



POTENCIAL ENERGÉTICO DO RESÍDUO DAS PODAS DE ÁRVORES NO MUNICÍPIO DE PIRACICABA – SP

Nariê Rinke Dias de Souza¹, Lemuel Soares Alencar² & Alexandre Witier Mazzonetto³

RESUMO: Cresce mundialmente a necessidade de produção de energia com mecanismo de desenvolvimento limpo para diminuir a dependência de combustíveis fósseis. O Brasil já apresenta uma matriz energética limpa, com 40% proveniente de fontes renováveis, a energia elétrica de fonte hidráulica corresponde a 65% da matriz elétrica brasileira e a de biomassa 7,4%. Após as crises energéticas e apagões ocorridos em 2001 e 2014, ficou evidenciado a necessidade de diversificação da matriz energética brasileira diminuindo a dependência das hidrelétricas, além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos deverá entrar em vigor, alterando a destinação de muitos resíduos, dentre estes a poda urbana. A poda de árvores é uma prática comum em diversos municípios, em Piracicaba - SP ocorre no mínimo uma vez por ano. O resíduo oriundo da poda de árvores é uma biomassa lignocelulósica com potencial energético não utilizado, pois é descartado em aterros e em alguns casos destinado à compostagem. A proposta deste trabalho foi avaliar, caracterizar o potencial energético do resíduo de poda urbana (de Piracicaba - SP) e estimar o potencial disponível, através da Análise Imediata, Elementar e de Poder Calorífico. A partir da caracterização, apresentar opções de rotas tecnológicas para aproveitamento do potencial. Dentre as rotas térmicas estão Incineração, Pirólise, Gaseificação Convencional e Gaseificação com Arco Plasma. Foram usados dados fornecidos pela SEDEMA (Secretaria de Defesa do Meio Ambiente), que é a responsável pela poda das árvores do município de Piracicaba - SP. Os resultados do estudo mostraram que os resíduos de poda têm Poder Calorífico Superior de $16,35 \pm 0,14$ kJ/kg e possuem um potencial energético anual de 1.300 MW.h, variando de acordo com o processo de conversão utilizado.

Palavras-chave: poda urbana, resíduos, energia renovável, biomassa.

POTENTIAL ENERGY FROM WASTE OF TREE PRUNING IN PIRACICABA, BRAZIL

ABSTRACT: There is a growing concern regarding clean energy production to decrease fossil fuel dependency. Brazil already has a clean energy matrix of which about 40% comes from renewable resources; hydroelectricity corresponds to 65% of Brazil's energy matrix and energy from biomass represents 7.4%. After the 2001 and 2014 energy crises and blackouts, it was possible to realize that there was a need for diversification in Brazil's energy matrix, decreasing dependency on hydroelectricity as well. Besides this, the National Policy on Solid Waste is coming into force, changing the destination of many wastes, among them urban pruning wastes. Pruning trees is a common practice in many municipalities and in Piracicaba, SP, Brazil, it occurs at least once a year. The residue derived from tree pruning is a lignocellulosic biomass with energy potential that is not used. This biomass is thrown in landfills and, in some cases, is used for composting. The purpose of this study was to characterize the energy potential of urban pruning waste (from Piracicaba - SP) and estimate its potential through Immediate, Elementary and Calorific Value analyses. Starting from the characterization of this waste, we sought to display optional technological routes for taking advantage of this potential. Among the thermal routes are Incineration, Pyrolysis, Conventional Gasification and Plasma Arc Gasification. The data was provided by SEDEMA (Municipal Department for the Defense of the Environment), which is responsible for pruning trees in the city of Piracicaba-SP. The study results showed that the pruning waste has a High Heating Value of 16.35 ± 0.14 kJ/kg and an annual energy potential of 1,300 MW.h, varying according to the conversion process used.

KEYWORDS: urban pruning, residues, renewable energy, biomass.

1

1 INTRODUÇÃO

Devido à preocupação mundial com a diminuição do uso e dependência de combustíveis fósseis, novas tecnologias e fontes de energia renováveis estão sendo pesquisadas como energia eólica, energia solar e de biomassa.

De acordo com o Balanço Energético Nacional (2015) em 2014 a matriz elétrica brasileira era composta em 65,2%

¹ e ² Centro Paula Souza/Faculdade de Tecnologia - FATEC Piracicaba. E-mails: narierinke@hotmail.com, lemuelsalencar@hotmail.com

³ Faculdade de Engenharia da Fundação Armando Alvares Penteado/FAAP e Centro Paula Souza/FATEC – Piracicaba e Tatuapé. E-mail: awmazzo@yahoo.com.br

hidráulica; 13,0% gás natural; 7,4% biomassa; 6,8% derivados do petróleo; 2,5% nuclear; 3,2% carvão e derivados e 2,0% eólica. Apesar de o Brasil apresentar uma matriz energética bastante limpa, mais da metade da oferta de energia elétrica é composta por energia hidráulica e após o apagão em 2001 e a crise hídrica em 2014, ficou evidenciada a necessidade em diversificar a matriz energética, principalmente elétrica do país. Associado à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), que pretende diminuir drasticamente o envio de resíduos para aterros sanitários, o uso da biomassa vegetal residual para fins energéticos passa a ser uma alternativa, que além de gerar energia enquadra-se ao PNRS.

A biomassa vegetal é utilizada como fonte de energia térmica desde a pré-história, (GOLDEMBERG et al. 1987). No último século veio perdendo força para o carvão e mais tarde para o petróleo e o gás natural. Contudo, a constante busca de fontes renováveis de energia para um menor consumo e dependência de derivados do petróleo, a está trazendo de volta.

De acordo com Cortez et al. (2008), a biomassa para fins energéticos deve possuir até 50% de umidade e pode vir de resíduos sólidos urbanos, animais, vegetais, industriais e florestais. Dentre as fontes vegetais estão a madeira, folhas, cascas, resíduos agrícolas, com poder calorífico médio de $15,70 \text{ MJ.kg}^{-1}$. Pode atuar tanto no setor de energia elétrica quanto no de transportes e possui diversas rotas de conversão, além de possuir algumas vantagens em comparação aos derivados do petróleo como emissões de gases do efeito estufa quase nulas, menores emissões de enxofre e óxidos de nitrogênio durante a conversão e possui importante influência na diversificação da matriz energética. A biomassa é menos poluente que o petróleo, porém tem uma menor energia liberada durante sua combustão, reduzindo seu PCS (Poder Calorífico Superior, (RENDEIRO et al. 2008).

Os resíduos de poda urbana são classificados pela NBR 10.004 (2004) como Resíduos Sólidos Urbanos – RSU apresentam potencial energético e podem ser usados para a geração de energia, esse potencial não está sendo aproveitado, considerando que são descartados em aterros, lixões e utilizados para compostagem.

De acordo com Cortez (2011), os responsáveis pelo serviço de poda das árvores são os governos municipais, no caso do município de Piracicaba - SP o órgão público responsável é a Secretaria de Defesa do Meio Ambiente - SEDEMA, a qual declara que Piracicaba possui hoje cerca de 10 milhões m^2 de áreas públicas (1000 hectares), o equivalente a 1500 campos de futebol, gerando aproximadamente 180 toneladas mensais de resíduos. Meira (2010) chegou num valor de 181,50 toneladas mensais para o Município de Piracicaba, sendo elas divididas entre as podas realizadas pela Prefeitura

Municipal – 73% e pela Concessionária de Energia Elétrica- 27%.

Segundo a Cia Paulista de Fonte e Luz – CPFL, o município de Piracicaba - SP consumiu no ano de 2013 2.272.946,0 MWh, sendo que esse valor é dividido entre: Residencial: 372.600,0 MWh; Industrial: 1.501.276,4 MWh; Comercial: 240.426,3 MWh; e outros: 158.643,4 MWh. Para fins energéticos, a biomassa deve ser analisada e caracterizada através de Análise Imediata e Análise Elementar para conhecimento de sua composição química e potencial calorífico, (CORTEZ et al., 2008).

De acordo com Sánchez (2010), existem quatro métodos para caracterizar a biomassa quanto suas características físicas e químicas e ao seu poder calorífico que são a granulometria, as análises imediata e elementar e o poder calorífico. Sendo a granulometria importante para o dimensionamento do alimentador e da velocidade superficial do gás.

A composição imediata é o conteúdo em porcentagem de peso de carbono fixo (F), materiais voláteis (V), umidade (W) e cinzas (A) é a primeira análise a ser feita.

A análise de teor de voláteis prevê o comprimento da chama a ser gerada pela biomassa em questão, além disso, Cortez et al. (2008), afirma que os voláteis exercem um importante papel para a ignição da biomassa e para as etapas iniciais da combustão.

As cinzas são formadas pelo material residual após a oxidação completa do combustível sólido. Elas são compostas, basicamente, de óxidos metálicos, que não sofrem combustão, ou seja, constituintes inorgânicos. Dentre eles estão o Óxido de Alumínio (Al_2O_3); Óxido Férreo (Fe_2O_3), Óxido de silício (SiO_2), Óxido de Potássio (K_2O), Óxido de cálcio (CaO); Óxido de Magnésio (MgO), entre outros, podendo ser utilizadas como insumo agrícola dependendo da biomassa original (VISSOTO, 2013).

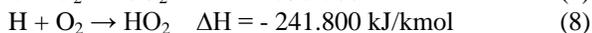
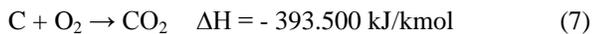
O carbono fixo é a fração do material orgânico não liberado durante a volatilização. Sua composição é primordialmente de carbono e terá a queima mais lenta com maior temperatura.

Sánchez (2010) afirma que a partir da análise elementar podemos analisar os constituintes da biomassa em questão. A análise é destrutiva e a partir da pirólise da amostra, obtemos as frações, em peso, do carbono, oxigênio e hidrogênio, que são os principais constituintes, mas também as concentrações de nitrogênio, enxofre e cloro.

A partir da análise elementar podemos constituir a base para a análise de processos de combustão por cálculos de volume de ar, gases e entalpia, além de ser possível

determinar o poder calorífico da biomassa, (CORTEZ et al., 2008).

A composição química elementar é o conteúdo percentual em massa dos principais elementos que constituem a biomassa: Hidrogênio (H), Carbono (C), Enxofre (S), Oxigênio (O) e tem relação direta com o poder calorífico do combustível. Na composição elementar os elementos citados acima reagem com o oxigênio resultando na seguinte equação:



A partir das porcentagens relativas de cada elemento é possível calcular os valores de Poder Calorífico Inferior (PCI) e Poder Calorífico Superior (PCS) e o poder calorífico dos sólidos também pode ser determinado utilizando a técnica da bomba calorimétrica. SANCHÉZ (2010). O poder calorífico é determinado como a energia liberada na forma de calor durante a combustão completa do combustível, podendo ser medido em kJ/kg. O PCI difere do PCS, pois não considera o calor latente de condensação da umidade da biomassa. A bomba mede o calor liberado pela combustão da biomassa com o oxigênio, que seria o Poder Calorífico Superior.

A fração de oxigênio é determinada por diferença (C, H, N) e as cinzas da análise imediata. Entretanto, raramente a fração desse resíduo se iguala a concentração de cinzas determinada pela análise imediata, mas uma amostra com alto teor de cinzas possui um alto teor de resíduos.

De acordo com Cortez et al. (2008), existem duas principais rotas de conversão da biomassa em biocombustível. A primeira é a rota termoquímica, que utiliza do processo de pirólise e/ou gaseificação da biomassa podendo passar pela fermentação para produção de gás de síntese (mistura de H₂ e CO), hidrocarbonetos, álcoois, amônia e gás natural sintético (GNS).

Segundo Sanchez et al. (2010), a pirólise convencional, também conhecida como carbonização, consiste na degradação da matéria orgânica em atmosfera não oxidante a uma temperatura de 400° C para a formação de três principais componentes: os sólidos, rico em carbono (carvão), os líquidos pirolenhosos (bio óleo) e gases não condensáveis (H₂, CO, CO₂ e CH₄). Esse processo consiste em um complexo conjunto de reações químicas e de transferência de calor e massa, que ocorrem em baixa temperatura e por isso é considerado um processo demorado.

A pirólise convencional é dividida em três fases: secagem, pré carbonização e carbonização. Deve ser levado em conta o tempo de residência do sólido a ser pirolisado, a velocidade do aquecimento e a temperatura final do processo, sendo desejável uma temperatura final de 500°C

para a obtenção de um carvão vegetal com maior poder calorífico.

Santos (2012) afirma que o objetivo da torrefação é concentrar a energia da biomassa em um curto espaço de tempo e obter altos rendimentos, operando com baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas para permitir que os voláteis fiquem contidos no material sólido denominado biomassa torrefeita ou torrificada. Assim, o teor de carbonos fixos na matéria sólida estará entre 28% e 31%. Uma das características desse processo é a baixa emissão de fumaça durante a combustão e que também pode ser estocada por longos períodos.

O processo de gaseificação consiste na transformação de biomassa sólida em um gás combustível, que pode ser utilizado em motores alternativos, turbinas e também para a geração de energia mecânica e elétrica. Já a torrefação ocorre a uma temperatura intermediária, ou seja, acima da temperatura de pirólise rápida e abaixo da temperatura necessária para a combustão. Deve acontecer na presença do oxigênio puro, ou misturas de oxigênio com vapor de água, dessa forma, o gás obtido terá maior poder calorífico em decorrência do nitrogênio estar isento ou com baixos teores, assim o combustível chegará ao poder calorífico de aproximadamente 10 a 15 MJ/Nm³ (CORTEZ et al., 2008).

Segundo Sánchez (2010), os gases produzidos a partir da gaseificação da biomassa podem ser utilizados para eletrificação de áreas rurais, em motores de combustão interna com grupo-gerador e também em turbinas a gás. Existem dois principais tipos de processo de conversão de energia da biomassa, gaseificação e combustão. A combustão ocorre em ambiente com excesso de oxigênio e é uma reação química exotérmica, que necessita de um combustível e um comburente. O combustível no caso é a biomassa que reagirá com o comburente que são os agentes oxidantes, na maioria das vezes utiliza-se o oxigênio (O₂). Os processos de combustão ocorrem somente na fase gasosa. Para que essa reação ocorra é necessária a quantidade exata de átomos de cada reagente, (RENDEIRO et al. 2008).

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o potencial energético da poda de árvores do município de Piracicaba através de análise imediata, elementar e de poder calorífico.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1. MATERIAL E AMOSTRAGEM

O estudo foi realizado no município de Piracicaba, cidade do interior de São Paulo, localizado entre as coordenadas geográficas 22°42' de latitude sul e 47°38' de longitude oeste de Greenwich, numa altitude de 540 m, a 138,12 km da capital São Paulo. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE (2010), o município de

Piracicaba - SP possui 364.571 habitantes e uma área de 1.378,50 km².

A poda é realizada por funcionários da SEDEMA, que utilizam serras elétricas para remoção de galhos e troncos, além de um triturado mecânico instalado no caminhão de coleta para facilitar o transporte dos resíduos. Os galhos e troncos são cortados e colocados manualmente no triturador que lança a poda já triturada na caçamba do caminhão.

As amostras analisadas foram coletadas em 3 pontos com diferentes profundidades, com representação de diferentes espécies misturadas, por um funcionário da SEDEMA diretamente na caçamba do caminhão no momento em que a poda era realizada no Bairro Santa Rosa Ypês, Piracicaba. Não foi feita a diferenciação de espécies, nem controle rigoroso de amostragem, pois nesse sistema toda a poda é misturada sem diferenciação dentro do caminhão.

Aproximadamente 200 g de cada uma das três amostras foram moídas para homogeneização e redução do tamanho da partícula em um moinho de faca para as análises; divididos em 100 g para análise imediata, 50 g para análise elementar e 50 g para bomba calorimétrica e as análises foram feitas em duplicata. O ensaio de granulometria, utilizado para determinação dos tamanhos de partículas presentes na amostra não foi realizado, pois não se submeteu as amostras a qualquer processo que necessita de alimentação contínua.

2.2. COMPOSIÇÃO IMEDIATA

O teor de umidade foi determinado pelo método do forno de secagem (ASTM E871-82) ou de diferença da massa final e inicial. Ocorre da seguinte maneira: as amostras de biomassa são secas em forno até não apresentar mais variação de peso da amostra na terceira casa decimal. Cálculo percentual.

$$\%sólidos = \left[\frac{(Pf - Pc)}{(Pi - Pc)} \right] \times 100 \quad (1)$$

$$\%umidade = 100\% - \%sólidos \quad (2)$$

Onde Pi = peso inicial da massa úmida com o cadinho tampado, Pf = Peso final da amostra seca e estabilizada com o cadinho tampado e Pc = peso do cadinho vazio e tampado.

O teor de voláteis foi determinado de acordo com as normas ASTM para análise imediata de madeira (E871-82, E872 e D1102-84). A fração de voláteis é composta de hidrocarbonetos e gases hidrogênio, monóxido de carbono e metano.

O cálculo do percentual de voláteis:

$$\% voláteis = A - B \quad (3)$$

$$A = \left[\frac{(Pi - Pf)}{(Pi - Pc)} \right] \times 100 \quad (4)$$

Onde: Pi = peso inicial da massa desumidificada na análise de umidade e com o cadinho tampado, Pf = peso final da amostra volatilizada com o cadinho tampado, Pc = peso do cadinho vazio e tampado, B = valor % de umidade calculando na norma E871 – 82.

O teor de cinzas foi determinado através da norma ASTM E1755-01.

O cálculo é dado por:

$$\%cinzas = \left[\frac{(Pz - Pc)}{(Pi - Pc)} \right] \times 100 \quad (5)$$

Onde: Pc = peso do cadinho vazio e tampado, Pi = peso inicial da massa volatilizada com o cadinho tampado e Pz = peso do cadinho tampado com as cinzas.

A quantidade de carbono fixo é determinada por diferença entre a soma dos teores (%) de umidade, matéria volátil e cinzas e 100%, através da norma ASTM E870 – 82. Cálculo:

$$\%carbono\ fixo = 100\% - \%umidade - \%voláteis - \%cinzas \quad (6)$$

2.3. COMPOSIÇÃO ELEMENTAR

Foi determinada a partir das normas ASTM D3176, E777, E775 e E778.

A fração de oxigênio é determinada por diferença e o resíduo da análise é considerado como cinzas.

2.4. PODER CALORÍFICO

O poder calorífico, PCI e PCS foram calculados através da fórmula de DULONG e MENDELIEV e por bomba calorimétrica pela norma E711-87.

Fórmula de DULONG:

$$PCS = 34,00.C + 144,00.[H - \frac{O}{8}] + 10,50.S \quad (10)$$

$$PCI = PCS - 2,43.W \quad (11)$$

$$w = 9.H + u \quad (12)$$

Fórmula de MENDELIEV:

$$PCI = 339\%C + 1030\%H - 109(\%O - \%S) - 24W \quad (13)$$

Onde PCS = Poder Calorífico Superior [MJ/kg], PCI = Poder Calorífico Inferior [MJ/kg], C = teor de carbono (kg de Carbono/kg de combustível), H = teor de hidrogênio (kg de Hidrogênio/kg de combustível), O = teor de oxigênio (kg de oxigênio/kg de combustível), S = teor de enxofre (kg de enxofre/kg de combustível) e W = umidade ou teor de água (kg de água/Kg de combustível).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para determinar o potencial energético da biomassa em questão, foi necessário conhecer suas características físico-químicas e termoquímicas, ou seja, sua composição Imediata, Elementar e também seu Poder Calorífico. A partir da realização da Análise Imediata, Análise Elementar e mensuração do Poder Calorífico, fórmula de Dulong e Mendeliev, foi possível estimar o potencial

energético das podas de árvores do município de Piracicaba - SP.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados obtidos através das análises anteriormente (Análise Imediata, Elementar e Poder Colorífico), realizados com podas de árvore do município de Piracicaba - SP, juntamente com o desvio padrão dos valores encontrados. Já na Tabela 2 são apresentados os valores encontrados pela literatura.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de Análise Imediata, Elementar e Poder Calorífico.

Biomassa – Poda de Árvore			
Composição Imediata (B.S. %)	Poda de Árvore	Composição Elementar (B. S. %)	Poda de Árvore
Umidade	36,62 ± 0,89	Carbono	45,00 ± 0,23
Voláteis	75,36 ± 0,53	Hidrogênio	5,86 ± 0,12
Carbono Fixo	16,44 ± 0,36	Nitrogênio	1,01 ± 0,09
Cinzas	8,19 ± 0,44	Oxigênio*	39,94 ± 0,49
Poder Calorífico Superior (MJ/kg)	Bomba Calorimétrica	Dulong	Mendeliev
	16,35 ± 0,14	15,08 ± 0,25	20,28 ± 0,17

*Oxigênio determinado por diferença

Tabela 2 – Resultados de Análise Imediata, Elementar e Poder Calorífico da literatura.

Análise\Autor	Miller & Tillman (2008)	Mazzonetto et al (2012)	Vissotto (2013)	Neves (2013)	Farias (2012)	Farias (2012)
	Serragem Misturada	Poda Urbana	Pinus	Peroba + Garapeira	Caixeta (<i>Tabebuia Cassinoides Lam</i>)	Jequitibá rosa (Cariniana Legalis)
Análise Imediata (b. s.)						
Umidade (b. u.)	40,00	60,30±1,41	8,62 ± 0,58	11,85±0,23	5,28±0,16	5,40±0,19
Voláteis %	80,00	82,37±1,10	89,69 ± 0,6	84,05±0,44	84,52±0,38	84,01±0,84
Carbono Fixo %	19,00	11,17±1,06	9,93 ± 0,69	9,00±0,58	15,19±0,36	15,51±0,97
Cinzas	1,00	6,46±0,43	0,38 ± 0,0	6,95±0,90	0,28±0,03	0,54±0,01
Análise Elementar						
Carbono (C)	49,20	42,73	47,66 ± 0,20	46,89±0,2	-	-
Hidrogênio (H)	6,00	5,86	6,35 ± 0,20	5,99±0,2	-	-
Nitrogênio (N)	0,04	1,34	0,14 ± 0,20	0,27±0,2	-	-
Oxigênio (O)	43,00	43,61	45,47	46,85±0,2	-	-
Enxofre (S)	<0,01					
Poder Calorífico Superior [MJ/kg]	19,56	18,47	18,56 ± 0,05	19,06±0,11	18,84±0,13	18,88±0,36
Poder Calorífico Inferior [MJ/kg]	-	-	17,19 ± 0,05	16,14±0,13	-	-

*Oxigênio determinado por diferença

Fonte: Adaptado de Miller & Tillman (2008); Mazzonetto Et. Al (2012); Vissotto (2013), Neves (2013) e Farias (2012)

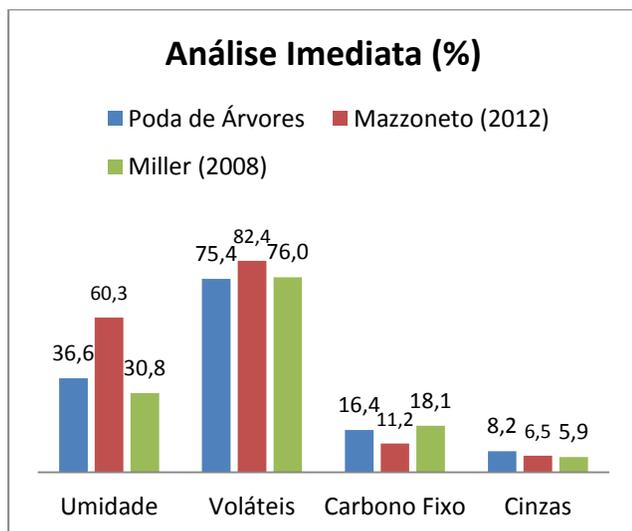
Tabela 3 - Resultados obtidos pela caracterização dos resíduos da Tecnisa, sendo que os Poderes Caloríficos Superiores e Inferiores foram calculados pela equação de Dulong-Petit.

Análise\Resíduo	1- M. MACIÇA	2- M. COMP.	3- M. AGLOM.	4- M. SER./MIX
Análise Imediata (b. s.)				
Umidade (b. u.)	22,81	18,80	10,65	8,84
Voláteis	90,99	84,34	80,36	82,95
Carbono Fixo	8,74	11,89	17,51	14,29
Cinzas	0,27	3,77	2,13	2,76
Análise Elementar				
Carbono (C)	41,38	43,01	46,84	41,32
Hidrogênio (H)	6,20	6,04	6,45	5,90
Nitrogênio (N)	0,15	0,15	0,36	0,15
Oxigênio (O)	52,01	47,02	44,23	49,88
Enxofre (S)				
Poder Calorífico Superior [MJ/kg]	13,64	13,08	17,25	13,57
Poder Calorífico Inferior [MJ/kg]	11,73	11,73	15,58	12,06

Fonte: MAZZONETTO, OBATA & ALMEIDA, 2016

Os valores encontrados a partir das análises realizadas estão de acordo com os valores apresentados em literatura e serão comparados graficamente com Miller e Tillman (2008) e Mazzonetto et al. (2012).

O Gráfico 1 faz uma comparação entre os resultados obtidos da Análise Imediata da poda de árvores de Piracicaba com os de Miller e Tillman (2008) para resíduo de madeira urbana e os de Mazzonetto et al. (2012) para resíduo de poda urbana. O Gráfico 2 compara os resultados obtidos pela Análise Elementar com os resultados apresentados por Miller e Tillman (2008) e Mazzonetto et al. (2012), mostrando a coerência dos resultados deste estudo com a literatura, confirmando os resultados encontrados pelo trabalho.

**Gráfico 1** – Comparação de resultados referentes a Análise Imediata

As diferenças encontradas entre os resultados com a literatura ocorrem por se tratar de diferentes espécies de árvores, de municípios e épocas diferentes. Como é possível observar no Gráfico 1, a umidade encontrada pelas análises realizadas com poda de árvore de Piracicaba – SP são relativamente menores que os encontrados por Mazzonetto et al. (2012), essa diferença de quase 25% pode ser justificada pelas condições climáticas da época de amostragem, em Setembro de 2014, o Estado de São Paulo passava por estiagem, diminuindo a umidade da biomassa, mesmo que esse tenha sido coletado imediatamente após poda. Já o teor de voláteis está abaixo do valor encontrado por Mazzonetto et al. (2012) em apenas 7% e menos de 1% em relação ao valor encontrado por Miller e Tillman (2008). O teor de Carbono Fixo encontrado por Miller e Tillman (2008) foi o maior de todos, seguido pela poda de Piracicaba – SP e o menor deles é o encontrado por Mazzonetto et al. (2012), novamente a variação é pequena para biomassas, em torno de aproximadamente 5%. E finalmente, o Teor de Cinzas encontrado pelas análises e pelos autores está bastante próximo, com uma variação de aproximadamente 2%. Apesar das variações ocorrem os resultados estão dentro de uma variação aceitável em se tratando de biomassas distintas.

Já o Gráfico 2, a seguir, apresenta as comparações entre os valores obtidos pela Análise Elementar realizada com os de Mazzonetto et al. (2012) e Miller e Tillman (2008).

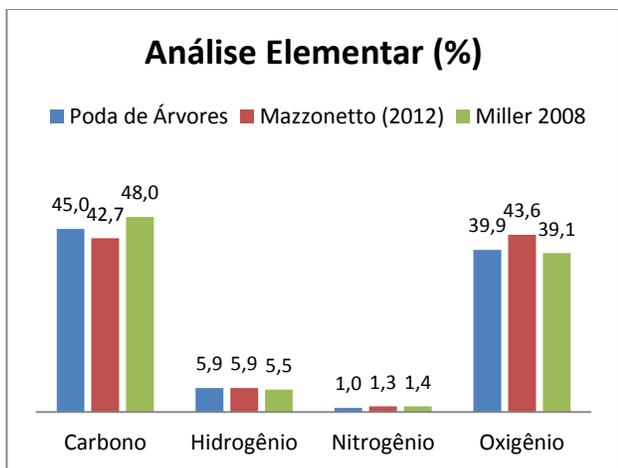


Gráfico 2 - Comparação de resultados referentes a Análise Elementar.

Os valores encontrados estão novamente próximos aos da literatura, com um baixo percentual de variação. O valor de Miller e Tillman (2008) para o teor de Carbono foi 3% maior, já o de hidrogênio foi praticamente o mesmo para os três dados de comparação. O teor de nitrogênio e oxigênio de Mazzoneito et al. (2012) foram maior, sendo menos de 1% para esse e quase 2% para aquele.

E o Gráfico 3, faz uma comparação com os valores obtidos pelas análises de Poder Calorífico realizadas com os de Miller e Tillman (2008) e Mazzoneito et al. (2012).

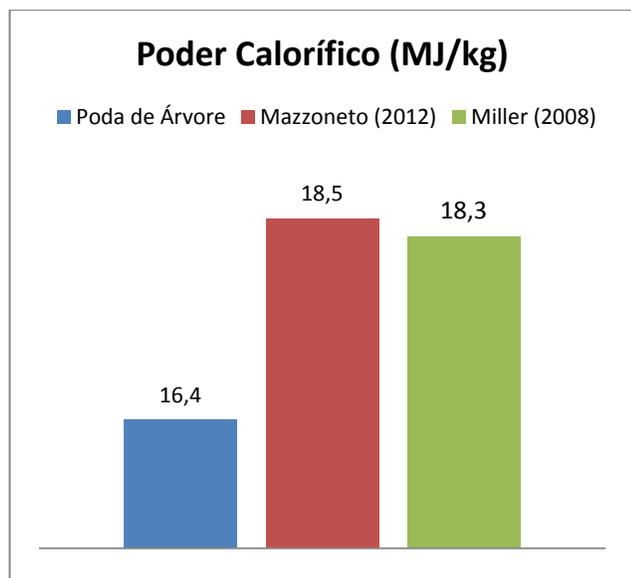


Gráfico 3 - Comparação de resultados referentes ao Poder Calorífico.

Os valores encontrados através da bomba calorimétrica foram menores que o da literatura, mas ainda sim dentro

do valor estipulado por Cortez et al. 2008 para biomassa vegetal, que é de 15,7 MJ/kg

De acordo com a Tabela 4, a seguir, é possível verificar a quantidade de resíduo de poda em Piracicaba - SP e sua representatividade.

Tabela 4 - Quantificação de resíduo de poda em Piracicaba – SP

Serviço de poda	Qtde de caminhões/mês	Massa Mensal (toneladas)	Massa Anual (toneladas)
Prefeitura do Município	270 m ³	131,5	1.578
Concessionária de Energia Elétrica (CPFL)	150 m ³	50	600
Total	420 m³	181,5	2178

Apesar de a massa de poda ser diferente ao longo do ano, esses dados não foram disponibilizados pela SEDEMA, a massa mensal, em toneladas de resíduo, de poda é de 181,50 toneladas e anualmente isso representa 2178 toneladas de biomassa com potencial energético sendo desperdiçada.

De acordo com a Tabela 5, pode-se fazer uma estimativa e dizer que Piracicaba - SP poderia gerar 112,7 MWh/mês ou 1.352,5 MWh por ano, além da visualização de valores monetários para cada alternativa de processamento.

Os fatores de conversão da Tabela 5 são apresentados por EPA (2002), Tomalsquin (2003) e Young (2010).

Tabela 5 - Energia potencial calculada em MWh a partir dos resíduos de poda de Piracicaba – SP

Processo	Taxa de Conversão (MWh / ton RSU)	RSU/Mês (ton)	MWh/mês	R\$/mês	MWh/ano	R\$/ano	US\$/ano
Incineração ¹	0,523	181,5	94,9	14.238,7	1.139,1	239.209,7	779.823,8
Incineração ²	0,769	181,5	139,6	20.936,0	1.674,9	351.725,2	1.146.624,2
Incineração ³	0,493	181,5	89,5	13.421,9	1.073,8	225.488,3	735.092,0
Pirólise ³	0,518	181,5	94,0	14.102,6	1.128,2	236.922,8	772.368,5
Pirólise/Gaseificação ³	0,621	181,5	112,7	16.906,7	1.352,5	284.033,0	925.947,5
Gaseificação Convencional ³	0,621	181,5	112,7	16.906,7	1.352,5	284.033,0	925.947,5
Gaseificação com arco de plasma ³	0,74	181,5	134,3	20.146,5	1.611,7	338.461,2	1.103.383,5

Considerando-se o MWh a R\$ 150,00 (segundo site Câmara de Comercialização de Energia Elétrica - CCEE – Setembro/2016 - região sudeste) e US\$ 1 = R\$ 3,26 (UOL ECONOMIA – Setembro/2016). RSU: Resíduo Sólido Urbano. Fonte: Elaborado pelos autores (2016), com base nos valores de ¹EPA (2002), ²Tolmasquim (2003) e ³Young (2010)

Considerando os valores de MWh a aproximadamente R\$ 150,00 para Setembro de 2016 na região Sudeste, a economia se caso o aproveitamento energético dos resíduos de poda de árvores fosse implantado atualmente, seria em média R\$ 285.000,00 por ano, variando de acordo com o método de processamento escolhido. Entretanto vale lembrar que durante a crise hídrica de 2014 o MWh chegou a custar aproximadamente R\$ 510,00 e a economia seria de aproximadamente R\$ 665.000,00.

O montante de energia elétrica que poder ser gerado pela poda de árvores não é impactante no montante consumido, entretanto é importante enfatizar que esse material é descartado em lixões e aterros, gerando e emitindo gases do efeito estufa a partir da sua oxidação (estabilização), logo, um fim energético é uma alternativa viável e relevante, principalmente em épocas de crise energética e hídricas.

4 CONCLUSÕES

A biomassa de poda árvore do município de Piracicaba apresenta potencial energético próximo ao da literatura pesquisada e foi possível caracterizar seus componentes químicos.

Fontes renováveis alternativas para produção de energia elétrica são essenciais para uma diversificação da matriz energética brasileira, principalmente em cenários de crise energética.

Dependendo da rota de conversão utilizada o potencial energético de poda de árvore poderia gerar em média R\$ 285.000,00 por ano, considerando dados de 2016 e R\$ 665.000,00 por ano considerando dados de 2014, durante a crise energética.

5 REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, ASTM D1102-84: **Standard Test Method Ash in Wood**, p.2.2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, ASTM D3176 – 15 **Standard Practice for Ultimate Analysis of Coal and Coke**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, ASTM E1755-01: **Standard Test Method Ash in Biomass**. p.3. 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, ASTM E711-87: **Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter**, p.8. 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, ASTM E775 – 15: **Standard Test Methods for Total Sulfur in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel**, 2004

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, ASTM E777-87: **Standard Test Method for Carbon and Hydrogen in the Analysis Sample of Refuse-Derived Fuel**, 2004

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, ASTM E778 – 15: **Standard Test Methods for Nitrogen in Refuse-Derived Fuel Analysis Samples**, 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, ASTM E870 - 82: **Standard Test Method for Analysis of Wood Fuels**, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, ASTM E871-82: **Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels**, p.2.2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, ASTM E872: **Standard Test Method Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels**, p.3. 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação. **Rio de Janeiro, 2004. 71 p.**

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Preço de liquidação das diferenças -PLD. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/inicio?_afzLoop=699111516658279#%40%3F_afzLoop%3D699111516658279%26_adf.ctrl-state%3Dqj9qadp7n_4>. Acesso em: 29 de Junho de 2016.

CORTEZ, C. R. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda das árvores urbanas para a geração de energia: Estudo de caso: AES ELETROPAULO**. Programa de pós- graduação em energia. USP Universidade de São Paulo. São Paulo 2011.

CORTEZ, L. A. B; LORA, E. D. S; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Editora UNICAMP Universidade Estadual de Campinas. Campinas 2008.

EPA, U.S Environmental Protection Agency – **Solid Waste Management and Green House Gases – A Life-Cycle Assessment of Emissions and Sinks**. US.EPA. 2002

FARIAS, F. O. M. **Caracterização de biomassas brasileiras para fins de aproveitamento energético** Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química - Campinas, SP, 2012.

LEME, M. M. V. **Avaliação das Opções Tecnológicas para geração de energia através dos Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso**, Dissertação de Mestrado em Engenharia da Energia - Universidade Federal de Itajubá, 2010. p.123.

MAZZONETTO, A. W.; OBATA, S. H. & ALMEIDA, I. B. P. de **Potencial energético do resíduo da construção civil visando construções sustentáveis e envolvimento dos alunos** in PBL2016 International Conference. São Paulo, 2016

MAZZONETTO, A. W; VISSOTTO, J. P; NEVES, R. C; SÁNCHEZ, E. M. S; SÁNCHEZ, C. C. **Caracterização de resíduos de poda, capina e serragem urbana para geração de energia**. CONEM, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica 2012. São Luís 2012.

MEIRA, A. M. **Gestão de resíduos da arborização urbana**. USP/ESALQ Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2010.

MILLER E TILLMAN, B. G. and Tillman, D. A. **Combustion Engineering Issues for Solid Fuels**, San Diego, United States of America, 2008.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Relatório final do Balanço Energético Nacional 2013**, ano base 2012.

NEVES, R. C. **Reforma de gás de gaseificação por meio de tocha de plasma: ensaios preliminares**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica – Campinas, SP, 2013

RENDEIRO, G; NOGUEIRA, M. F. M; BRASIL, A. C. M; CRUZ, D. O. A; GUERRA, D. R. S; MACÊDO, E. M; ICHIHARA, J. A. **Combustão e Gaseificação de biomassa sólida. Soluções energéticas para a Amazônia**. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2008.

SÁNCHEZ, C. G.; SANTOS, Francisco José dos; BIZZO, Waldir Antônio; SANCHEZ, Elisabete Maria Saraiva; FERNÁNDES, Marcelo Côrtes; BEHAINE, Jhon Jairo Ramires; Del CAMPO, E. R. B.; Cruz, W. C.. **Tecnologia da Gaseificação de biomassa**. 01. ed. Campinas: Átomo, 2010. v. 01. 432p

SANTOS, J. R. S. **Estudo da biomassa torrada de resíduos florestais de eucalipto e bagaço de cana de açúcar para fins energéticos**. USP/ESALQ Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba 2012.

TOLMASQUIM, M. T (Org.). **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de janeiro: CINERGIA, 2003, p.515.

UOL ECONOMIA. **Cotações**. Uol Economia, 29 de Junho de 2016. Disponível em: <<http://economia.uol.com.br/cotacoes/>>. Acesso em: 12 de 29 de Junho de 2016.

VISSOTTO, J. P, MAZZONETTO, A. W., NEVES, R. C, SÁNCHEZ, E. M. S., SÁNCHEZ, C. G. **Caracterização de Pinus, Eucaliptus, Casca de Eucaliptus e Resíduos Florestais e de Destoca para fins energéticos** CONEM, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica 2012. São Luís 2012.

VISSOTTO, J. P., **Cogaseificação de serragem de pinus e lodo de esgoto em leito fluidizado**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica – Campinas, SP, 2013

YOUNG, G. C. **Municipal Solid Waste To Energy Conversion Processes: Economic, Technical, And Renewable Comparison** John Wiley & Sons. Hoboken, New Jersey, 2010, 394p.