto da estação de tratamento de efluentes da Reserva Camará, em Camaragibe, e biomassa de poda da cidade de Recife, Pernambuco, coletada junto à EMLURB/PCR.

Foram coletadas amostras de biomassa de poda devidamente trituradas em um caminhão triturador ainda verde, após corte. Como características, a biomassa de poda do Recife é constituída em sua grande maioria por lenho e casca de galhos e folhas, pois os materiais lenhosos com maiores dimensões são separados e não são triturados. Nas coletas realizadas pela EMLURB são misturadas todas as espécies podadas, portanto as amostras desse trabalho apresentam essa característica.

Para o experimento, foram coletadas três amostras contendo cerca de 50 kg cada, que foram devidamente homogeneizadas e constituíram uma amostra composta, que foi seca em estufa de aeração regulada à $65^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$ por um período de 48-72 horas, e posteriormente o material foi moído em moinho de facas com peneira de seleção de partículas de 2,0 mm (BEZERRA NETO; BARRETO, 2011).

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Microbiologia, Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco.

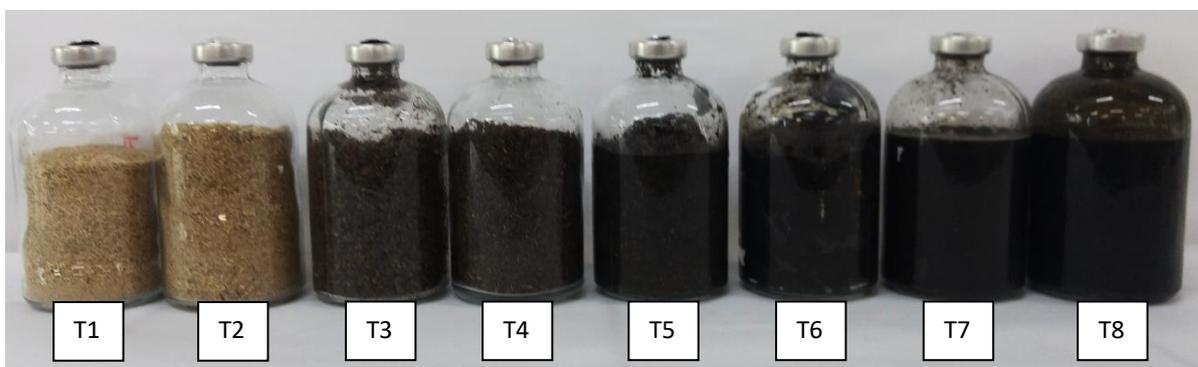
Os biodigestores utilizados no processo foram esquematizados em frascos de penicilina com capacidade total de 100 mL, utilizando-se seringas de 10 mL para armazenamento dos gases produzidos. A massa total de substrato constituiu percentual inferior a 80% do recipiente.

A fim de determinar qual a composição entre biomassa de poda e lodo de esgoto apresentaria melhor eficiência para produção de biogás, foram avaliados tratamentos com substratos de composições diferentes (Tabela 07). Os substratos que continham as combinações de biomassa de poda e lodo de esgoto se apresentaram muito sólidos, portanto foram criados outros substratos contendo água na composição (Figura 28).

Tabela 07: Composição percentual e massa total inoculada nos biodigestores.

Código do Biodigestor	Composição percentual em massa (%)			Massa total (g)
	Biomassa de poda	Lodo de esgoto	Água destilada	
T1	100	0	0	30
T2	75	25	0	30
T3	50	50	0	30
T4	25	75	0	80
T5	0	100	0	80
T6	37,5	12,5	50	40
T7	25	25	50	80
T8	12,5	37,5	50	80

Figura 28: Biodigestores utilizados para produção de biogás a partir de biomassa de poda urbana e lodo de esgoto



Fonte: O Autor.

Durante o processo de preparo, os substratos tiveram seu pH inicial corrigidos utilizando solução de NaOH a 3N para um pH mais neutro, numa faixa entre 7,2 e 8,0 (Tabela 08). Os tratamentos T1 e T2 não apresentaram líquido suficiente para aferição e correção do pH, pois a umidade do lodo adicionado foi incorporada à biomassa de poda, não sendo possível realizar a análise utilizando pHmetro.

Tabela 08: Calibragem do pH dos biodigestores

Código do biodigestor	pH inicial	pH final
T1	-	-
T2	-	-
T3	6,63	7,63
T4	6,87	7,90
T5	6,98	7,65
T6	6,46	7,28
T7	6,46	7,84
T8	7,54	7,54

Após inoculação do substrato nos frascos, estes foram devidamente tampados com tampas de borracha e lacrados com lacre metálico. Depois de totalmente vedados, todos os gases foram retirados com seringa até estado de vácuo.

A fim de simular as condições em campo, os biodigestores foram mantidos em temperatura ambiente e foram cobertos com papel alumínio para ausência de iluminação (Figura 29).

Figura 29: Biodigestor devidamente lacrado em simulação das condições de campo



Fonte: O Autor.

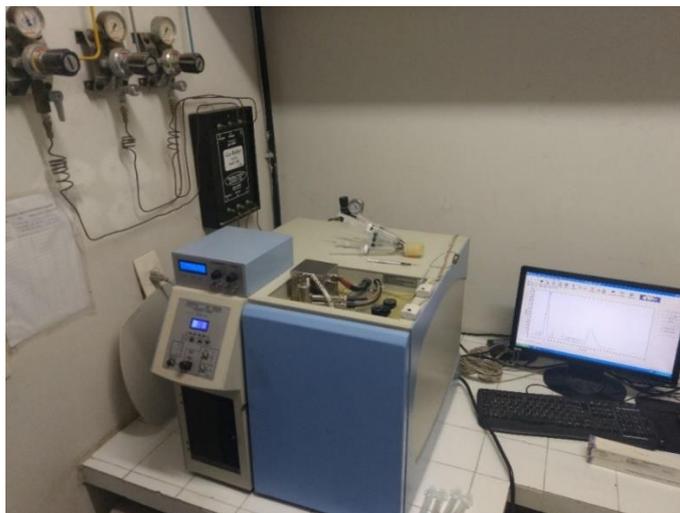
Foram realizadas duas repetições para cada tratamento.

2.2. Caracterização do biogás

A caracterização do biogás foi realizada no Laboratório do Grupo de Resíduos Sólidos, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco.

Os gases capturados no processo de biodigestão anaeróbia foram medidos em volume nas seringas e analisados por cromatografia, em cromatógrafo gasoso (Figura 30), obtendo-se o percentual de metano, oxigênio e outros gases.

Figura 30: Cromatógrafo gasoso utilizado para caracterização do biogás produzido pela biodigestão anaeróbia de biomassa de poda urbana inoculada com lodo de esgoto



Fonte: O Autor.

Antes das análises, o cromatógrafo foi devidamente calibrado com um gás composto de 60% de metano e 40% de CO₂.

Por fim, a produção de metano, em m³, foi correlacionada com a massa de biomassa de poda utilizada como substrato, sendo os valores extrapolados para o total de biomassa de poda adquirida por ano em Recife.

O volume de metano produzido foi convertido em energia elétrica pela relação: 1,0 m³ de metano gera 9,45 kwh (OLIVEIRA, 2009).

Por fim, foram realizadas análises estatísticas por meio da análise de variância (ANOVA) e realização do Teste de Tukey à 95% de probabilidade, utilizando o software Assistat 7.7., para determinar quais composições apresentaram maior eficiência para a produção de metano. As análises foram realizadas em duplicata.

2.3. Caracterização química dos biofertilizantes

A fim de comparar os biofertilizantes dos processos aeróbio e anaeróbio de decomposição e biodigestão da biomassa de poda, foram realizadas análises químicas para determinar os teores dos macronutrientes N, P, K e Ca, e obtenção da relação C/N nos compostos. Ambos os processos tiveram a duração de 60 dias. Os fertilizantes foram secos em estufa à 65°C (Figura 31), para realização da digestão e realização das análises químicas.

Figura 31: Biofertilizantes obtidos pela digestão da biomassa de poda urbana após o processo de secagem para análises químicas. A) Obtido pelo processo de compostagem; B) Obtido pela biodigestão anaeróbia



Fonte: O Autor.

Posteriormente, os fertilizantes passaram em moinho de facas (2,0 mm) para trituração e homogeneização do material.

As metodologias utilizadas estão apresentadas na Tabela 09.

Tabela 09: Metodologias utilizadas na caracterização química dos biofertilizantes.

Análise	Método	Referências
Carbono	Volumetria	(BEZERRA NETO; BARRETO, 2011)
Nitrogênio	Arraste de vapor (Kjeldahl)	(SILVA, 2009)
Fósforo	Colorimetria (molibdo-vanadato)	(BEZERRA NETO; BARRETO, 2011)
Potássio	Fotômetro de chama	(BEZERRA NETO; BARRETO, 2011)
Cálcio	Fotômetro de chama	(BEZERRA NETO; BARRETO, 2011)

O biofertilizante da digestão anaeróbia utilizado nas análises para comparação foi aquele cujo biodigestor apresentasse a maior produção de metano.

Também foram avaliados os teores na biomassa de poda e no lodo de esgoto para correção dos valores nutricionais relacionados aos processos de digestão.

Para testar a hipótese de nulidade e determinar se havia diferença estatística entre as formas de obtenção do biofertilizante, foram realizadas análises de variância utilizando o software Assistat 7.7.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Produção de metano

Após avaliação de 60 dias de biodigestão, os tratamentos T4 (25% biomassa de poda e 75% lodo) e T8 (12,5% biomassa de poda, 37,5% lodo e 50% água) apresentaram as maiores produções de metano (Tabela 10), sendo este último a melhor composição para geração de metano, de acordo com a ANOVA (Apêndice 22).

Tabela 10: Média do volume total de metano (cm³) produzido por cada tratamento após 60 dias de biodigestão.

Biodigestores	Volume total de CH ₄ (cm ³)
T1	0
T2	0
T3	0,47 c
T4	5,58 b
T5	2,06 c
T6	0
T7	1,17 c
T8	9,14 a

Médias seguidas de mesma letra não diferem estatisticamente entre si, pelo teste de Tukey à 95% de probabilidade.

Os tratamentos de apenas biomassa de poda (T1) e as composições de T2 (75% biomassa de poda e 25% lodo de esgoto) e T6 (37,5% biomassa de poda, 12,5% lodo e 50% água) não apresentaram geração de metano durante o período de digestão, apesar de produção de outros gases, como CO₂ e vapor d'água.

Um dos fatores que limitou a produção de metano nessas três composições foi a falta de umidade, principalmente nos tratamentos T1 e T2, visto que é necessário a presença de água para reprodução dos micro-organismos responsáveis para a produção de metano nessas condições, sendo também observada a pouca quantidade de lodo nesses tratamentos, mostrando que a quantidade de micro-organismos presentes no meio não foi suficiente para realizar a decomposição da biomassa de poda.

Observa-se que ao adicionar água na composição do tratamento T4 para criação do tratamento T8, houve um aumento de cerca de 60% na produção do volume final de metano.

A granulometria de 2,0 mm utilizada nesse trabalho e a quantidade de materiais sólidos da biomassa de poda influenciam diretamente na biodigestão, pois estas características estão ligadas à carga orgânica do composto e a liberação dos gases durante o processo, sendo que,

segundo Oliveira (2012) quanto menores as partículas, mais fácil ocorre à hidrólise da biomassa.

Em contrapartida, a biodigestão da poda com o lodo como inóculo não gerou uma alta quantidade total de metano, apesar das partículas apresentarem baixa granulometria (2,0 mm) e alto teor de materiais orgânicos. Porém, a carga orgânica da biomassa de poda, por apresentar composição mais complexa de celulose e lignina, necessitaria da realização prévia de uma hidrólise para facilitar a conversão dos sólidos em gases, pois de acordo com Salvadori *et al.* (2012), é nessa etapa que os componentes orgânicos mais complexos são convertidos em compostos de menor densidade que são utilizadas pelas bactérias da etapa de fermentação. Portanto, aumentar o tempo de digestão seria uma alternativa para que a ação desses organismos culmine numa hidrólise mais completa do material orgânico.

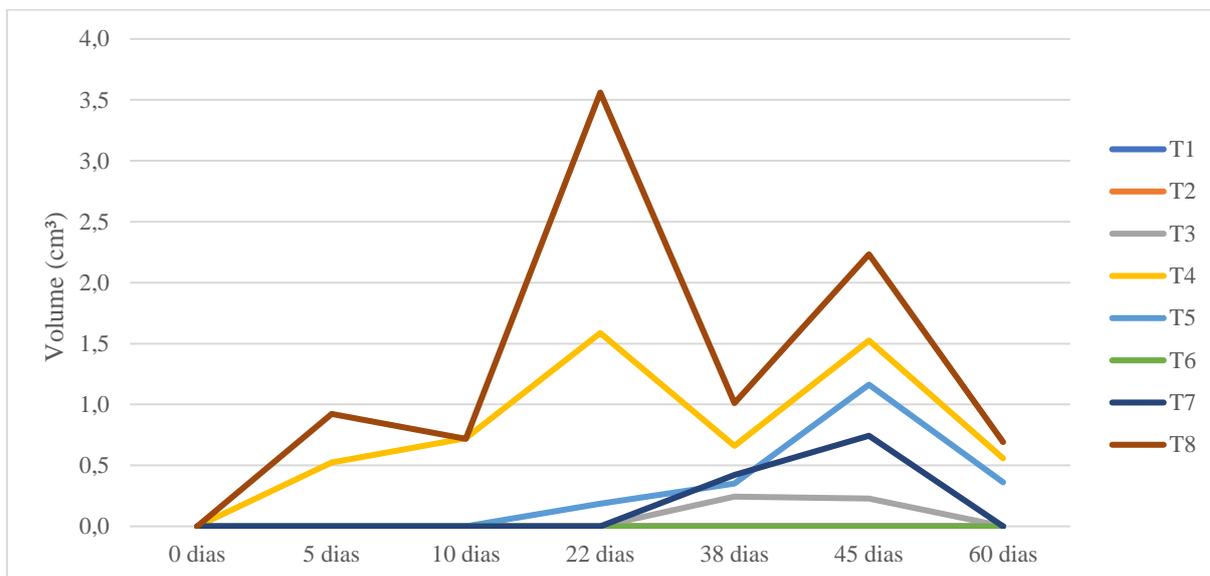
Os compostos de cadeias mais complexas, como a celulose e a lignina, são principalmente degradados por fungos e actinobactérias, que muitas vezes não resistem muito tempo em anaerobiose. Segundo Ximenes (2003), existem poucas espécies de fungos anaeróbios, mas testes apresentam maior eficiência na quebra das moléculas da parede celular que os fungos aeróbios.

Porém, no caso da composição entre lodo de esgoto e biomassa de poda, tais fungos não apresentaram grande eficiência para degradação da matéria orgânica mais complexa para que as bactérias pudessem realizar a fermentação e produção de metano.

Além disso, segundo Cortez *et al.* (2008), em alguns casos o processo de biodigestão necessita de temperaturas acima de 35°C para otimização da fase de hidrólise e proliferação de bactérias fermentativas. Sendo assim, o aumento da temperatura para a produção de biogás usando a biomassa de poda poderia ser uma forma de aumentar a eficiência para geração de metano com as composições avaliadas nesse trabalho.

Quando avaliada a produção de metano em função dos dias de digestão, os biodigestores T4 e T8 apresentaram maiores picos de produção nos primeiros 22 dias após inoculação. A partir dos 45 dias de avaliação, todos os biodigestores apresentaram queda na produção de metano (Figura 32). Os tratamentos T4, T5 e T8 apresentaram os maiores picos de produção no 45º dia, e logo em seguida houve uma queda na produção, que ocorreu devido à carga orgânica de compostos mais densos na biomassa de poda, fazendo com que a quantidade de micro-organismos não conseguisse realizar maiores digestões dos compostos em anaerobiose.

Figura 32: Produção de metano, em cm³, em função das diferentes composições e dias de digestão



Foi observado que um dia após inoculados os biodigestores das composições T4 e T8 já apresentaram produção de gases, porém os volumes que não permitiam sua análise. Apenas a partir dos cinco dias de inoculação foram coletados gases suficientes para análise.

Ao levar em consideração que as quantidades de biomassa de poda inoculada nos tratamentos T4 e T8 corresponderam a 25% (20 g) e a 12,5% (10 g), respectivamente, é possível relacionar a produção total anual de poda e a quantidade de metano que poderia ser gerada utilizando esse material como inoculante (Tabela 11).

Tabela 11: Correlação entre os volumes de metano e a energia elétrica a ser produzida a partir da biodigestão da biomassa de poda

Biodigestores	VCH ₄ (cm ³)	VCH ₄ (m ³ .kg ⁻¹ de biomassa)	VCH ₄ total (m ³ .ano ⁻¹)	Energia elétrica (MWh)
T4	5,58	2,79x10 ⁻⁴	1235,2	12,3
T8	9,14	9,14x10 ⁻⁴	4048,1	40,2

Utilizando um sistema de geração de biogás a partir de capim e lodo de esgoto, Silva *et al.* (2015), observaram nas mesmas condições uma produção de metano de 3,6x10⁻³ m³.kg⁻¹ de capim utilizado nos biodigestores. Observa-se, então, que materiais constituídos por folhas teriam a capacidade de gerar cerca de 10 vezes mais metano que as biomassas que apresentam materiais lenhosos na sua composição, como a poda.

Nas condições avaliadas, o uso da biomassa de poda coletada na cidade do Recife em composições com lodo de esgoto teria capacidade para geração de 40,2 MWh por ano de energia elétrica a partir da biodigestão anaeróbia e produção de metano.

Ao converter tais valores para relação financeira do processo, observando-se que a taxa cobrada pela Companhia Elétrica de Pernambuco corresponde à R\$ 0,72 por kWh consumido, para o mês de janeiro de 2019 (CELPE, 2019), caso optasse pela geração de energia do biogás obtido pela biodigestão da biomassa de poda, poderia ser poupada uma renda bruta de cerca de 29,6 mil reais ao ano nos gastos com energia elétrica no município.

Levando em consideração os investimentos para implantação e manutenção dos biodigestores de campo, o processo de geração de biogás a partir da biomassa de poda, nas condições avaliadas neste trabalho, apresentaria baixa eficiência para gerar energia elétrica e, a depender destes custos, poderia gerar déficit na receita do município, restando avaliar a qualidade do biofertilizante produzido.

3.2. Caracterização química dos biofertilizantes

Para complementar a discussão sobre a eficiência dos processos de digestão, na Tabela 12 se encontram as composições químicas das matérias primas utilizadas na produção dos fertilizantes.

Tabela 12: Composição química das matérias primas utilizadas na produção dos fertilizantes

Material	Teores nutricionais (%)					Relação C/N
	C	N	P	K	Ca	
Biomassa de poda	37,67	1,01	0,15	0,48	0,43	37,3
Lodo de esgoto	12,75	1,57	0,21	0,40	0,37	8,1

Como o tratamento T8 apresentou a maior produção de metano, este foi utilizado para a comparação com o fertilizante do processo de compostagem. De acordo com a avaliação nutricional dos fertilizantes (Tabela 13), juntamente com a relação C/N, foi observada apenas diferença nos teores de carbono (Apêndices 23 a 27).

Tabela 13: Avaliação nutricional dos fertilizantes produzidos nos processos de compostagem e biodigestão anaeróbia da biomassa de poda do Recife, Pernambuco

Processo de digestão	Teores nutricionais (%)					Relação C/N
	C	N	P	K	Ca	
Compostagem	17,80**	1,83 ^{ns}	0,17 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,38 ^{ns}	9,7
Biodigestão anaeróbia	31,01	1,67	0,18	0,48	0,39	18,6

Teste de F pela ANOVA: ^{ns} = não apresenta diferença estatística; ** = apresenta diferença significativa ($p < 0,01$)

Em relação aos teores de carbono, o fertilizante do processo de compostagem apresentou cerca de 50% de consumo do elemento em relação à biomassa de poda *in natura*. O biofertilizante do processo anaeróbio de digestão apresentou pouca redução nos teores de carbono após os 60 dias, num total de 20% menos carbono. Por isso, foi observada diferença significativa entre os métodos de obtenção dos fertilizantes.

Com estas reduções, é possível observar que o processo de compostagem foi mais eficiente na utilização do elemento para que os micro-organismos realizassem a mineralização dos compostos, havendo a quebra de moléculas mais complexas (como celulose e lignina) pela ação de fungos e bactérias (Actinomycetos). E, como já mencionado anteriormente, a ausência de grande quantidade de organismos com capacidade de decompor estas moléculas durante o processo anaeróbio fez com que não houvesse alto consumo de carbono para a produção de metano. Já na compostagem, o consumo do elemento se deu de forma eficiente para a produção do composto orgânico com características próprias para uso como fertilizante.

Em relação aos teores de nitrogênio, não foi observada diferença estatística entre os métodos de obtenção dos fertilizantes, havendo um aumento dos teores em relação a biomassa de poda urbana utilizada como matéria prima para produção desses compostos.

Segundo Nunes (2009), para manter um ambiente com características químicas favoráveis à fermentação, é necessário que haja a incorporação de materiais ricos em carbono e nitrogênio para proporcionar uma relação C/N adequada para a manutenção dos micro-organismos durante a biodigestão.

Observando as matérias primas, que a biomassa de poda urbana do Recife e o lodo de esgoto utilizado nas biodigestões apresentam relação C/N de 37,3 e 8,1, respectivamente, verifica-se que estes materiais possuem níveis adequados para a produção de fertilizantes, pois segundo Fernandes e Silva (1999), a matéria orgânica ideal para o início da biodigestão deve apresentar valores próximos a 30, podendo ocorrer numa faixa entre 20 a 70 de acordo com a capacidade de degradação do substrato, e o lodo apresentando relação C/N entre 5,0 e 11,0.

Ao fim do processo de biodigestão da matéria orgânica, que ocorre de forma eficiente, o fertilizante apresenta relação C/N próxima a 10, visto que os micro-organismos absorvem uma proporção de 30 partes de carbono para uma parte de nitrogênio, sendo que 2/3 do carbono é liberado na respiração e o resto é imobilizado no protoplasma celular (KIEHL, 1985; ROCHA *et al.*, 2015).

Tal comportamento foi observado para a decomposição da biomassa de poda urbana na compostagem, visto que no final do processo foi observada uma relação C/N de 9,7. Para o biofertilizante, a relação C/N do final do processo foi de 18,6, indicando que não houve uma ideal decomposição do material, visto que, de acordo com Oliveira, Sartori e Garcez (2008), de forma mais genérica, quanto menor for a relação C/N mais rapidamente ocorre a finalização da decomposição da matéria orgânica.

Em relação aos elementos minerais (fósforo, potássio e cálcio), não foi observada diferença significativa entre os processos de obtenção dos fertilizantes. Logo, para estes elementos, não houve consumo diferenciado por parte dos organismos que proporcionaram as biodigestões aeróbia e anaeróbia. Segundo Rocha *et al.* (2015), pode ocorrer o aumento da concentração desses nutrientes pelo consumo do carbono e mineralização dos compostos orgânicos. Tal comportamento não foi observado nesse trabalho.

Considerando os investimentos para instalação de biodigestores e para manutenção do processo, a produção de biogás com este material nas condições avaliadas nesse trabalho poderia resultar em um déficit nas contas públicas, além de não apresentar eficiência na produção de fertilizante, devendo-se desenvolver novas pesquisas para melhoria da eficiência e da produção para gerar energia elétrica.

Devido à composição da biomassa de poda, para aumentar a eficiência da geração de biogás com esse material atuando como estruturante de lodo de esgoto, recomenda-se a realização de uma hidrólise prévia a fim de quebrar as moléculas mais densas e gerar um ambiente com melhores condições para a atuação dos organismos no processo de biodigestão anaeróbia. Estas hidrólises poderiam ser realizadas por via ácida ou alcalina pela adição de ácidos inorgânicos e bases que resultariam na quebra dessas moléculas. Outra observação a se fazer é que a temperatura também influencia na geração de metano, logo avaliar essas composições em temperaturas mais altas poderia proporcionar um incremento na eficiência da biodigestão.

Portanto, no campo as condições seriam as mais simples possível, havendo controle da anaerobiose do processo, não necessitando de equipamentos mais elaborados para controle de temperatura.

4. CONCLUSÃO

Sobre o uso da biomassa de poda urbana da cidade do Recife/PE para produção de biogás, pode-se concluir que:

- A biomassa de poda, nas condições avaliadas nesse trabalho, apresentou-se como resíduo estruturante de baixa produção de metano com o objetivo de produzir energia elétrica.
- A combustão direta do biogás gerado com a biomassa de poda seria uma melhor alternativa para uso desse combustível.
- Os biodigestores de composição com a 12,5% biomassa de poda, 37,5% lodo e 50% água apresentaram as maiores produções de metano, com 60% mais eficiência que a segunda composição (25% biomassa de poda e 75% lodo).
- A biomassa de poda coletada na cidade do Recife apresentaria potencial para gerar 40,2 MWh de energia elétrica a partir da biodigestão anaeróbia e produção de metano, com renda anual de 29,6 mil reais.
- O processo de compostagem da biomassa de poda urbana realizado pela EMLURB/PCR ocorre de maneira eficiente, gerando fertilizante com relação C/N em níveis adequados para uso.
- A biodigestão anaeróbia não foi eficiente na conversão da biomassa de poda em biofertilizante, gerando um composto orgânico com alta relação C/N que não adequada para uso.

REFERÊNCIAS

- ABREU, F. V. **Biogás: economia, regulação e sustentabilidade**. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. 196p.
- BEZERRA NETO, E.; BARRETO, L. P. **Análises químicas e bioquímicas em plantas**. Recife: UFRPE, Editora Universitária da UFRPE, 2011. 267p.
- BRAND, M. A. **Energia de Biomassa Florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 131p.
- CELPE. **Companhia Energética de Pernambuco**. Disponível em: <<http://servicos.celpe.com.br/Pages/index.aspx>>; Acesso em: 30 jan. 2019.
- CORTEZ, L. A. B.; SILVA, A.; LUCAS JÚNIOR, J.; JORDAN, R. A.; CASTRO, L. Biodigestão de efluentes. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Campinas: Editora da Unicamp, 2008. p. 493-530.
- EMLURB. EMPRESA DE LIMPEZA URBANA DO RECIFE. **Relatório do aproveitamento de restos de poda urbana do Recife para o processo de compostagem - 2016**. Recife: EMLURB/PCR, 2017. 7p.
- FERNANDES, F.; SILVA, S. M. C. P. **Manual prático para compostagem de biossólidos**. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999. 91p.
- GOLDEMBERG, J.; PALETTA, F. C. (Org.). **Energias Renováveis**. São Paulo: Blucher, 2012. 110p.
- KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. São Paulo: Ceres, 1985. 492p.
- NUNES, M. U. C. **Compostagem de Resíduos para Produção de Adubo Orgânico na Pequena Propriedade**. Circular técnica, 59. Aracajú: EMBRAPA, 2009. 7 p.
- OLIVEIRA, E. C. A.; SARTORI, R. H.; GARCEZ, T. B. **Compostagem**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2008. 19p.
- OLIVEIRA, M. M. **Estudo da inclusão de compartimentos em biodigestores modelo canadense**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos). Santa Maria: UFSM, 2012. 118f.
- OLIVEIRA, R. D. **Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido pela fermentação anaeróbia de dejetos em abatedouro e as possibilidades no mercado de carbono**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica com ênfase em Sistemas de Energia e Automação). São Carlos: EESC/USP, 2009. 79f.
- ROCHA, A. J. F.; SOUZA, R. L. P.; REDA, A. L. L.; SILVA, G. T. Destinação sustentável do resíduo da poda de árvores urbanas. In: XV Safety, Health and Environment World Congress, 19 a 22 de julho, 2015. **Anais...** Porto, Portugal: COPEC, 2015.

SALVADORI, S.; KONRAD, O.; CASARIL, C.; LUMI, M.; SCHMITZ, M. Geração de biogás a partir de lodo de estação de tratamento de efluentes na fabricação de proteína isolada de soja. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n. 1, p. 128-141, jan./mar. 2012.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2ª Ed. Brasília: EMBRAPA, 2009. 627p.

SILVA, I. J. S.; SILVA, G. A.; CABRIL, K. V. G.; SILVA, T. C.; GAMA, P. H. R. P.; CAIRES, T. D.; PERES, S.; PALHA, M. A. P. F. Produção de biogás a partir de vinhaça, capim e lodo de esgoto. In: XX Simpósio Nacional de Bioprocessos, 01 a 04 de setembro de 2015, Fortaleza. **Anais...** Fortaleza: XX SINAFERM, 2015.

TEIXEIRA JUNIOR, L. C. **Biogás: alternativa para geração de energia**. 1. ed. Curitiba: Appris, 2016. 101p.

XIMENES, E. A. Fungos anaeróbios. **Revista de Ciências Médicas e Biológicas**, Salvador, v. 2, n. 2, p. 269-275, jul./dez. 2003.

CONCLUSÕES GERAIS

Diante das duas formas de obter energia a partir da conversão da biomassa de poda da cidade do Recife avaliadas neste trabalho, a conversão do material em carvão vegetal e seu uso é a atividade mais indicada para geração de energia, visto que apresentou produção em kWh quase 350 vezes maior que os avaliados para a produção de biogás.

A biomassa de poda apresentou alto teor de umidade, necessitando de uma secagem prévia, deixando o material com umidade abaixo do ponto de saturação das fibras, para geração de energia, poder calorífico suficiente para produção de energia calorífica e conversão em energia elétrica, alto teor de cinzas, satisfatórios teores de lignina e extrativos e baixo teor de carbono; e em relação ao carvão vegetal da poda, apresentou baixo teor substâncias de voláteis, alto teor de cinzas e rendimento gravimétrico satisfatório para a conversão.

O biogás gerado pela biomassa de poda e lodo de esgoto apresentou baixo teor de metano, sendo esta atividade economicamente inviável para as composições e condições avaliadas neste trabalho. Além disso, de acordo com a relação C/N do final do processo, as condições de digestão avaliadas não foram eficientes para produção de fertilizantes.

A biomassa de poda urbana da cidade do Recife pode ser utilizada para produção de energia a partir da combustão direta desse material para a conversão em energia elétrica.

APÊNDICES

APÊNDICE 01 – Análise de variância dos teores de umidade da biomassa de poda do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	78.73489	19.68372	1.3506 ns
Resíduo	45	655.84169	14.57426	
Total	49	734.57658		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	45	2.5791	1.3506	0.2661

APÊNDICE 02 – Análise de variância da densidade da biomassa de poda úmida do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.00001	0.00000	0.1621 ns
Resíduo	45	0.00077	0.00002	
Total	49	0.00079		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	45	0.1193	0.1621	0.9564

APÊNDICE 03 – Análise de variância da densidade da biomassa de poda seca do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.00001	0.00000	0.6545 ns
Resíduo	45	0.00011	0.00000	
Total	49	0.00011		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	45	0.1193	0.6545	0.6268

APÊNDICE 04 – Análise de variância dos teores de cinzas da biomassa de poda do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.48300	0.12075	2.6621 ns
Resíduo	20	0.90718	0.04536	
Total	24	1.39018		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	20	2.8661	2.6621	0.0627

APÊNDICE 05 – Análise de variância dos teores de materiais voláteis da biomassa de poda do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	9.07802	2.26951	0.3109 ns
Resíduo	20	145.99584	7.29979	
Total	24	155.07386		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	20	0.117	0.3109	0.8673

APÊNDICE 06 – Análise de variância dos teores de umidade do carvão de biomassa de poda do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	4.29785	1.07446	1.8449 ns
Resíduo	70	40.76682	0.58238	
Total	74	45.06468		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	70	2.5029	1.8449	0.13

APÊNDICE 07 – Análise de variância do rendimento gravimétrico da carbonização de biomassa de poda do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1.59836	0.39959	1.3060 ns
Resíduo	10	3.05974	0.30597	
Total	14	4.65809		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	10	3.478	1.306	0.3321

APÊNDICE 08 – Análise de variância dos teores de cinzas do carvão de biomassa de poda do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	3.75067	0.93767	2.2157 ns
Resíduo	70	29.62362	0.42319	
Total	74	33.37429		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	70	2.5029	2.2157	0.076

APÊNDICE 09 – Análise de variância dos teores de materiais voláteis do carvão de biomassa de poda do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	32.88087	8.22022	1.9178 ns
Resíduo	70	300.04165	4.28631	
Total	74	332.92252		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	70	2.5029	1.9178	0.117

APÊNDICE 10 – Análise de variância dos teores de carbono fixo do carvão de biomassa de poda do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	7.97119	1.99280	0.4926 ns
Resíduo	10	40.45816	4.04582	
Total	14	48.42935		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	10	0.113	0.4926	0.7417

APÊNDICE 11 – Análise de variância do rendimento em carbono fixo do carvão de biomassa de poda do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1.91770	0.47942	0.7306 ns
Resíduo	10	6.56208	0.65621	
Total	14	8.47978		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	10	0.113	0.7306	0.5913

APÊNDICE 12 – Análise de variância dos teores de extrativos da biomassa de poda do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	2.30338	0.57584	0.9665 ns
Resíduo	20	11.91605	0.59580	
Total	24	14.21943		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	20	0.117	0.9665	0.4475

APÊNDICE 13 – Análise de variância dos teores de celulose da biomassa de poda do Recife-PE, em relação às cinco RPAs avaliadas

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	8.96039	2.24010	0.8870 ns
Resíduo	20	50.51064	2.52553	
Total	24	59.47103		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	20	0.117	0.887	0.4896

APÊNDICE 14 – Análise de variância dos teores de hemicelulose da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	13.71021	3.42755	0.6666 ns
Resíduo	20	102.83110	5.14156	
Total	24	116.54131		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	20	0.117	0.6666	0.6226

APÊNDICE 15 – Análise de variância dos teores de carbono da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	85.39652	21.34913	11.3661 **
Resíduo	20	37.56637	1.87832	
Total	24	122.96290		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	20	4.4307	11.3661	<.0001

APÊNDICE 16 – Análise de variância dos teores de nitrogênio da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	12.24546	3.06136	3.5438 ns
Resíduo	5	4.31927	0.86385	
Total	9	16.56473		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	5	5.1922	3.5438	0.0989

APÊNDICE 17 – Análise de variância dos teores de enxofre da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.65351	0.16338	1.3135 ns
Resíduo	10	1.24380	0.12438	
Total	14	1.89731		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	10	3.478	1.3135	0.3296

APÊNDICE 18 – Análise de variância dos teores de fósforo da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.41479	0.10370	16.6799 **
Resíduo	20	0.12434	0.00622	
Total	24	0.53913		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	20	4.4307	16.6799	<.0001

APÊNDICE 19 – Análise de variância dos teores de potássio da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1.29089	0.32272	12.2123 **
Resíduo	20	0.52852	0.02643	
Total	24	1.81942		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	20	4.4307	12.2123	<.0001

APÊNDICE 20 – Análise de variância dos teores de cálcio da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1.56225	0.39056	15.1292 **
Resíduo	20	0.51630	0.02582	
Total	24	2.07856		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	20	4.4307	15.1292	<.0001

APÊNDICE 21 – Análise de variância dos teores de sódio da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0.13497	0.03374	9.4547 **
Resíduo	20	0.07138	0.00357	
Total	24	0.20634		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
4	20	4.4307	9.4547	0.0001

APÊNDICE 22 – Análise de variância dos teores de metano obtidos por diversas composições da biomassa de poda do Recife-PE e lodo de esgoto pelo processo de biodigestão anaeróbia

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	7	156.08859	22.29837	30.8760 **
Resíduo	8	5.77753	0.72219	
Total	15	161.86612		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
7	8	6.1776	30.876	<.0001

APÊNDICE 23 – Análise de variância dos teores de carbono orgânico total nos fertilizantes do processo de compostagem e biodigestão anaeróbia da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	436.39236	436.39236	626.8114 **
Resíduo	8	5.56968	0.69621	
Total	9	441.96204		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
1	8	11.2586	626.8114	<.0001

APÊNDICE 24 – Análise de variância dos teores de nitrogênio total nos fertilizantes do processo de compostagem e biodigestão anaeróbia da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	3.87207	3.87207	5.1486 ns
Resíduo	4	3.00827	0.75207	
Total	5	6.88033		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < .01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($.01 \leq p < .05$)
 ns não significativo ($p \geq .05$)

GL	GLR	F-crit	F	p
1	4	7.7086	5.1486	0.0857

APÊNDICE 25 – Análise de variância dos teores de fósforo total nos fertilizantes do processo de compostagem e biodigestão anaeróbia da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	0.06745	0.06745	3.6076 ns
Resíduo	8	0.14958	0.01870	
Total	9	0.21704		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
1	8	5.3177	3.6076	0.0939

APÊNDICE 26 – Análise de variância dos teores de potássio nos fertilizantes do processo de compostagem e biodigestão anaeróbia da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	0.02216	0.02216	1.5643 ns
Resíduo	8	0.11331	0.01416	
Total	9	0.13546		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
1	8	5.3177	1.5643	0.2462

APÊNDICE 27 – Análise de variância dos teores de cálcio nos fertilizantes do processo de compostagem e biodigestão anaeróbia da biomassa de poda do Recife-PE

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	1	0.01725	0.01725	2.6337 ns
Resíduo	8	0.05239	0.00655	
Total	9	0.06964		

** significativo ao nível de 1% de probabilidade (p < .01)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade (.01 =< p < .05)
 ns não significativo (p >= .05)

GL	GLR	F-crit	F	p
1	8	5.3177	2.6337	0.1431