**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA**

DAFNE PEREIRA DA SILVA

**AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ADENSAMENTO DE RESÍDUOS DE
PODA DE ÁRVORE VISANDO AO APROVEITAMENTO
ENERGÉTICO: O CASO DO CAMPUS DA USP NA CAPITAL**

**SÃO PAULO
2016**

DAFNE PEREIRA DA SILVA

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE ADENSAMENTO DE RESÍDUOS DE PODADE
ÁRVORE VISANDO AO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO: O CASO DO CAMPUS
DA USP NA CAPITAL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Energia do Instituto de Energia
e Ambiente da Universidade de São Paulo para
a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientador: Prof^ª. Dr^ª Suani Teixeira Coelho

Versão Corrigida
(versão original disponível na Biblioteca do Instituto de Energia e Ambiente e na Biblioteca
Digital de Teses e Dissertações da USP)

SÃO PAULO
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Dafne Pereira da.

Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético :o caso do campus da USP na capital / Dafne Pereira da Silva; orientador : Suani Teixeira Coelho .– São Paulo, 2016.

125 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

1. Energia de biomassa. 2. Fontes alternativas de energia. I.
Título.

Nome: SILVA, Dafne Pereira da

Título: Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético: o caso do Campus da USP na Capital.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em: 23 de setembro de 2016

Banca Examinadora

Prof^a. Dr^a. Patricia H. L. dos Santos
Matai

Instituição: USP - IEE

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof^a. Dr^a. Cláudia Echevengua
Teixeira

Instituição: IPT

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. Carlos Alberto Labate

Instituição: ESALQ

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof^a. Dr^a. Suani Teixeira Coelho
Presidente

Instituição: USP - IEE

Assinatura: _____

Para ti dedico somente minha essência.

Dedico meus títulos somente para quem achar mais importante ter do
que ser.

AGRADECIMENTOS

Meu anjo,

Chegamos ao final de mais uma etapa, quando digo chegamos é porque você teve participação especial nisso. Muitas vezes, me vi dedicando o meu tempo a esse projeto e não a você, mas sei que você me entende, sei que você sabe a importância disso em minha vida. Mesmo não estando tão presente em alguns momentos, espero que você tenha sentido o meu amor sempre por perto.

Anjo, você me ajudou a chegar até aqui, e isso talvez você não saiba, mas você foi essencial para a minha caminhada. Pessoa que me mostrou o amor em sua forma mais nua, despido de valores, despido de pré-conceitos, despido de cor, de raça e de idade. Um amor puro, sem exigências, sem trocas, um amor suficiente em si mesmo. Por esse motivo quando você nasceu o seu apelido não poderia ser outro, a não ser anjo, meu anjinho dos cabelos dourados e cacheados.

Você sabe o quanto você se doou para mim? Você sabe quantos carinhos você me fez? Quando o que eu mais precisava era só uma mãozinha pequenina acariciando o meu rosto. Anjo, meu anjo, você me guiou até aqui, mesmo agora se tornando uma adolescente, tendo suas próprias opiniões, fazendo o papai e a mamãe questionarem muitas coisas, você continua me guiando, me ensinando cada dia mais o que é o amor. Obrigada!

É anjo, devo agradecer também a dois companheiros ilustres das nossas vidas, que nos trouxeram ao mundo, pessoas de amor incondicional. Ao papai, por ter sido um ótimo pai, por mostrar que o conhecimento é um dos bens mais preciosos e por me ensinar, mesmo que inconscientemente, que o contato com a natureza pode ser único e sem volta.

À mamãe, por ser esse exemplo de mulher, companheira, amiga e mais do que isso por me mostrar que ser mãe também pode ser um dom, um dom que ela tem de sobra. Um exemplo a ser seguido.

E as vovós, como não falar dessas duas mulheres que nos mimaram com as melhores comidinhas, com os mais gostosos carinhos, com os melhores conselhos e com as melhores histórias de vida, exemplo de mulheres guerreiras.

Bom meu anjo, preciso agradecer a uma pessoa fundamental da minha vida, aquela que Deus escolheu para ser meu companheiro, meu marido, meu amigo, meu amante, pai do nosso bebê que está a “bordo”. Aquele que você deu o apelido mais carinhoso que conheço, sim o seu Pinóquio e o meu Pretinho. Esse merece um agradecimento especial, por ter me aguentado de todas as maneiras, por ter tido paciência, por ter acreditado que eu seria capaz,

por ter me apoiado em todos os momentos e por nunca me deixar desistir. Homem de muitas histórias, histórias de luta, histórias de conquistas, histórias tristes e felizes, histórias que construíram um homem ao qual dedico toda a minha essência. Amor, simplesmente meu amor.

Fruto do meu amor e do pretinho, tivemos nossa maior benção, esse pequeno ser que ainda nem tem nome, e tão pouco conhece o mundo com seus próprios olhos, mas que já esta sendo um ótimo companheiro na jornada da sua mãe. Obrigada meu pequeno gutiguti ou misturinha, você me garantiu momentos de muita felicidade e calma. Você é o meu dia ensolarado, mesmo na cidade cinzenta de SP.

Anjo, são tantas as pessoas que gostaria de agradecer, a nossa família de forma geral, por ter ensinado o que é uma família, por sempre estarem dispostos a ajudar, por serem simplesmente a nossa família. Agradeço, também, a família dos bolinhos, que me distraiu em momentos que eram necessários e me fez rir inúmeras vezes, com um simples: Oh trem que pula!

Agradeço também a Mari e a Rê por todos os momentos que tivemos juntas, por todas as conversas e risadas, por serem as irmãs que escolhi em vida. A Li, por não me deixar desistir e mostrar o quanto o amor pode ser edificador, por me ajudar em todos os momentos, pelas inúmeras conversas e desabafos, por ser esse exemplo de mulher guerreira e verdadeira.

Também devo agradecer aos colegas do trabalho: Sandra, Camila, Jaqueline, Eduardo, Filipe e Rafael. E ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo, por disponibilizar o laboratório para a realização dos ensaios.

À minha orientadora Prof^a Suani, pelo incentivo e apoio, os quais foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

E mais importante do que tudo, a Deus pela imensidão do seu amor e por sua força que nos renova a cada dia.

Obrigada!

“Deus não nos deu o espírito de covardia, mas de poder, de amor e de moderação.”

Timóteo 2. 1:7 Bíblia de Jerusalém.

RESUMO

SILVA, D. P. da. Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético: o caso do Campus da USP na Capital. 2016. 123 p. Dissertação (Mestrado em Energia) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016.

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são particularmente difíceis de gerenciar por se tratar de um resíduo muito heterogêneo em sua composição (resíduos domésticos, de construção civil, de poda de árvore, entre outros). Com isso torna-se necessário o conhecimento das atuais tecnologias de tratamento de resíduos, para que busquem soluções ambientalmente adequadas, economicamente viáveis, socialmente justas e politicamente aceitáveis. Com base nessa premissa e com a necessidade de se estudar novas fontes renováveis de energia na busca por combustíveis alternativos aos combustíveis fósseis, a utilização de resíduos de poda de árvore como fonte energética apresenta aspectos benéficos ao país, desde que viável econômica e tecnicamente. Assim este trabalho analisa a atual situação da destinação dos resíduos de poda de árvore, e apresenta algumas alternativas para seu aproveitamento energético e não energético. Sendo o objetivo principal desta dissertação avaliar o potencial de utilização dos resíduos de poda de árvore para o seu aproveitamento energético por meio dos processos de adensamento de biomassa (peletização e briquetagem), utilizando como base o caso do campus da Universidade de São Paulo na capital. Nos ensaios de peletização foi possível obter *pellets* com densidade energética elevada, entre 6 GJ/m³ e 8 GJ/m³, o que corresponde a uma densidade energética de 6 a 9 vezes maior que a da poda de árvore *in natura*. Os briquetes apresentaram uma densidade energética entre 5 GJ/m³ a 6 GJ/m³, ou seja, uma densidade energética de 5 a 6 vezes maior que da poda de árvore *in natura*. Entretanto os valores obtidos de durabilidade mecânica dos briquetes foram considerados insatisfatórios nas condições estudadas, ao contrário dos *pellets*, que apresentaram elevados valores. Neste estudo o processo de peletização se mostrou mais viável tecnicamente do que o de briquetagem, visto que os *pellets* de resíduo de poda de árvore garantiram uma densidade energética elevada e boa resistência mecânica.

Palavras-chave: Resíduo de poda de árvore. Aproveitamento energético. Adensamento de biomassa.

ABSTRACT

SILVA, D. P. da. Assessment of densification process of tree pruning waste aimed at energy use: the case of Campus of USP in Capital. 2016. 123 p. Thesis (Master in Energy) – Pos Graduate Program in Energy, University of São Paulo, São Paulo, 2016.

Municipal solid wastes (MSW) are particularly difficult to manage because it is a very heterogeneous waste in its composition (household waste, construction, tree pruning, etc). It becomes more than necessary knowledge of current waste treatment technologies, to seek environmentally adequate solutions, economically viable, socially fair and politically acceptable. Based on these assumptions and the need to study new renewable energy sources in the search for alternative fuels to replace fossil fuels, the use of tree pruning waste as an energy source have beneficial aspects to the country, since economic viable and technically. So this paper analyzes the current situation of final disposal of tree pruning waste, and presents some alternatives for its energy and non-energy use. Since the main objective of this work is to evaluate the potential use of tree pruning waste for their energy application through biomass densification processes (pelletizing and briquetting), based on the case of the campus of the University of São Paulo in capital. In the pelleting tests it was possible to obtain pellets with high energy density between 6 GJ/m^3 and 8 GJ/m^3 , which corresponds to an energy density of 6 to 9 times greater than that of tree pruning in nature. The briquettes had an energy density of between 5 GJ/m^3 6 GJ/m^3 , in other words a power density of 5 to 6 times that of tree pruning in nature. However the values obtained from mechanical durability of briquettes were found to be unsatisfactory under the conditions studied, unlike pellets, they showed high values. In this study, the pelleting process is technically more feasible than briquetting. Since the tree pruning waste pellets ensured a high energy density and good mechanical strength

Keywords: Tree pruning waste. Energy application. Biomass densification.

Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama de etapas deste trabalho.....	19
Figura 2 - Fluxograma de possíveis destinações finais para o RSU.....	25
Figura 3 - Marcos regulatórios na gestão de RSU.....	26
Figura 4 - Gerenciamento e Gestão Integrada de RSU: etapas do sistema de gerenciamento e fatores intervenientes.....	29
Figura 5 - Geração de RSU total nos anos de 2013 e 2014.....	31
Figura 6 - Comparação dos gastos em RSU <i>per capita</i> (R\$/hab/ano) em algumas cidades do Mundo com a quantidade de resíduos <i>per capita</i>	32
Figura 7 - Disposição final dos RSU no Brasil, de 1991 a 2014.....	33
Figura 8 - Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou público encaminhados para destinação final.....	34
Figura 9 - Componentes das árvores.....	38
Figura 10 - Produção de <i>pellets</i> em milhões de toneladas.....	43
Figura 11- Processos de conversão energética de biomassa.....	45
Figura 12 - Variáveis durante o adensamento de biomassa.....	46
Figura 13 - Extrusora de parafuso sem fim.....	49
Figura 14 - Prensa de pistão mecânico.....	50
Figura 15 - Prensa de pistão hidráulico.....	51
Figura 16 - Prensa de rolos.....	52
Figura 17 - Matriz do tipo cilíndrica vertical, vista frontal.....	53
Figura 18 - Matriz do tipo plana.....	53
Figura 19 - Forno meia-laranja ou rabo-quente.....	56
Figura 20 - Forno de colmeia com câmara externa de calor, retangular com coleta de gases.....	57
Figura 21 - Gaseificadores com leito fixo. (a) Co-corrente e (b) contra-corrente.....	59
Figura 22 - Gaseificadores de leito fixo do tipo: (a) borbulhante e (b) circulante.....	60
Figura 23 - Desenho esquemático das etapas de tratamento biológico, desde a alimentação no reator até o aproveitamento energético do biogás produzido.....	64
Figura 24 - Desenho esquemático do sistema Bekon.....	65
Figura 25 - Exemplo de sistema de leiras revolvidas com equipamento auto-propelidos.....	69
Figura 26 – Leiras com revolvimento manual.....	69
Figura 27 - Exemplo de sistema de compostagem com leiras estáticas aeradas.....	70
Figura 28 – Leiras estáticas aeradas.....	71

Figura 29 - POMs. a) utensílio doméstico; b) canecas, caixas e porta copos; c) brinquedos em miniaturas.	72
Figura 30 - Vantagens e desvantagens das tecnologias	74
Figura 31 – Campi da Universidade de São Paulo no Estado de São Paulo.	75
Figura 32 - Universidade de São Paulo: Campus da Capital.....	76
Figura 33 - Fluxogramas das atividades experimentais de avaliação tecnológica de pré-tratamento físico.	79
Figura 34 - Balança de umidade.	82
Figura 35 - Equipamento Ro-Tap utilizada para determinação da distribuição granulométrica.	82
Figura 36 - Ensaio de determinação da densidade <i>bulk</i>	83
Figura 37- Estufa com circulação mecânica.	84
Figura 38 - Imagens ilustrativas do: (a) e (b) Picador; (c) Peneira de corte do picador (10 mm); e (d) Peneirador vibratório.....	85
Figura 39 - Imagem da poda de árvore de microscópio eletrônico (a) Poda de árvore sem folha abaixo de 4,0 mm; (b) Poda de árvore sem folha abaixo de 1,7mm; (c) Poda de árvore com folha abaixo de 4,0 mm; (d) Poda de árvore com folha abaixo de 1,7mm.....	86
Figura 40 - Processo de adensamento por peletização.	89
Figura 41 - Processo de adensamento por briquetagem.	89
Figura 42 - Ensaio de Durabilidade mecânica dos <i>pellets</i> . (a) Equipamento utilizado para o ensaio; (b) <i>pellets</i> de galhos no início do ensaio; (c) <i>pellets</i> de galhos após o ensaio; (d) <i>pellets</i> de galhos com folhas no início do ensaio; (e) e (f) <i>pellets</i> de galhos com folhas após o ensaio.	90
Figura 43 - Ensaio de Durabilidade mecânica de briquetes: (a) Briquetes antes do ensaio; (b) Tambor em rotação; (c) Briquetes após ensaio.	91
Figura 44 - Recipientes para a determinação da densidade <i>bulk</i> . (a) recipiente de 5 L e (b) recipiente de 50 L.	92
Figura 45 - Ensaio de determinação de densidade <i>bulk</i> . (a) <i>Pellets</i> no recipiente de 5 L e (b) Briquetes no recipiente de 50 L.....	93
Figura 46 - Distribuição granulométrica da poda de árvore.....	98
Figura 47 - <i>Pellets</i> de poda de árvore antes e após o teste de durabilidade.....	101
Figura 48 - <i>Pellets</i> do ensaio PP3.....	101
Figura 49 - Briquetes de poda de árvore antes e depois do teste de durabilidade.	103

Lista de tabelas

Tabela 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos RSU coletados no Brasil.....	35
Tabela 2 - Composição dos resíduos coletados diariamente no município de São Paulo	36
Tabela 3 - Poder calorífico superior de vários combustíveis	42
Tabela 4– Limitações dos equipamentos.....	80
Tabela 5 - Relação de ensaios de caracterização da poda	81
Tabela 6 - Granulometria e aspecto inicial e final das biomassas estudadas.	86
Tabela 7 - Equipamentos de adensamento utilizados.....	88
Tabela 8 - Caracterização das biomassas.	95
Tabela 9 - Valores aceitáveis de Cl e S para uso doméstico e industrial.	96
Tabela 10 - Condições de ensaio e resultados da caracterização dos <i>pellets</i> de poda de árvore.	100
Tabela 11 - Condições de ensaio e resultados da caracterização dos briquetes de poda de árvore.	102
Tabela 12 - Melhores resultados obtidos pelo emprego da tecnologia de peletização e briquetagem para cada biomassa avaliada.	104

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
1.1.	Objetivo	17
1.1.1.	Objetivos específicos.....	17
1.2.	Justificativa, relevância e motivação	18
1.3.	Metodologia	18
1.4.	Estrutura capitular da dissertação	20
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1.	Resíduos sólidos urbanos	22
2.1.1.	Política Nacional de Resíduos Sólidos.....	26
2.1.2.	Contexto dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil	30
2.2.	Resíduos de poda de árvore.....	37
2.3.	Biomassa como fonte de energia	40
2.4.	Aproveitamento energético dos resíduos de poda de árvore	44
2.4.1.	Processos Físicos	45
2.4.1.1.	Extrusão.....	49
2.4.1.2.	Briquetagem	50
2.4.1.3.	Peletização.....	52
2.4.2.	Processos Termoquímicos	54
2.4.2.1.	Combustão.....	54
2.4.2.2.	Pirólise.....	56
2.4.2.3.	Gaseificação	58
2.4.3.	Processo Biológico	60
2.4.3.1.	Digestão anaeróbia	61
2.5.	Aproveitamento não energético dos resíduos de poda de árvore.....	66
2.5.1.	Compostagem (Digestão aeróbia).....	66
2.5.2.	Pequenos Objetos de Madeira (POMs).....	72
2.6.	Aplicabilidade das tecnologias aos resíduos de poda de árvore.....	73
3.	O CASO DO CAMPUS DA USP NA CAPITAL.....	75
3.1.	Local de estudo e sua de gestão de resíduos de poda de árvore	75
3.2.	Materiais e métodos	78
3.2.1.	Caracterização da poda de árvore	80
3.2.2.	Pré-processamento da poda de árvore	83
3.2.3.	Ensaio de adensamento	87

3.2.4. Caracterização dos produtos adensados	90
3.3. Resultados e discussão	94
3.3.1. Poda de árvore	94
3.3.1.1. Parâmetros químicos	94
3.3.1.2. Parâmetros físicos	98
3.3.2. Produtos adensados	99
3.3.2.1. <i>Pellets</i> de poda de árvore	99
3.3.2.2. Briquetes de poda de árvore	102
3.2 Avaliação das tecnologias de adensamento de poda de árvore.....	104
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107
5. PERSPECTIVAS FUTURAS.....	108
REFERÊNCIAS	110
ANEXO A – Entrevista com engenheira da área de Serviço Técnico de Gestão Ambiental da Prefeitura do Campus.....	123

1. INTRODUÇÃO

A disposição final dos resíduos sólidos produzidos no meio urbano é um dos mais sérios problemas ambientais vividos pela humanidade, visto que por muito tempo, esses resíduos foram considerados subprodutos do sistema econômico. A prioridade era apenas remover os resíduos para locais distantes das áreas habitadas (EIGENHEER, 2009). No entanto com o intenso aumento populacional o volume de resíduos se tornou cada vez maior e os destinos finais, como os aterros sanitários, cada vez mais saturados.

No Brasil a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS (BRASIL, 2010) marcou o início de uma forte articulação institucional envolvendo os três entes federados (União, Estados e Municípios), o setor produtivo e a sociedade em geral na busca de soluções para os problemas graves e de grande abrangência territorial que comprometem a qualidade de vida dos brasileiros. Entretanto não significa que os problemas gerados pelos resíduos sólidos urbanos foram sanados.

Segundo a ABRELPE (2014) 9,4 % de todo resíduo produzido no Brasil não foi coletado em 2014; esses resíduos certamente tiveram uma destinação inadequada, como serem queimados, enterrados ou jogados em terrenos baldios. Isso não significa dizer que os 90,6 % dos resíduos coletados tiveram uma destinação adequada, pois 41,6 % deles ainda tem uma destinação inadequada (lixões e aterros controlados). Essa situação traz consequências como a poluição do ar, solos e recursos hídricos, afetando também a saúde da população.

A deficiente gestão dos resíduos sólidos urbanos dos municípios tem acarretado altos custos para os municípios, pois além dos problemas ambientais causados, também comprometem grandes áreas para disposição e desprendem alto custo em seu transporte (MEIRA, 2010). Em face de carência de novas áreas para implantação de depósitos de resíduos e a necessidade de se prolongar a vida útil dos mesmos, o tratamento adequado e aproveitamento dos resíduos sólidos, pode ocasionar a minimização da quantidade a ser disposta nestes depósitos e a redução da pressão exercida ao meio ambiente.

Uma gestão sustentável dos resíduos sólidos esta atrelada a escolha do processo mais adequado de tratamento, que depende fundamentalmente das características do resíduo a ser tratado (McDOUGALL et al., 2001; BRASIL, 2010; IPT, 2010). Neste caso ele deve ser pensado desde sua caracterização, segregação na fonte, no sistema de coleta, no tipo de transporte, nas formas de destinação final (reciclagem, compostagem, aproveitamento

energético, entre outras) e só então em sua disposição final (distribuição ordenada de rejeitos em aterros sanitários).

Desta forma entende-se que não existe uma solução única e que arranjos e associações de alternativas podem ser possíveis, considerando as características dos resíduos, da infraestrutura já instalada, das partes interessadas, bem como requisitos legais, sociais e econômicos.

De acordo com esse cenário, surge a necessidade de avaliar as tecnologias de aproveitamento energético e não energético para cada tipo de resíduo gerado pelos municípios.

Dentre os resíduos sólidos urbanos encontram-se os resíduos de poda de árvores, os quais, também podem ser associados a impactos ambientais gerados em decorrência de uma gestão inadequada feita pelos municípios. Dados de coleta de poda de árvores são dificilmente encontrados, visto que em muitos municípios o serviço de poda bem como sua destinação é realizado por empresas contratadas ou pelas concessionárias de energia elétrica, ou ainda, em decorrência da sua disposição inadequada realizada pela população e pelo município, que dispõe terrenos baldios, lixões e aterros, horto florestal e espaços verdes do município.

Os resíduos de poda de árvore geram um volume considerável de biomassa florestal, podendo ser aproveitado de forma energética e não energética. Neste caso, o resíduo de poda de árvore poderia deixar de ser um passivo ambiental, acarretando ganhos econômicos e ambientais de interesse à sociedade.

O aproveitamento desses resíduos para fins energéticos é vantajoso no sentido de se tratar de uma fonte de energia renovável, alternativa às tradicionais e poluentes fontes fósseis derivadas de petróleo, tendo em vista a crescente população consumidora e o esgotamento das fontes energéticas não renováveis (GOLDEMBERG, 2010; FARIAS; SELLITO, 2011).

Os processos de conversão energética da biomassa florestal podem ser classificados segundo a natureza dos processos primários aplicados a biomassa florestal em: processos físicos (peletização, briquetagem e extrusão), termoquímicos (combustão, pirólise e gaseificação) e biológicos (digestão anaeróbia) (NOGUEIRA; LORA, 2003; BOYLE, 2004; e CORTEZ, 2011).

A heterogeneidade dos resíduos de poda e sua baixa densidade *bulk*¹ fazem com que o processo físico de adensamento possa ser bastante vantajoso, por ser uma tecnologia simples

¹ Densidade *bulk*, também conhecida como densidade volumétrica é dada pela relação entre massa de partículas necessária para encher um recipiente e seu volume conhecido.

que aumenta a densidade *bulk* do material e sua densidade energética, tornando-o um combustível mais homogêneo e de fácil transporte.

O processo físico de adensamento envolve o uso de pressão mecânica, com ou sem a presença de agente aglomerante, capaz de reduzir o volume da matéria-prima e aumentar seu conteúdo energético por unidade de volume. A biomassa florestal apresenta características favoráveis à compressão, além de conter aglomerantes inerentes natural em sua estrutura anatômica na forma de lignina (WERTHER et al., 2000).

A aplicação da técnica de adensamento usando resíduos de poda de árvores seria de grande valia permitindo integrar uma forma de tratamento do resíduo de poda de árvore ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos gerados pelo município. A utilização dos resíduos de poda de árvore com aproveitamento energético é de grande importância para o município, pois ele deixará de desperdiçar um insumo com características energéticas, podendo ainda obter retorno financeiro.

Face ao exposto, julgou-se de grande interesse estudar nesta pesquisa o processo de adensamento de resíduos de poda de árvore, via peletização e briquetagem. Para tanto, foi realizado um diagnóstico da gestão de resíduos de poda de árvores na USP – Campus da Capital, por se tratar de uma das áreas mais arborizadas da cidade de São Paulo.

1.1. Objetivo

Esta dissertação propõe, como objetivo principal, avaliar o potencial de utilização dos resíduos de poda de árvores urbanas para o seu aproveitamento energético por meio dos processos de adensamento (peletização e briquetagem), tendo como base o caso da Universidade de São Paulo, Campus da Capital.

1.1.1. Objetivos específicos

Entre os objetivos específicos destacam-se:

- (i) Realizar um estudo sistemático da situação atual dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, no Estado e na cidade de São Paulo;

- (ii) Fazer um diagnóstico da atual situação dos resíduos sólidos gerados no Campus da Capital da Universidade de São Paulo (USP);
- (iii) Estudar os processos de peletização e briquetagem dos resíduos de poda de árvores;
- (iv) Avaliar a aplicabilidade técnica dos métodos de adensamento de resíduos de poda de árvores estudados neste trabalho.

1.2. Justificativa, relevância e motivação

A expressiva geração de resíduos sólidos urbanos no Brasil e sua deficiente gestão impulsionou o estudo de avaliação de uma possível alternativa para o uso final desses resíduos. Ademais, a necessidade de se estudar novas fontes renováveis de energia, ajudou na busca por combustíveis alternativos aos combustíveis fósseis.

Com base nessas duas premissas optou-se por estudar a possibilidade de geração de combustíveis sólidos a partir de resíduos de poda de árvores que seriam dispostos em lugares indevidos, desperdiçando sua capacidade energética. As tecnologias escolhidas foram a peletização e a briquetagem, as quais serão analisadas quanto sua aplicabilidade tecnológica.

Considera-se que o processo de adensamento dos resíduos de poda de árvore é uma alternativa para a redução do volume de resíduos sólidos urbanos descartados indevidamente, assim como uma alternativa de fonte de energia renovável em substituição a lenha, por exemplo. É nesse contexto que repousa a maior motivação desta dissertação. Esta reflexão justifica-se e ancora-se na esperança de que a geração, gestão e destinação final dos resíduos sólidos urbanos sejam repensadas.

1.3. Metodologia

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, adotou-se uma abordagem em três etapas principais, conforme o diagrama da Figura 1.

Figura 1 - Diagrama de etapas deste trabalho

Fonte: elaboração própria

A primeira etapa consiste em uma revisão da literatura buscando sistematizar as informações sobre resíduos sólidos urbanos. Depois são detalhados os resíduos de poda de árvore, objeto deste estudo. Nesta primeira parte da revisão reuniu dados desde as legislações vigentes aplicadas aos resíduos até o levantamento do cenário dos resíduos sólidos urbanos no Brasil e resíduos de poda de árvore na USP – Campus da Capital.

Com relação à revisão da literatura feita sobre os resíduos sólidos e resíduos de poda de árvore urbana, percebeu-se que embora exista legislação tratando de resíduos sólidos urbanos desde 2007, com a Política Nacional de Saneamento Básico, e normas da ABNT desde 2004, a gestão brasileira de resíduos sólidos urbanos ainda é pouco eficiente. Muitos resíduos com valores econômicos energéticos ou não energéticos ainda são desperdiçados quando depositados em aterros sanitários ou vazadores a céu aberto. Em vista disso realizou-se uma segunda parte na revisão da literatura, onde foram identificadas possíveis tecnologias que garantissem um aproveitamento energético ou não energético dos resíduos de poda de árvore.

Para que o estudo pudesse ser mais detalhado, na segunda etapa, optou-se por escolher uma área delimitada, com prefeitura própria e bem arborizada, onde foram coletadas informações sobre a geração de resíduos de poda de árvore. O local escolhido foi o Campus da Universidade de São Paulo da Capital (Cidade Universitária), que possui uma Prefeitura (PUSP-C) organizada para gerir a Universidade com serviços de infraestrutura e manutenção, bem como: a limpeza urbana, planejamento do sistema viário, gestão integrada e convivência.

A elaboração do diagnóstico dos resíduos de poda de árvore do Campus foi realizada através da análise de documentos de licitação do serviço de poda e remoção da arborização e a realização de entrevista com uma engenheira da área de Serviço Técnico de Gestão Ambiental da Prefeitura do Campus USP da Capital (PUSP-C).

A terceira etapa consistiu em uma pesquisa experimental, a qual visava realizar ensaios de adensamento de biomassa por peletização e briquetagem. Nos ensaios foram utilizados os resíduos de poda de árvores gerados no Campus da USP na Capital, os quais foram caracterizados quanto a parâmetros físico-químicos.

Para a avaliação da aplicabilidade da tecnologia nos resíduos estudados foram selecionados dois parâmetros (teor de umidade e tamanho das partículas). Os produtos gerados nesta terceira etapa, também foram caracterizados físico-quimicamente, para que fosse possível analisá-los como combustíveis sólidos resistentes (passíveis de transporte e manuseio), bem como detentores de densidades energéticas significativas.

1.4. Estrutura capitular da dissertação

A dissertação é composta por quatro capítulos. No Capítulo 1 é apresentada a introdução do trabalho bem como o detalhamento dos objetivos propostos por esta dissertação; da justificativa, relevância e motivação deste estudo; a metodologia utilizada para sua elaboração; e sua estrutura capitular.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica do estudo, que aborda as definições e os critérios vigentes de classificação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, consequência da instituição da Política Nacional dos Resíduos Sólidos e de sua regulamentação. Apresenta também, dados sobre a quantidade de resíduos de poda de árvores urbanas gerada no Brasil, as destinações finais e a sua composição gravimétrica. Além de abordar a biomassa como

fonte de energia, e as possíveis tecnologias aplicadas aos resíduos de poda de árvores para o seu uso final energético e não energético. E finalmente apresenta-se uma análise da aplicabilidade das tecnologias levantadas no estudo.

O estudo de caso a ser realizado na Universidade de São Paulo no Campus na Capital está detalhado no Capítulo 3. Nele é apresentado um diagnóstico dos resíduos de poda de árvores gerados na USP no Campus da Capital. Ademais estão descritos os ensaios de adensamento realizados com esse resíduo, a caracterização da matéria prima e dos produtos, bem como a avaliação dos resultados obtidos. Contém ainda uma análise onde foi possível selecionar os melhores produtos baseado em sua densidade energética e sua durabilidade, além de verificar se os processos de adensamento por peletização e por briquetagem são ou não aplicáveis ao resíduo estudado.

E o Capítulo 4 apresenta a conclusão deste trabalho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo constitui-se de quatro grandes seções assim, denominadas: Resíduos sólidos urbanos, Resíduos de poda de árvore, Biomassa como fonte de energia e o Aproveitamento energético e não energético de resíduos de poda de árvore.

A primeira seção versa sobre o conceito e legislação dos resíduos sólidos urbanos, bem como um breve levantamento da problemática dos resíduos sólidos urbanos. Em seguida, é discutida a situação atual dos resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Na segunda seção deste capítulo, é apresentada a definição de poda de árvore e o cenário atual da gestão dos resíduos de poda de árvore no Brasil.

A terceira seção discorre sobre o tema de biomassa como fonte de energia e o contexto da biomassa no setor energético brasileiro. E a quarta e última seção apresenta as tecnologias existentes aplicadas aos resíduos de poda urbana com aproveitamento energético e não energético.

2.1. Resíduos sólidos urbanos

Definições de resíduos invariavelmente se referem à falta de uso ou valor, aquilo que resta, a sobra de um produto, resto de um produto que não deve ser utilizado (MICHAELIS, 2011). Os resíduos sólidos são, também, definidos como material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, nos estados sólidos ou semissólidos (BRASIL, 2010).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas, por meio da Norma Brasileira nº 10.004, os resíduos sólidos são definidos como resíduos nos estados sólido e semissólido que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. De acordo com a NBR nº 10.004 o resíduo sólido pode ser classificado quanto a sua natureza física, sua composição química, pelos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, e quanto a sua origem (domiciliar, comercial, hospitalar, varrição e feiras livres, entre outros).

Historicamente a gestão desses resíduos sólidos era considerada um problema local, entretanto o aumento de sua geração e a sua disposição em locais diferentes dos locais geradores resultava em um conflito quanto à responsabilidade dos resíduos sólidos (TCHOBANOGLIOUS; KREITH, 2002). Na Alemanha, por exemplo, a preocupação com a disposição dos resíduos culminou na Lei de Manejo de Águas em 1957 e na regulamentação dos aterros sanitários e, 1972, com a Lei de Tratamento de Resíduos. Para eles, a separação na fonte geradora dos diferentes resíduos é a base do seu complexo sistema de gestão de resíduos sólidos (EIGENHEER, 2009).

No Brasil a aprovação da Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS marcou o início de uma forte articulação institucional envolvendo os três entes federados – União, Estados e Municípios, o setor produtivo e a sociedade em geral na busca de soluções para os problemas graves e de grande abrangência territorial que comprometem a qualidade de vida dos brasileiros.

O desenvolvimento de um sistema de gestão integrada de resíduos sólidos parte da premissa do desenvolvimento sustentável, definido como "o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades" (WCED, 1987). Isso garante a sinergia entre o desenvolvimento econômico, social e ambiental, resultando em uma relação direta entre a geração de resíduo, o armazenamento, coleta, transporte, transferência, reciclagem, recuperação, tratamento e disposição.

A gestão de resíduos no Brasil ainda é pouco desenvolvida nos termos de sustentabilidade. Segundo a ABRELPE (2014) 9,4 % de todo resíduo produzido no Brasil não foi coletado em 2014, esses resíduos provavelmente tiveram uma destinação inadequada, como serem queimados, enterrados ou jogados em terrenos baldios. Entretanto, isso não significa dizer que os 90,6 % dos resíduos coletados tiveram uma destinação adequada, pois 41,6 % desses resíduos ainda tem uma destinação inadequada (lixões e aterros controlados). Essa situação traz consequências como a poluição do ar, solos e recursos hídricos, afetando também a saúde.

Os lixões ou vazadouros a céu aberto são caracterizados por áreas de disposição final de resíduos sólidos sem nenhuma preparação prévia do solo. Os resíduos assim lançados acarretam problemas à saúde pública, como proliferação de vetores de doenças, geração de maus odores, e principalmente, poluição do solo e das águas subterrâneas e superficiais pela

infiltração do chorume². Já os aterros controlados são áreas em que os resíduos sólidos dispostos são cobertos por uma camada de material inerte, entretanto não dispõe de impermeabilização do solo, nem de sistemas de tratamento do percolato ou do biogás gerado (IPT, 2010).

Mesmo que a maior parte dos resíduos sólidos brasileiros coletados (58,4 %) seja destinada a aterros sanitários, considerados como destinação adequada, para garantir uma gestão dos resíduos sólidos sustentável são necessários: sua caracterização e sua segregação, já que os diferentes resíduos devem receber diferentes formas de acondicionamento, sistema de coleta, tipo de transporte, destinação final (reciclagem, compostagem, aproveitamento energético, entre outras) e disposição final (distribuição ordenada de rejeitos em aterros sanitários). A escolha do processo mais adequado de tratamento depende fundamentalmente das características do resíduo a ser tratado (McDOUGALL et al., 2001; BRASIL, 2010; IPT, 2010).

Desta forma entende-se que não existe uma solução única e que arranjos e associações de alternativas podem ser possíveis, considerando as características dos resíduos, da infraestrutura já instalada, das partes interessadas, bem como requisitos legais, sociais e econômicos. A Figura 2 exemplifica algumas alternativas possíveis de tratamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU), sendo que algumas tecnologias já consolidadas no mercado e outras ainda em processo de pesquisa e desenvolvimento.

² Chorume é definido como o líquido produzido pela decomposição da matéria orgânica contida no resíduo.

Figura 2 - Fluxograma de possíveis destinações finais para o RSU

Fonte: elaboração própria a partir de Jucá, 2003; Aneel, 2005; FADE, 2014.

Os RSU são um tipo de resíduo particularmente difícil de gerenciar por se tratar de um resíduo muito heterogêneo na sua composição (matéria orgânica, metal, papel, vidro, madeira, plástico e têxtil), variando muito de acordo com o local de produção, com o número de habitantes do município, o poder aquisitivo da população, as condições climáticas, os hábitos e costumes da população, o nível educacional e eventuais datas festivas, tornando quase sempre a sua solução complexa. E para estas soluções se torna mais que necessário o conhecimento das atuais tecnologias de tratamento de resíduos existentes para que se busquem soluções ambientalmente adequadas, economicamente sustentadas, socialmente justas e politicamente aceitáveis (TCHOBANOGLOUS; KREITH, 2002; IPT, 2010).

2.1.1. Política Nacional de Resíduos Sólidos

Os aspectos relacionados aos marcos legais da limpeza urbana, em especial da gestão de manejo dos resíduos sólidos no Brasil, são definidos na Política Nacional de Saneamento Básico, Lei nº 11.445, de 2007, na qual o plano de resíduos sólidos deve integrar os planos municipais de Saneamento (PNSB) e na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei nº 12.305, de 2010.

A Figura 3 apresenta os principais marcos legais brasileiros para gestão dos resíduos nas diferentes esferas governamentais, sendo a Política Nacional de Resíduos Sólidos o grande marco regulatório da área.

Figura 3 - Marcos regulatórios na gestão de RSU

Fonte: elaboração própria

Em 1991, o Congresso Nacional criou o Projeto de Lei 203/1991 que instituía a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), o objetivo era estabelecer como seriam os gerenciamentos dos resíduos sólidos no país, levando em conta ações de segregação, coleta, manipulação, triagem, acondicionamento, transporte, armazenamento, beneficiamento, comercialização, tratamento, reciclagem e disposição final dos mesmos (BRASIL, 2010). Este projeto de lei tramitou durante quase 20 anos por diferentes instâncias do poder público. Em 2 de agosto de 2010, foi instituída a Lei nº 12.305 que estabelece, em âmbito federal, a PNRS e em 23 de dezembro de 2010 foi regulamentada através do Decreto Nº 7.404.

A PNRS trata de todo e qualquer resíduo que se enquadre na definição apresentada em seu art. 3º³ e atribui como objetivo a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Sendo os rejeitos definidos como tais resíduos sólidos, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, e que não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada.

Os resíduos sólidos urbanos englobam os resíduos domiciliares (os originários de atividades domésticas em residências urbanas) e os resíduos de limpeza urbana (os originários dos logradouros públicos, como ruas e praças), portanto os resíduos de poda de árvores (galhos, folhas, entre outros) são classificados como sendo resíduos sólidos urbanos de limpeza urbana, sendo sua responsabilidade direcionada a prefeitura. Entretanto em casos de podas realizadas por concessionárias de energia elétrica a sua destinação final fica sob a responsabilidade da concessionária.

Os dados sobre gestão de resíduos de poda de árvores urbanas são escassos na maioria dos municípios brasileiros. Essa falta de informação resulta no desperdício das potencialidades de valorização que o resíduo possa vir a ter. Camilo; Espada; Martins (2008 apud MEIRA, 2010) analisaram 70 municípios do Estado de São Paulo, referente aos sistemas de gestão dos resíduos de poda e remoção, e verificaram que apenas 4 % dos resíduos de poda são aproveitados, na produção de composto orgânico, controle de erosão, olarias, entre outros, e todo o resto é lançado em lixões, aterros e terrenos baldios.

A PNRS trouxe como princípio base a responsabilidade compartilhada, retratada no Capítulo III, Seção I, artigo 25: “O poder público, o setor empresarial e a coletividade são responsáveis pela efetividade das ações voltadas para assegurar a observância da Política Nacional de Resíduos Sólidos”. Analisando a PNRS e as legislações correlatas é possível perceber que há uma ação integradora dos diversos entes federativos, na intenção de uma política que perpassasse as diversas instâncias de governo, incentivando os arranjos

¹ “[...] todo material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou está obrigado a proceder nos estados sólidos ou semissólidos, bem como gases contidos em recipientes e líquidos, cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente viáveis em face da melhor tecnologia disponível.”

institucionais. Além disso, existe também a possibilidade de integração entre a área pública e privada, podendo ser realizados arranjos setoriais e também Parcerias Público-Privadas (PPP).

Baseado no conceito de responsabilidade compartilhada, a sociedade como um todo – cidadãos, governos, setor privado e sociedade civil organizada – passou a ser responsável pela gestão ambientalmente correta dos resíduos sólidos. O cidadão é responsável não só pela disposição correta dos resíduos que gera, mas também pela avaliação quanto a seu papel de consumidor; o setor privado, por sua vez, fica responsável pelo gerenciamento ambientalmente correto dos resíduos sólidos, pela sua incorporação na cadeia produtiva e pelas inovações nos produtos que tragam benefícios socioambientais; os governos federal, estadual e municipal são responsáveis pela elaboração e implementação dos planos de gestão de resíduos sólidos.

O conceito de gestão de RSU é usualmente empregado quando se pretende abranger os aspectos políticos, institucionais, administrativos, operacionais, financeiros, sociais e ambientais, envolvidos direta ou indiretamente com os resíduos. De forma geral, no Brasil, a gestão dos RSU tem sido proposta em esferas maiores como pelos estados ou Governo Federal, apesar de existirem algumas propostas municipais.

Já o gerenciamento dos RSU tem uma abrangência mais específica (local), ficando a cargo das municipalidades. Neste caso, os municípios ficam encarregados de acompanhar de forma criteriosa todo o ciclo dos resíduos da geração à disposição final, empregando as técnicas e tecnologias mais compatíveis com a realidade local, promovendo condições adequadas para um destino final ambientalmente seguro, tanto no presente como no futuro.

Dos objetivos da PNRS, o município tem responsabilidade de agir especialmente na reciclagem, no tratamento e na disposição final ambientalmente adequada; também ficando a cargo do município fomentar a educação ambiental e incentivar a indústria a prática de não geração, redução e reutilização.

Os municípios são os responsáveis, em primeira instância, por lidar e equacionar o problema dos RSU, organizando os sistemas de gerenciamento e de gestão (Figura 4). O desempenho destes sistemas depende do correto entendimento e equacionamento dos fatores que afetam a gestão de resíduos nas diferentes etapas, desde a organização da fonte geradora, coleta/transporte, tratamento e processamento e sua disposição final. O aumento da geração de resíduos, os incrementos necessários sobre os orçamentos municipais e a falta de entendimento do problema afeta a ação dos municípios, que possuem capacidades diferentes de lidar com o problema.

Figura 4 - Gerenciamento e Gestão Integrada de RSU: etapas do sistema de gerenciamento e fatores intervenientes

Fonte: elaboração própria a partir de Guerrero; Maas; Hogland, 2013.

Muitos municípios brasileiros, isoladamente, não apresentam condições que lhes permitam elaborar planos de gestão de resíduos completos, aplicáveis e sustentáveis, neste caso a PNRS estimula o planejamento intermunicipal ou microrregional para a gestão e o gerenciamento de resíduos sólidos, o que é de extrema importância para sua efetividade. A ineficiência na gestão, nesse sentido, decorre principalmente da falta de capacidade técnica, gerencial e financeira dos pequenos municípios.

Assim, o que se pretende para os resíduos sólidos é um sistema integrado de gestão, com divisão de responsabilidades, integração de ações, definição clara de papéis e de recursos humanos e materiais (McDOUGALL et al., 2001).

Os principais objetivos abrangidos pela PNRS são:

- ✓ encerrar os lixões até o fim de 2014 (prazo prorrogado por emenda em 2015 para 2018 e 2021, dependendo do tamanho do município);
- ✓ destinar apenas rejeitos para os aterros sanitários;
- ✓ implantar a logística reversa; e

- ✓ impor a elaboração dos Planos de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos (PGIRS).

Analisando as metas iniciais estabelecidas pela PNRS constatou-se que o seu alcance depende do envolvimento das três esferas do governo, sendo indispensável à elaboração dos planos estaduais, intermunicipais, municipais. Com esses instrumentos propiciaria o atendimento às metas propostas, principalmente no que se refere à erradicação de lixões e disposição final ambientalmente adequada.

Segundo o IBGE (2015) dos 5.569 municípios existentes mais o Distrito Federal 41,75 % deles já elaboraram seus respectivos PGIRS. Entende-se que já existem diagnósticos das situações dos resíduos sólidos para esses municípios e propostas de alternativas para a destinação final adequada dos resíduos sólidos. Sabendo-se que mais de 50 % dos municípios não elaboraram o PGIRS e ainda convivem com uma gestão inadequada dos RSU, continuam a depositar seu resíduos em locais inadequados, isso embasou a elaboração do Projeto de Lei do Senado nº425, de 2014, e por seguinte sua aprovação em 2015, onde estabelece a prorrogação do prazo para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

Segundo a Lei Nº 12.305, tecnologias utilizadas para a recuperação energética dos resíduos poderão ser utilizadas, desde que tenham sido comprovadas suas viabilidades técnicas e ambientais, bem com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental - agregando valor ao tema da dissertação, aproveitamento energético dos resíduos de poda de árvore urbana.

O aproveitamento energético ou não energético dos resíduos de poda acarreta na economia de recursos e de combustíveis, e conseqüentemente, dos gases poluentes, originários do transporte desses resíduos, além de outros impactos ambientais gerados na disposição inadequada desses resíduos.

2.1.2. Contexto dos Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil

O aumento na geração de resíduos em grandes centros urbanos é o fator resultante da intensificação do consumo nesses locais, que está diretamente relacionado ao crescimento populacional e ao crescimento da economia. Não diferentemente, no Brasil a população continua a crescer em uma taxa média de 0,9 % (2014), enquanto a geração de resíduos

sólidos urbanos cresceu em uma proporção ainda maior, 2,9 % entre 2013 e 2014. Segundo a Abrelpe (2014), em 2014 a geração de RSU no Brasil foi de 78,6 milhões toneladas, desses resíduos sólidos gerados 90,6 % foram coletados, ou seja, um pouco mais de sete milhões de toneladas tiveram destinos impróprios. O dado de geração anual em 2014, comparado com 2013, é apresentado na Figura 5.

Figura 5 - Geração de RSU total nos anos de 2013 e 2014

Fonte: elaboração própria a partir de ABRELPE, 2014.

Os aspectos econômicos do gerenciamento e da gestão de RSU gerados no país incluem despesas com coleta, transporte, transbordo, tratamento e disposição final dos RSU. Na Figura 6 são apresentados os gastos per capita com o gerenciamento de resíduos sólidos em algumas cidades do mundo e a geração de resíduo per capita. Se considerado o valor médio dos gastos, os municípios brasileiros apresentam valores significativamente inferiores às médias apresentadas pelas cidades internacionais. Isso se deve ao baixo investimento realizado pelos municípios em função ao sistema adotado para coleta indiferenciada e tratamento de resíduos em aterros, que reduzem os gastos operacionais, mas comprometem a possibilidade de separação e alternativas de tratamento dos resíduos. Este fato prejudica a aplicação da PNRS que prevê a segregação dos resíduos e a máxima recuperação de materiais e energia.

Figura 6 - Comparação dos gastos em RSU *per capita* (R\$/hab./ano) em algumas cidades do Mundo com a quantidade de resíduos *per capita*

Fonte: PwC, 2014

Com o lançamento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), estabelecida na Lei nº12.305/2010, surgiu uma legislação mais moderna e direcionada para a gestão de RSU no País, um dos principais objetivos é garantir uma disposição final ambientalmente adequada, ou seja, encerrar os lixões, garantindo uma destinação final adequada para os resíduos (reciclagem, reutilização, compostagem, recuperação e o aproveitamento energético) e dispor em aterros sanitários o que for considerado rejeito. No Brasil predomina o uso de uma única técnica de tratamento e disposição final, o aterro sanitário, na Figura 7 o gráfico expõe a evolução da disposição final dos resíduos sólidos no Brasil, no período de 1991 a 2014.

Figura 7 - Disposição final dos RSU no Brasil, de 1991 a 2014

Fonte: elaboração própria a partir de Jucá (2004 apud FADE, 2014); ABRELPE (2011, 2012 e 2014).

Conforme exposto no gráfico a proporção da disposição final adequada e inadequada pouco mudou desde o estabelecimento da PNRS, em 2010. Observa-se que de 2010 a 2014, quando os lixões deveriam ser encerrados, não houve um aumento significativo da disposição final adequada, o que sugere que apenas a existência de legislação não é suficiente para que ocorram efetivas mudanças nos sistemas de gestão e gerenciamento de RSU dos municípios. Os estudos realizados pela ABRELPE (2011; 2012; 2014), os quais culminaram nos Panoramas Anuais, corroboram o gráfico da Figura 7, visto que mesmo quando se analisa as porcentagens de lixões e aterros controlados separados verifica-se que o uso de lixões como disposição final teve uma queda de apenas 0,7 % entre os anos de 2010 e 2014.

Os resíduos sólidos no Brasil têm 90 % em massa destinados a aterros sanitários, aterros controlados e lixões, sendo os 10 % restantes distribuídos entre unidades de compostagem, unidades de triagem e reciclagem, unidades de incineração, vazadouros em áreas alagadas e outros destino, como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Quantidade diária de resíduos sólidos domiciliares e/ou público encaminhados para destinação final.

Fonte: elaboração própria a partir de IPEA (2012)

Conforme a Figura 8 o aterro sanitário apresenta um aumento de 22,9 % como destinação final, em contrapartida a compostagem apresentou uma redução significativa, de 4,5 % para 0,8 %. Isso demonstra que visivelmente os resíduos sólidos estão sendo destinados para um local mais adequado quando comparados com vazadouro a céu aberto ou aterro controlado, mas que não está sendo considerado nenhum tipo de aproveitamento desse resíduo anteriormente a disposição final do rejeito.

A Tabela 1 apresenta a composição gravimétrica média dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil no ano de 2008, segundo o Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2012).

Tabela 1 - Estimativa da composição gravimétrica dos RSU coletados no Brasil

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (t/dia)
Material Reciclável	31,9	58.527,40
Metais	2,9	5.293,50
Aço	2,3	4.213,70
Alumínio	0,6	1.079,90
Papel, papelão e tetrapack	13,1	23.997,40
Plástico total	13,5	24.847,90
Plástico filme	8,9	16.399,60
Plástico rígido	4,6	8.448,30
Vidro	2,4	4.388,60
Matéria orgânica	51,4	94.335,10
Outros	16,7	30.618,90
Total	100,0	183.481,50

Fonte: Plano Nacional de Resíduos Sólidos (2012)

Na Tabela 1 verifica-se que 51,4 % de todo o lixo coletado é composto por matéria orgânica. Entre as suas possíveis utilizações, a matéria orgânica pode ser utilizada como fertilizante, quando não, é eliminado um insumo importante e ainda não devidamente valorizado para a produção agrícola. Em função disso é reforçada a necessidade de utilizar adubos minerais que representam um item expressivo da pauta de importação e, pelo uso excessivo, especialmente dos nitrogenados, provocam a contaminação das águas superficiais e subterrâneas e impactam a saúde pública (BRASIL, 2012). Ao invés disso a matéria orgânica é comumente depositada aterros e lixões produzindo gás metano durante sua decomposição.

A utilização dos resíduos orgânicos como adubo já era pensado desde metade do século XIX, onde se acreditava que toda a matéria orgânica da cidade e resíduos das lavouras poderia ser usada para fertilizar as terras, que caso contrário estaria sendo desperdiçada (GUIGNET, 1877 apud EIGENHEER, 2009).

Conforme citado anteriormente a composição do RSU é muito heterogênea e pode variar de uma região para outra, a qual, geralmente, está relacionada com os níveis de desenvolvimento econômico, tecnológico, sanitário e cultural dessas regiões. Segundo Monteiro et al. (2001) a composição do RSU em locais menos desenvolvidos socioeconomicamente apresentam maior porcentagem de matéria orgânica, segundo o *World Bank* (2012) os países não desenvolvidos apresentam em seus resíduos sólidos urbanos uma média de 64 % de resíduos orgânicos, enquanto os países desenvolvidos apresentam apenas

28 %. No Brasil esse teor varia de 50 % a 60 %, propiciando um aumento no teor de umidade do resíduo.

Nos dados apresentados pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2012) não foram considerados os resíduos de poda de árvores separadamente, portanto não foi possível analisar a quantidade de resíduos de poda de árvores geradas em âmbito nacional.

O Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da cidade de São Paulo (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2014), gerou um diagnóstico da situação atual dos resíduos sólidos do município, entre outros dados, em 2012, foram contabilizados e classificados os resíduos gerados por dia, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Composição dos resíduos coletados diariamente no município de São Paulo	
Tipo	Quantidade (t/dia)
Resíduos domiciliares	10.500
Resíduos de feiras livres	296
Resíduos de limpeza de ruas e logradouros	1.140
Resíduos de limpeza de estruturas de drenagem	2.200
Lodo das estações de tratamentos de esgotos	805
Entulhos	4.300
Resíduos volumosos	619
Poda de árvore	137
Resíduos de saúde	101,3
Total	20.100

Fonte: Adaptado do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da cidade de São Paulo

Segundo a Tabela 2, 52,2 % dos resíduos coletados na cidade de São Paulo são resíduos domiciliares e menos de 1 % é originário da poda de árvores, entretanto é importante ressaltar que se trata de um resíduo volumoso, acarretando em um transporte dispendioso e trabalhoso.

2.2. Resíduos de poda de árvore

De acordo com Silva Filho (2006), as árvores em centros urbanos desempenham uma importante função no embelezamento da paisagem, na redução da poluição atmosférica, na moderação do balanço energético do município e no escoamento superficial da água de chuva.

A arborização bem planejada é muito importante, independentemente do porte da cidade, pois evita problemas futuros de conflitos de uso de espaço terrestre e aéreo, que levam à rejeição das árvores e à poda drástica ou remoção, principalmente pelo contato entre a fiação e o afloramento de calçadas. (PIVETTA; SILVA FILHO, 2002). Segundo Meira (2010) o planejamento adequado evita ações de remediação, apropriando a vegetação ao uso do espaço urbano, reduzindo a geração futura de resíduos.

Historicamente, a prática de poda foi trazida ao Brasil pelos imigrantes europeus, exclusivamente para as árvores frutíferas, visando a uma maior e melhor produção de frutos.

Esta técnica visa basicamente conferir à árvore uma forma adequada durante o seu desenvolvimento (poda de formação); eliminar ramos mortos, danificados, doentes ou praguejados (poda de limpeza); remover partes da árvore que colocam em risco a segurança das pessoas (poda de emergência); e extrair partes da árvore que interferem ou causam danos incontornáveis às edificações ou aos equipamentos urbanos (poda de adequação) (SVMA, 2005). Nessa operação são gerados resíduos na forma de galhos, ramos, folhas, sementes, frutos, fustes e raízes, conforme Figura 9.

Figura 9 - Componentes das árvores

Fonte: Adaptado de Nolasco (2000) apud Meira (2010)

Segundo os critérios de riscos estabelecidos pela ABNT NBR 10.004 (ABNT, 2004), os resíduos de poda urbana são biodegradáveis e classificados como Classe II não inertes.

De acordo com a Lei N°12.305 (Brasil, 2010) o resíduo de poda urbana é classificado como resíduo de limpeza urbana, não perigoso, e se este for englobado aos resíduos domiciliares, ele passa a ser classificado como resíduo sólido urbano. Sendo o município o responsável pela coleta e destinação final deste resíduo. Esse resíduo também pode ser classificado como sendo um resíduo volumoso, de acordo com o decreto do Município de São Paulo n°42.217/2002 (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2002).

Apesar da poda de árvore ser responsabilidade do município, em muitos casos as concessionárias de energia elétrica encontram problemas ao realizar manutenções ou instalações nas redes. Em vista disso, as próprias concessionárias acabam por realizar podas das árvores que interferem na rede de distribuição elétrica, para que não haja interferência na qualidade do serviço oferecido à população.

Dados de coleta em municípios brasileiros são dificilmente encontrados, a maioria desses resíduos são destinados à terrenos baldios, lixões e aterros, horto florestal, espaços verdes do município, bem como utilizados como lenha. Em decorrência de uma gestão inadequada realizada pelos municípios, as podas em sua maioria são destinadas a aterros

sanitários, representando um volume expressivo na quantidade total de material descartado, gerando graves impactos ambientais e na saúde pública.

Em alguns casos, esses resíduos são encaminhados para serviço de compostagem, no entanto são ações isoladas e desarticuladas, e nem sempre suficiente para dar uma destinação adequada a todos os resíduos da poda de árvore urbana (MEIRA, 2010).

Além de não estar ligada a nenhuma atividade industrial o resíduo é encontrado de forma abundante e independe do mercado econômico, configurando-se em um grande potencial para utilização energética. No entanto, essa utilização é dificultada pela gestão amadora e desorganizada feita pelos municípios brasileiros, que geralmente não têm controle da quantidade gerada e desperdiçam este importante insumo.

Conforme citado anteriormente, no município de São Paulo são coletadas diariamente 137 toneladas de poda de árvores, que representam menos de 1 % em massa de todo o RSU coletado diariamente no município (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2014). Entretanto, um estudo realizado em um aterro do Estado do Rio de Janeiro, demonstrou que os resíduos provenientes da poda de árvore urbana compõem aproximadamente 4,4 % de volume do aterro (EIGENHEER; FERREIRA; ADLER, 2005).

Com o intuito de reduzir a quantidade de poda feita na cidade e a quantidade de resíduo disposto em aterros e lixões, a Prefeitura de São Paulo lançou em 2007 um Projeto de Lei em que estabelecia o Programa de Aproveitamento de Madeira de Poda de Árvore (PAMPA), que tem como objetivos gerar benefícios ambientais, reduzir o desmatamento, contribuir para aumentar a vida útil dos aterros e diminuir os custos de sua utilização, reduzir custos com o transporte dos resíduos provenientes da poda e remoção de árvores para os aterros e gerar receita para o município de São Paulo. Este Projeto de Lei nº300/2007 foi instituído no ano seguinte pela Lei nº14.723/2008 e regulamentado a partir do Decreto Municipal nº51.664/2010.

Os materiais provenientes do aproveitamento da poda de árvore poderão ser utilizados pela própria prefeitura ou doados a órgãos públicos federais, estaduais ou municipais, sendo que o excedente poderá ser doado a entidades sem fins lucrativos ou fornecido mediante o pagamento do correspondente preço constante da tabela de preços públicos, observados os limites e as condições fixados em portaria da Secretaria Municipal de Serviços.

Algumas subprefeituras aderiram ao projeto, como a de Santo Amaro e a da Mooca, que trituram os resíduos de poda urbana e depois utilizam em compostagem, ou a da Lapa que após a trituração utiliza o produto como adubo de áreas verdes da região.

Além desse programa, a Prefeitura de São Paulo criou os chamados Ecopontos, locais onde a população pode depositar pequenos volumes de entulhos, resíduos volumosos (poda de árvore, móveis, entre outros) e resíduos recicláveis. De acordo com a prefeitura estão em funcionamento noventa e três unidades em operação no município, os quais receberam no ano de 2015 o total de 541.054,00 m³, sendo que 63,9 % são resíduos volumosos.

O Programa de Metas do município de São Paulo, com horizonte de 2013 a 2016, tem como um dos seus objetivos a utilização dos resíduos de poda de árvores da cidade e dos resíduos sólidos orgânicos provenientes das 900 feiras livres municipais para compostagem. De acordo com o site da prefeitura de São Paulo, 12,6 % dessa meta foi cumprida, a qual pretende criar 14 centrais de compostagem no município, sendo que um projeto piloto com pátio de compostagem na subprefeitura da Lapa foi inaugurado em 2015.

A unidade piloto da Lapa servirá como referencia até agosto de 2016, e o adubo produzido será utilizado em ações de jardinagem nas praças. O resíduo de poda triturada auxilia no processo de compostagem, garantindo que o ar continue circulando nas leiras.

De acordo com a prefeitura de São Paulo⁴ é possível reduzir em até 20 % o volume de resíduos que hoje são destinados aos aterros com a compostagem dos resíduos das feiras e de poda de árvore. Adotando-se essa premissa, constata-se a iminente necessidade de realizar tratamentos e destinações adequadas para cada tipo de resíduo.

Em virtude do gerenciamento inadequado dos resíduos de poda de árvores, a quantidade de resíduos gerada pelo município não é contabilizada, isso dificulta a elaboração de programas para um tratamento adequado para esse resíduo e por fim desperdiça este importante insumo. O presente estudo sugere como alternativa de tratamento dos resíduos de poda de árvores o processo de adensamento para o seu aproveitamento energético.

2.3. Biomassa como fonte de energia

Biomassa é geralmente entendida como toda a matéria prima orgânica, não fóssil, de origem vegetal gerada através da fotossíntese, e seus derivados como: os resíduos industriais, domésticos, municipais, entre outros (NOGUEIRA; LORA, 2003). A biomassa da madeira (biomassa florestal) inclui todo o material da árvore: tronco, ramos, folhas, casca e raízes.

⁴ Notícia veiculada pela Secretária Executiva de Comunicação no site da Prefeitura de São Paulo. <http://www.capital.sp.gov.br/portal/noticia/9368#ad-image-0> – Acesso em julho de 2016.

Do ponto de vista energético a biomassa é toda matéria orgânica que pode ser utilizada na produção de energia. A utilização de biomassa florestal como fonte de energia é uma das práticas humanas mais antigas. Desde os primórdios da história da civilização, a vegetação se constituiu como uma fonte energética, sendo utilizada em atividades domésticas e, posteriormente, em atividades manufatureiras e industriais (BANDEIRA; TÔRRES FILHO, 2005; TAVARES; SANTOS, 2013).

De acordo com o Centro Nacional de Referencia em Biomassa (CENBIO) – atualmente Grupo de Pesquisa em Bioenergia, a combustão direta da biomassa é a forma de obtenção de energia categorizada como “tradicional”. Entretanto existe outra categoria de obtenção de energia da biomassa, definida como “moderna”, em que é obtida por meio de tecnologias avançadas de conversão, como na produção de biocombustíveis.

Tendo em vista a crescente população consumidora e o esgotamento das fontes energéticas não renováveis o aproveitamento energético da biomassa pode ser uma alternativa ao uso das fontes de origem fósseis (GOLDEMBERG, 2010; FARIAS; SELLITO, 2011). Essa substituição tem se apresentado como uma forma promissora de reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) oriunda de atividades antrópicas (DUTENHEFNER, 2011; MOREIRA, 2011), que segundo Edenhofer et al. (2012) é fundamental sua redução na ordem de 50 % a 85 % até 2050, possibilitando a estabilização da concentração atmosférica desses gases em níveis que possibilitem mitigar os efeitos das alterações climáticas em curso.

Diante deste cenário o uso da biomassa como fonte de energia tem caráter positivo quando comparada aos combustíveis fósseis, principalmente em relação à reduzida geração de SO₂, decorrente do baixo teor de enxofre presente na biomassa, e de cinzas durante a combustão (JENKINS et al., 1998; GENOVESE; UDAETA; GALVÃO, 2006). Outro fator relevante são as emissões de CO₂ durante a queima de biomassa, que podem ser consideradas praticamente nulas, pois esse gás é reabsorvido no próximo ciclo de vida da planta, durante o processo de fotossíntese.

Segundo Jenkins et al. (1998) as biomassas florestais, assim como os resíduos de poda de árvore, são constituídas, de 30 % a 40 % de oxigênio, 30 % a 60 % de carbono, 5 % a 6 % de hidrogênio e o nitrogênio, enxofre e cloro estão presentes em menos de 1 %. Esses componentes orgânicos da madeira formam, em grande parte, a celulose, a hemicelulose e a lignina.

O teor de carbono e oxigênio presente na biomassa influencia no poder calorífico do combustível, ou seja, na quantidade de calor liberado durante a combustão de um quilograma

de combustível. Por apresentar menor teor de carbono e maior teor de oxigênio a biomassa possui um poder calorífico menor do que o combustível fóssil como pode ser visto na Tabela 3 (GENOVESE; UDAETA; GALVÃO, 2006).

Tabela 3 - Poder calorífico superior de vários combustíveis

Combustível	Poder Calorífico Superior (kcal/kg)
Carvão vegetal	7.100
Madeira (25 % a 30 % de umidade)	3.500
Madeira seca	4.700 a 5.000
Óleo combustível	9.800

Fonte: Martins, 1980 apud Cortez, 2011.

Segundo o Balanço Energético Nacional (EPE, 2015) a lenha e o carvão vegetal representam 8,1 % da matriz energética, essa oferta de energia sofreu uma queda de 5 % desde 2005. A lenha é considerada um insumo de baixa eficiência, isso porque a biomassa quando utilizada na forma tradicional de obtenção de energia, ou seja, através da combustão direta se observa algumas características desfavoráveis ao seu uso como combustível, como por exemplo, baixa densidade (material volumoso), material heterogêneo, granulometria não uniforme, elevado teor de umidade, baixa densidade energética. Essas desvantagens podem acarretar dificuldades no transporte, na manipulação, no armazenamento e durante a combustão propriamente dita (NOGUEIRA; LORA, 2003).

A fim de diminuir as desvantagens do uso da biomassa tradicional, podem ser consideradas várias rotas tecnológicas com a finalidade de se produzir energia elétrica ou térmica. Os processos de conversão energética da biomassa podem ser classificados em três grupos: processos físicos, termoquímicos e biológicos (NOGUEIRA; LORA, 2003; CORTEZ, 2011).

Como foco desse estudo, o processo de adensamento (conversão física) garante benefícios, como:

- Conveniência para a manipulação e armazenamento;
- Maior controle sobre o processo de combustão, elevando sua eficiência e diminuindo os níveis de emissões dos particulados e gases poluentes como CO, os quais podem ser carreados ao ambiente;
- Aumento da densidade energética do material.

Em termos mundiais, a biomassa de madeira figura entre as principais fontes de biomassa para produção de energia, principalmente quando na forma de *pellets* (GARCIA, 2014). Em 2014 a produção global de *pellets* de madeira alcançou aproximadamente 24 milhões de toneladas, sendo as maiores regiões produtoras do mundo a Europa com 62 % e a América do Norte com 34 % (Figura 10).

Figura 10 - Produção de *pellets* em milhões de toneladas

Fonte: REN 21, 2015

Em uma década a produção de *pellets* mundial aumentou significativamente, partindo de aproximadamente 3 milhões de toneladas produzidas em 2004 para 24 milhões de toneladas em 2014. A biomassa peletizada pode substituir com vantagens o carvão mineral empregado no aquecimento residencial e nas termoeletricas, sem impactar no efeito estufa.

Por motivos ambientais, econômicos e energéticos a demanda mundial por *pellet* de biomassa vem aumentando rapidamente, conforme estimativas da Associação Europeia de Biomassa, até 2020 serão consumidos 80 milhões de toneladas de *pellets* na Europa. Há que se observar as questões de padrões de qualidade dos *pellets* para exportação para a Europa, como vem sendo discutido em Escobar (2013).

No Brasil, o consumo de *pellets* em 2012 foi de aproximadamente 39.800 toneladas, sendo seus principais consumidores as indústrias, pizzarias, padarias e hotéis (GARCIA, 2014). Entretanto, sua produção ainda é pouco competitiva no mercado mundial, devido à falta de infraestrutura (de produção e logística), baixa produtividade, juros altos e elevada carga tributária.

Segundo Escobar (2016a) os *pellets* de madeira produzidos mundialmente são oriundos, em sua maioria, de aproveitamento múltiplo de manejo florestal (florestas plantadas e nativas) e o resíduo da madeira de serraria ou da produção de celulose. Contudo ao mesmo tempo em que há um problema de escala mundial relacionado à questão do esgotamento das tradicionais fontes energéticas não renováveis, existe uma enorme quantidade de resíduos domésticos, industriais e agrícolas sendo desperdiçados energeticamente, e que poderiam ser utilizados como matéria-prima para produção de *pellets* ou outros biocombustíveis.

Entretanto, é importante ressaltar que todas as possibilidades de valorização dos resíduos devem levar em conta a sua escala e sazonalidade de geração ao longo do ano, as características básicas e propriedades físicas, químicas, mecânicas, as quais favorecem e limitam a utilização dos resíduos, para que a sua utilização na escala desejada seja viabilizada.

Nesse âmbito os resíduos de poda de árvore poderiam ser uma fonte de biomassa florestal para a produção de *pellets*, todavia como sua disponibilidade é irregular em muitos municípios, dificilmente esta opção participaria efetivamente da matriz energética brasileira, mas os produtos adensados de resíduos de poda de árvore podem ser considerados fontes alternativas de energia elétrica e térmica para uso local.

2.4. Aproveitamento energético dos resíduos de poda de árvore

Os processos de conversão energética da biomassa florestal podem ser classificados segundo a natureza dos processos primários aplicados a biomassa florestal em: processos físicos, termoquímicos e biológicos (NOGUEIRA; LORA, 2003; BOYLE, 2004; e CORTEZ, 2011). A Figura 11 ilustra as possíveis vias de aproveitamento energético da biomassa e seus principais produtos.

Figura 11- Processos de conversão energética de biomassa.

Fonte: Elaboração própria a partir de Vidal e Hora, 2011.

2.4.1. Processos Físicos

O processo físico de adensamento envolve o uso de pressão mecânica, com ou sem a presença de agente aglomerante, capaz de reduzir o volume da matéria-prima e aumentar seu conteúdo energético por unidade de volume. Em se tratando de um resíduo volumoso, heterogêneo e com baixa densidade *bulk*, o processo físico de adensamento pode ser bastante vantajoso para a utilização da biomassa em termos econômicos, sociais e ambientais.

A biomassa florestal apresenta características favoráveis à compressão, além de conter aglomerantes inerentes natural em sua estrutura anatômica na forma de lignina (WERTHER et al., 2000). Em geral, nenhum aditivo é utilizado para promover a ligação entre partículas de biomassa. A coesão, que ocorre internamente entre elas, é causada pelo calor gerado durante a

compressão, que amacia e reorganiza a lignina entre as fibras, ligando-as naturalmente após seu resfriamento. Esta lignina solidificada na superfície faz com que os produtos adensados possam resistir à umidade.

Em materiais pobres em ligninas podem ser adicionados aglomerantes típicos como: bentonita, cal hidratada, amido, lignosulfonatos, e outros produtos comerciais a serem pesquisados. Normalmente a taxa é de 1 % atingindo no máximo 2 % sobre a massa seca. A função dos aglomerantes é promover a ligação por forças de Van der Waals, aumentando a área de contato verdadeira das partículas, de forma a garantir um produto mais coeso. Entretanto, Obernberger e Thek, (2004) analisaram *pellets* com a presença de amido como aglomerante e verificaram que a presença de aglomerante nem sempre resulta em alta durabilidade mecânica e, portanto em um produto de alta qualidade.

Durante o adensamento, as partículas originais retêm a maioria de suas propriedades, embora a energia seja dissipada devido à fricção interpartícula e partícula-parede. Em altas pressões, as partículas são forçadas umas contra as outras e são submetidas à deformação elástica e plástica, aumentando desse modo o contato interpartícula (LETHIKANGAS, 2001).

No processo de adensamento sem aglomerantes são considerados dois tipos de variáveis: as variáveis do processo, que são um conjunto de condições impostas à biomassa pelos equipamentos mecânicos, bem com as variáveis do material, que são os fatores característicos de uma dada biomassa, conforme se observa na Figura 12 (RUMPF, 1962 apud STELTE et al., 2011; PIETSCH, 2002).

Figura 12 - Variáveis durante o adensamento de biomassa

Fonte: elaboração própria a partir de Rumpf, 1962 apud Stelte et al., 2011; Pietsch, 2002.

O pré-processamento da biomassa antes do processo de adensamento é um método potencial para alterar a estrutura física e a estrutura dos constituintes químicos, em uma tentativa de reforçar as características de ligação. Este pré-processamento se restringe basicamente a duas etapas, a de cominuição, que garante uma granulometria adequada para o tipo de adensamento adotado, e a de secagem, visto que esse tipo de biomassa pode apresentar altos teores de umidade (NOGUEIRA; LORA, 2003).

Segundo Kaliyan e Morey (2009) a água presente na biomassa tem um importante papel na interação das partículas durante o processo de adensamento, visto que a água aumenta a área de contato entre elas, favorecendo a atuação das forças de van der Waals. Além disso, a água facilita a solubilização de fibras, açúcar, fosfato de sódio, sais de potássio, os quais ajudam no processo de adensamento. Entretanto, se por um lado a água facilita a compactação, em excesso pode levar à compactação e entupimento na saída do equipamento.

O tamanho das partículas tem influência direta na durabilidade mecânica do produto adensado, pois partículas maiores favorecem a ocorrência de pontos de ruptura. Entretanto, se a quantidade de finos originários do pré-processamento for elevada, provavelmente o custo do produto será maior, de forma que uma mistura de diferentes tamanhos de partículas pode gerar produtos de boa qualidade e economicamente viáveis. Para a adequação no tamanho das partículas podem ser usados picadores, trituradores ou moinhos, neste caso o moinho só será usado quando houver necessidade de partículas ainda menores.

A compactação de resíduos lignocelulósicos resulta em produtos adensados com diâmetros variando entre 4 mm a 16 mm, no caso dos *pellets*, ou diâmetros superiores a 50 mm (briquetes e extrudados), os quais são utilizados na geração de energia na forma de calor ou eletricidade (DIAS et al., 2012).

Os equipamentos de compactação mais comuns têm sido adaptados de processos industriais existentes nas áreas de alimentação animal, de farmácia e de beneficiamento de resíduos finos de minérios. No entanto, a grande diversidade da composição da biomassa e a complexidade do material demandam muitas adaptações.

Samson et al. (2005) reportam que os briquetes são mais apropriados para alimentação manual para aquecimento ou para cocção em países em desenvolvimento. Entretanto, é importante ressaltar que durante a queima dos combustíveis sólidos em locais fechados, devem-se analisar os teores de cloreto e sulfato existentes na biomassa, devido a possibilidade de geração de gases tóxicos.

O processo de adensamento, bem como o nome já diz, aumenta a densidade energética da biomassa, dada pela quantidade de energia presente em um metro cúbico de material, entretanto, não altera o poder calorífico da biomassa em questão. Como exemplo, Werther et al. (2000) relatam que a densidade *bulk* de produtos adensados de bagaço de cana de açúcar variam entre 450 kg/m^3 a 650 kg/m^3 , correspondente de 5 vezes a 10 vezes maior que a da matéria prima, enquanto que sua densidade energética aumenta entre 6 vezes a 9 vezes, de cerca de 300 kWh/m^3 para 1800 kWh/m^3 a 2800 kWh/m^3 devido ao adensamento.

De acordo com Dias et al. (2012) os briquetes e *pellets* podem ser substitutos diretos da lenha no uso residencial, em indústrias e estabelecimentos comerciais como olarias, cerâmicas, padarias e pizzarias. Entretanto precisa-se analisar se os produtos adensados podem ser substitutos diretos quanto ao seu valor econômico quando comparado aos dos combustíveis que serão substituídos.

O custo da produção dos *pellets* de madeira varia em torno de 20 a 40 dólares por tonelada o qual depende do tipo de tecnologia aplicada, da escala de produção, da mão de obra utilizada, do custo dos equipamentos, da operação e manutenção. Ademais, o custo de venda dos *pellets* produzidos no Brasil variam entre 480 e 600 reais por toneladas, entretanto esses biocombustíveis quando produzidos no Brasil ainda enfrentam alguns impasses, como a falta de conhecimento sobre as vantagens dos *pellets* como solução de energia mais eficiente; o mercado de *pellets* no Brasil ainda estar em desenvolvimento, se adequando às normas europeias para a certificação exigida para a exportação (GARCIA et al., 2016).

Segundo Filippetto (2008), existe um caso de sucesso onde a prática de briquetagem conseguiu se consolidar. Trata-se de um programa realizado na Ásia, que tinha como objetivo a difusão em alguns países de tecnologias para a exploração de fontes renováveis de energia, como a briquetagem. Neste caso, foram desenvolvidas briquetadeiras de tecnologia mais simples e robusta, que pudessem ser construídas e consertadas localmente com preços bem mais acessíveis, diminuindo também os custos de manutenção.

A fim de otimizar os custos com a logística, as indústrias de adensamento da madeira precisam garantir a proximidade das fontes produtoras de resíduos, visto que a baixa densidade e os altos teores de umidade dos resíduos tornam o transporte com custos elevados a longas distâncias.

Rousset et al. (2011) realizaram um estudo de análise de ciclo de vida de briquetes de madeira de eucalipto e concluíram que a produção de briquete apresenta um balanço positivo

para equivalente do dióxido de carbono (CO_2) e que toda a emissão de CO_2 durante o processo é compensado no ciclo de carbono.

Existem vários métodos disponíveis para realizar o adensamento de biomassa, os processos convencionais podem ser classificados em três tipos: extrusão, briquetagem e peletização, os quais são melhores detalhados nesta secção.

2.4.1.1. Extrusão

O processo de extrusão consiste na aplicação de pressão em uma massa de partículas dispersas com o objetivo de torná-las um sólido geométrico compacto de alta densidade (FILIPPETTO, 2008). Realizado em prensa de parafuso sem-fim, a qual transporta e empurra a matéria-prima com um parafuso através de uma matriz, onde sofre a extrusão.

A biomassa é transportada pelo parafuso sem fim dentro da câmara e é compactada, ao final, contra um molde. Todo o processo de adensamento é auxiliado pelo aumento de temperatura que ocorre dentro da câmara devido à combinação de velocidade de rotação interna do parafuso com a existência de atrito no processo (SAMSON et al., 2005).

A Figura 13 exemplifica um dos tipos de prensa de parafuso sem-fim.

Figura 13 - Extrusora de parafuso sem fim

Fonte: BHATTACHARYA et al., 1989.

2.4.1.2. Briquetagem

A briquetagem é um processo antigo que teve início em 1848 nos Estados Unidos, visando à compactação de carvão moído (SAMPAIO; COSTA; ANDRADE, 2007). Segundo Tumuluru et al. (2010) a briquetagem é geralmente realizada usando uma prensa de pistão mecânico ou hidráulico, ou uma prensa de rolos, os quais são descritos a seguir.

(i) Prensa de pistão mecânico

Neste tipo de equipamento a matéria-prima é alimentada e compactada em uma matriz por meio de um pistão ligado excentricamente a um grande volante que força e se movimenta alternadamente, gerando os briquetes (Figura 14).

A matriz é constituída por um duto afunilado de seção circular que serve para compactar a biomassa na forma de briquetes. A pressão gerada durante o processo acarreta o aumento de temperatura do sistema, favorecendo a fluidização da lignina contida na biomassa, a qual age como um ligante entre as partículas. A temperatura no processo pode variar de 150°C a 300°C.

(a)

(c)

(b)

Figura 14 - Prensa de pistão mecânico.

Fonte: (a) e (b) Elaboração própria; (c) Quirino, 1991.

O resfriamento é uma das etapas indispensáveis para a produção de briquetes, visto que está intrinsecamente relacionado com a qualidade do produto. É durante o resfriamento que ocorre a condensação do vapor, caso contrário, a pressão do vapor pode provocar fissuras superficiais que fragilizam os briquetes formados.

(ii) Prensa de pistão hidráulico

A prensa de pistão hidráulico apresenta um mecanismo semelhante ao pistão mecânico. Entretanto, neste caso a compactação é realizada com pressões e temperaturas mais baixas.

Neste processo o pistão do equipamento é acionado hidráulicamente e o material a ser compactado é alimentado lateralmente por uma rosca sem fim. Então uma peça frontal ao embolo abre e expulsa o briquete quando atinge a pressão desejada (Figura 15).

Figura 15 - Prensa de pistão hidráulico.

Fonte: elaboração própria.

(iii) Prensa de rolos

A prensa de rolos direciona a matéria-prima contra um par de rolos que giram em sentidos opostos (Figura 16). O material é comprimido no espaço entre os rolos produzindo um briquete cuja forma é moldada pelas cavidades presentes nas superfícies dos rolos.

Figura 16 - Prensa de rolos.

Fonte: Tumuluru et al., 2010.

2.4.1.3. Peletização

Segundo Lethikangas (2001), durante o processo de adensamento por peletização, a pressão exercida entre os componentes causa uma força de fricção que aquece e pressiona o material através de perfurações da matriz.

Loução (2008) reporta que o processo de adensamento por peletização pode ser realizado de duas formas:

(i) Matriz do tipo cilíndrica vertical

Neste tipo de sistema o material é alimentado dentro de uma câmara entre a matriz e os rolos, de forma que ele é distribuído e esmagado entre as perfurações pela força dos rolos

de pressão, percorrendo o diâmetro interno da matriz em sentido contrário à rotação (Figura 17).

Figura 17 - Matriz do tipo cilíndrica vertical, vista frontal.

Fonte: Loução, 2008.

(ii) Matriz do tipo plana (disco)

O mecanismo de compressão baseia-se numa matriz plana e redonda equipada com rolos de pressão sobre a superfície. O número de rolos varia entre 1 e 6, dependendo do tamanho da máquina. Em alguns modelos a matriz gira e os rolos mantêm-se estacionários, enquanto em outros a matriz se mantém estacionária e os rolos se movem (Figura 18).

Figura 18 - Matriz do tipo plana.

Fonte: Gaviria, 2007 e elaboração própria

2.4.2. Processos Termoquímicos

A conversão termoquímica envolve calor e reações químicas para o aproveitamento energético dos combustíveis de madeira. Segundo Sonntag, Borgnakke Van Wylen (2003) os processos de conversão de combustíveis foram criados para a obtenção de combustíveis mais adequados ao consumo e mais fáceis de transportar.

As tecnologias termoquímicas capazes de converter a biomassa em energia são conhecidas como combustão direta, pirólise e gaseificação, sendo que sua diferenciação está associada à quantidade de oxigênio que é fornecido ao processo (DINKELBACH, 2000).

Nesta seção serão apresentados os processos de combustão direta, pirólise e gaseificação.

2.4.2.1. Combustão

O processo de combustão trata-se da queima direta do combustível, onde ocorre a transformação de energia química dos combustíveis em calor. Nogueira e Lora (2003) afirmam que a queima direta, ou a combustão é a tecnologia de conversão mais antiga e mais difundida comercialmente.

Segundo a ANEEL (2005) a combustão direta ocorre essencialmente em fogões (cocção de alimentos), forno (metalurgia, por exemplo) e caldeiras (geração de vapor, por exemplo). Embora a tecnologia seja simples e as vezes convenientes, o processo de combustão direta de biomassa é normalmente muito ineficiente, devido sua alta umidade e a baixa densidade energética do combustível.

Conforme citado anteriormente a madeira apresenta em sua composição elementar carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e água. Portanto quando ocorre uma combustão completa os produtos principais são: o dióxido de carbono, água e as cinzas (fração mineral da biomassa). Quando a combustão é incompleta é produzido também o monóxido de carbono e a fuligem (NOGUEIRA; LORA, 2003; SALOMOM; FILHO, 2007).

A queima de um combustível pode ser realizada em caldeira, que associada a um ciclo a vapor garante a obtenção de energia elétrica. Geralmente as usinas termoeletricas utilizam o

ciclo Rankine, formado basicamente por uma caldeira, uma turbina a vapor, condensador e uma bomba de alimentação da caldeira. Nesse ciclo a combustão ocorre fora do motor ou turbina, esquentando outro fluido que realiza o ciclo (SONNTAG; BORGNAKKEE; VAN WYLEN, 2003).

As usinas termoeletricas representam 28 % da matriz de energia elétrica do Brasil. Sendo que em 2014 a biomassa representava 32,6 % do combustível utilizado nas usinas termoeletricas e o gás natural (combustível fóssil) participava em 33,2 % (EPE, 2015).

Os resíduos de poda de árvore urbana, também poderiam ser queimadas em incineradores, conhecidos como usinas de *Waste to Energy* (WtE). A incineração já é difundida mundialmente, principalmente no continente Europeu e na Ásia. O aumento da aceitação dessa tecnologia em relação ao passado se deu pela mudança dos hábitos do consumidor e o aumento da separação coletiva, bem como a introdução de legislação ambiental adequada (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2015).

Dentre as legislações que embasaram o aumento da aceitação da incineração, estão: a Resolução Conama nº316 de 2002 (BRASIL, 2002) que dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, e a Resolução SMA-079 de 2009 do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2009) que estabelece diretrizes e condições para a operação e o licenciamento da atividade de tratamento térmico de resíduos sólidos em Usinas de Recuperação de Energia – URE.

O principal uso dos incineradores é para a geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos, no Brasil, ainda não existem incineradores de RSU instalados, mas existem previsões de serem instalados nas cidades de Barueri e São Bernardo do Campo, ambas em São Paulo.

Neste processo térmico a queima do combustível é realizada em câmeras de combustão, como os sistemas de grelhas móveis ou de leito fluidizado, com excesso de oxigênio a uma temperatura de 800°C a 900°C (VILHENA, 2010). Os gases de combustão a alta temperatura, trocam calor com as paredes do incinerador e trocadores de calor, gerando vapor que será utilizado para gerar energia elétrica ou para aquecimento. Esses gases passam por uma série de sistemas de controle ambiental para o abatimento dos poluentes, para só então serem emitidos a atmosfera (ABRELPE, 2012).

2.4.2.2. Pirólise

A pirólise da biomassa sólida trata-se de um processo de decomposição térmica na ausência de oxigênio. Essa conversão de combustível, normalmente da lenha para outro de melhor qualidade e conteúdo energético, o carvão vegetal, ocorre lentamente em altas temperaturas, 300°C a 500°C e de forma controlada (BRIDGWATER, 2003).

Brito (1990) afirma que durante o processo ocorre uma concentração de carbono no carvão vegetal devido a eliminação de praticamente todo hidrogênio e oxigênio, presente na madeira. Esse processo deu origem ao termo “carbonização da madeira”.

O principal produto final (carvão vegetal) tem uma densidade energética duas vezes maior que aquela do material de origem e queima em temperaturas muito mais elevadas. O alcatrão e o ácido piro-lenhoso são os outros produtos formados no processo (ANEEL, 2008).

No sistema de produção de carvão vegetal podem ser classificados em relação à origem do calor para o processo, segundo Brito (1990), de duas maneiras:

- (i) Sistemas com fonte interna de calor ou por combustão parcial;
- (ii) Sistemas com fonte externa de calor, que pode ser um aquecimento elétrico ou queima de combustível.

Nos sistemas com fonte interna de calor, 10 % a 20 % em peso da carga de madeira sofre combustão total, gerando o calor necessário ao processo. Neste caso a madeira é colocada dentro de um forno, onde os gases formados são removidos através de chaminés e o rendimento para obtenção de um bom carvão não ultrapassam 40 %. Dentre os fornos utilizados no Brasil, o mais usual é o forno meia-laranja ou rabo-quente (Figura 19).

(a)

(b)

Figura 19 - Forno meia-laranja ou rabo-quente.

Fonte: (a) CENBIO (2008); (b) Colombo, Pimenta E Hatakeyama (2006).

Segundo Brito (1990) os sistemas de fonte externa são formados por um forno do tipo colmeia, com a colocação de uma câmara externa de geração de calor (Figura 20). Nesta câmara são queimadas madeiras ou resíduos florestais não aproveitáveis, garantindo que toda a madeira é teoricamente convertida em carvão vegetal, resultando em um maior rendimento do processo.

Figura 20 - Forno de colmeia com câmara externa de calor, retangular com coleta de gases.
Fonte: Escobar (2016b).

Outras tecnologias de pirólise de biomassa estão sendo estudadas para a obtenção de carvão, bio-óleo e gases, como a pirólise rápida em leito fluidizado. Neste caso, para que ocorra a fluidização do leito do reator, existem algumas limitações para os parâmetros de alimentação da matéria-prima, como: a umidade, que deve estar abaixo de 10 % para minimizar a presença de água no produto líquido (óleo), e a granulometria, que deve ser aproximadamente 2 mm para garantir a alta velocidade de reação, separação dos sólidos e a coleta do bio-óleo produzidos (BRIDGWATER; TOFT; BRAMMER 2002; BRIDGWATER, 2003).

Segundo Pérez (2004) o bio-óleo obtido na pirólise rápida pode ser usado como combustível renovável em substituição ao diesel e ao óleo combustível em usinas termelétricas, ou substituir o fenol petroquímico para a produção de resinas fenólicas, ou ainda pode ser usado como aditivo na fabricação de cimento celular, entre outros.

2.4.2.3. Gaseificação

Gaseificação é o processo de conversão térmica de combustíveis sólidos ou líquidos em um combustível gasoso (gás de síntese) através de uma oxidação parcial, ou seja, em quantidades inferiores à estequiometria (mínimo teórico para a combustão), a elevadas temperaturas (acima de 900°C) (WSP, 2013). Neste processo ocorrem reações termoquímicas em cinco estágios principais: pirólise, oxidação do carbono, gaseificação, craqueamento do alcatrão e oxidação parcial dos produtos da pirólise (CENBIO, 2002; CHEN; ANDRIES; SPLIETHOFF, 2003).

Esse processo pode transformar cerca de 80 % da energia química da matéria-prima em energia química presente do combustível gasoso formado (WSP, 2013). Nele ocorre a formação do gás de síntese, composto por uma mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio, cujas proporções variam de acordo com as condições do processo, particularmente se é ar ou oxigênio que está sendo usado na oxidação (FAO, 1986; ANEEL, 2005).

Há vários tipos de gaseificadores, com grandes diferenças de temperatura e/ou pressão. Os mais comuns são os reatores de leito fixo e de leito fluidizado. Os gaseificadores em leito fixo são divididos em dois subgrupos baseados na diferença de alimentação dos mesmos. Os do tipo leito fixo contracorrente são alimentados pelo topo, de forma que a matéria-prima desça em contracorrente ao ar ou oxigênio. E nos de leito fixo co-corrente o ar e o gás fluem na mesma direção que o combustível (BRIDGWATER; TOFT; BRAMMER, 2002). A Figura 21 apresenta um esquema de gaseificadores em leito fixo.

Figura 21 - Gaseificadores com leito fixo. (a) Co-corrente e (b) contra-corrente.

Fonte: BRIDGWATER; TOFT; BRAMMER, 2002.

As principais vantagens dos gaseificadores de contracorrente são a sua simplicidade, alta proporção de carvão a ser queimado, troca interna de calor (fazendo com que as temperaturas dos gases de saída sejam baixas) e a possibilidade de operar com diversos tipos de alimentação. Os principais inconvenientes são a possibilidade da aparição de canalizações no equipamento (que pode motivar engaiolamento, irrupção do oxigênio e situações explosivas perigosas), e a produção de alcatrões resultantes das operações de limpeza do gás (FAO, 1986). Em contrapartida, os gaseificadores de leito fixo co-corrente produzem um gás livre de alcatrão.

O gaseificador em leito fluidizado é caracterizado por favorecer a interação entre o combustível sólido e o gás, promovendo uma circulação vigorosa das partículas promovendo as reações que envolvem o processo, possibilitando ainda, uma uniformidade da temperatura do leito. Neste tipo de equipamento se utiliza um elemento como a areia para servir de leito, o qual será aquecido e mantido em suspensão (fluidizado) por um fluido, que pode ser o ar. A biomassa é introduzida no leito entrando em combustão quando em contato com as partículas a alta temperatura que o constitui (KLEIN, 2002; BELGIORNO et al., 2003).

Os gaseificadores de leito fluidizado podem ser do tipo borbulhante ou circulante, sendo a principal diferença entre eles a velocidade com que o material atravessa o leito. Nos gaseificadores borbulhantes as partículas arrastadas pelo processo não são enviadas de volta para o leito e trabalha com velocidades menores que a de transporte pneumático. A alimentação de biomassa é feita diretamente na zona do leito.

Nos gaseificadores de leito fluidizado circulante as partículas arrastadas pelos gases são enviadas de volta para o leito através de um ciclone, mantendo-se em circulação (CHEN; ANDRIES; SPLIETHOFF, 2003). Opera próximo ao regime de transporte pneumático e possui uma maior conversão de carbono, pelo maior tempo de residência das partículas (KLEIN, 2002). A Figura 22 apresenta um esquema de um gaseificador em leito fluidizado.

Figura 22 - Gaseificadores de leito fixo do tipo: (a) borbulhante e (b) circulante.

Fonte: BRIDGWATER; TOFT; BRAMMER, 2002.

Segundo CENBIO (2002) o gás de síntese formado nos gaseificadores pode ser utilizado como combustível para fornos, motores, turbinas a gás, geradores de vapor, ou como redutor direto em fornos siderúrgicos. Sendo assim, o gás de síntese produzido no gaseificador pode viabilizar a geração de energia, quando o gaseificador estiver integrado a uma turbina a gás, operando em ciclo combinado.

2.4.3. Processo Biológico

Dentre os processos de conversão biológicos, os mais utilizados são os de digestão anaeróbia e o de digestão aeróbia. O primeiro deles permite o aproveitamento energético e

será detalhada nessa seção, já a digestão aeróbia (compostagem) é utilizada para obtenção de composto orgânico para adubo, o qual será detalhado na seção seguinte.

Além dessas duas tecnologias citadas, existem a fermentação e a hidrólise enzimática, que são as rotas que apresentam as mais adequadas condições para a produção de combustíveis líquidos derivados de biomassa. Entretanto, ambas as rotas necessitam de material com base nos conteúdos sacarídeos e amiláceos.

2.4.3.1. Digestão anaeróbia

O processo de digestão anaeróbia é caracterizado pelo processo de conversão da matéria orgânica na ausência de oxigênio. A produção do biogás ocorre naturalmente em locais com acúmulo de matéria orgânica e ausência de oxigênio, como em pântanos, sedimentos de rios, e inclusive nas camadas inferiores de aterros sanitários.

Segundo Breure (1986 apud CARNEIRO, 2005) a digestão anaeróbia é classificada como um processo bioquímico que ocorre em quatro principais estágios: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Dependendo da composição química do substrato a ser tratado, Chernicharo (1997) acrescenta mais uma fase, a sulfetogênese. Em cada um desses estágios estão envolvidas diferentes populações microbianas que se desenvolvem em condições fisiológicas específicas.

Os quatro estágios principais da digestão anaeróbia pode ser compreendida em duas etapas distintas, na primeira, os compostos orgânicos complexos são convertidos em materiais mais simples (ácidos voláteis, hidrogênio e outros), e na segunda, os produtos formados na primeira etapa são metabolizados em gases que compõe o biogás, como o metano e o gás carbônico (COLTURATO, 2015).

A compreensão de todo o processo de digestão anaeróbia realizada em ambiente natural trouxe ao homem a possibilidade de reproduzi-lo em um ambiente controlado, visando o tratamento de resíduos orgânicos de diversas atividades da sociedade. Esse processo realizado em ambiente controlado proporcionou algumas vantagens, como: o melhor controle de odores, a estabilização do material orgânico, bem como a recuperação energética dos resíduos orgânicos utilizados no processo, por meio do biogás produzido na digestão anaeróbia.

O biogás produzido durante a digestão anaeróbia é um gás energético constituído principalmente por metano, dióxido de carbono e sulfeto de hidrogênio, geralmente saturado em vapor de água e com presença de traços de nitrogênio e outros compostos. Sua composição pode variar de acordo com as características da matéria orgânica degradada (RISE-AT, 1998; COLTURATO, 2015).

No caso de motor-gerador, o gás gerado no processo pode ser utilizado para geração de energia elétrica; além disso, se o biogás passar por um processo de purificação (eliminando o CO₂ e produzindo o chamado biometano) e odorização poderá ser utilizado como combustível para veículos ou injetado na linha de gás natural para diferentes usos, aumentando a oferta de gás natural. Entretanto no Brasil, o uso de biometano oriundo de resíduos sólidos urbanos e resíduos de saneamento básico ainda é proibido para a injeção na rede e como gás natural veicular (GNV). A Resolução ANP nº23 (ANP, 2014) estabelece que o biometano possa ser utilizado de forma experimental e específico, desde que tenha uma autorização prévia da ANP.

Outro produto do processo de digestão anaeróbia é o lodo, que após etapa de tratamento pode ser separado em duas frações: a sólida, geralmente destinada a uma etapa de compostagem aeróbia, e a fração líquida que pode ser destinada para o processo de fertirrigação.

Para a realização do processo de digestão anaeróbia são utilizados equipamentos conhecidos como biodigestores, que basicamente são descritos como câmeras onde ocorre a degradação da matéria orgânica em meio anaeróbio.

A produção do biogás pode ser influenciada por parâmetros como a temperatura, o pH, a presença de inóculo, de nutrientes, a composição do substrato, o teor de sólidos totais (STEIL, 2001).

Segundo os fornecedores de equipamentos, Kompogas (2016a) e Küttner (2016), os resíduos de poda de árvore podem ser utilizados no processo, desde que estejam com a granulometria adequada e misturada com outras matérias orgânicas. Entretanto, Nogueira e Lora (2003) afirmam que há pouco interesse deste tipo de processo para biocombustível de madeira.

Estudos da digestão anaeróbia de madeira, realizadas nos Estados Unidos e na Austrália, mostram que a madeira em condições ideais para a produção de biogás em aterros ou em biodigestores é dificilmente decomposta. As taxas de metano produzidas chegam a ser nulas, devido à dificuldade de acesso aos carboidratos potenciais para o processo de

biodigestão ocasionada pela lignina (XIMENES; GARDNER; COWIE, 2008; WANG et al., 2011; XIMENES et al., 2015).

No entanto, não foram encontrados estudos específicos para a utilização dos resíduos de poda de árvore no processo de digestão anaeróbia, que apesar de ser uma biomassa florestal e de se enquadrar no presente exposto, a poda de árvore gera também outros resíduos, como as folhas e frutos que são biodegradáveis. Neste caso os resíduos de folhas e frutos gerados nos processo de poda de árvore poderiam ser tratados em biodigestores com outros resíduos orgânicos e resíduos de fuste total e galhos maiores poderiam ser direcionados para tecnologias mais adequadas.

De Baere (2005) afirma que, nos anos 2000, 83 % das plantas industriais de digestão anaeróbia de RSU e de excrementos de animais realizavam o processo em uma única etapa e os 16 % restantes utilizavam duas etapas. Nos sistemas de uma fase, todas as reações do processo ocorrem em um único reator, já os sistemas de duas ou mais fases ocorrem em sequência em diferentes reatores.

As tecnologias via seca surgiram na Europa na década de 1980, e os seus principais sistemas são a Kompogás, Dranco e a Valorga. Em 2007, surge na Europa outro sistema de digestão conhecida como via extraseca, comumente conhecidos com túneis de metanização ou sistemas de garagem. O processo de digestão anaeróbia é o mesmo, porém, o teor de sólidos é suficientemente maior (até 50 %), contra os 15 % a 40 % aceitáveis na via seca. A principal vantagem desse processo é a reduzida porcentagem de água extraída, em comparação com os de via seca. Na Europa, existem três sistemas de digestão anaeróbia via extraseca, o sistema Bioferm, o Kompoferm – Eggersmann e o Bekon.

A seguir são descritas três destas tecnologias, plenamente desenvolvidas e sendo utilizadas pelo mundo.

(i) Sistema Kompogas (Processo Via Seca)

Segundo a empresa Hitachi Zosen Inova Engenharia (HZI, 2016a) representante de vendas do sistema Kompogas, em 1991 foi instalada a primeira planta com sistema Kompogas e hoje já são 75 plantas instaladas no mundo. No Brasil, existe uma planta em fase

de construção na cidade de Piracicaba, onde será utilizada a fração orgânica de resíduos sólidos urbanos.

O sistema baseia-se em um processo termofílico de digestão anaeróbia (por volta de 55°C), de estágio único que opera com alto teor de sólidos. Esse processo é realizado em um reator horizontal retangular, onde o material é inserido por meio de bombas do tipo pistão e um eixo longitudinal com pás gira em rotação promovendo a homogeneização do material dentro do reator (Figura 23).

Figura 23 - Desenho esquemático das etapas de tratamento biológico, desde a alimentação no reator até o aproveitamento energético do biogás produzido.

Fonte: HZI (2016b).

O tempo de residência é de 14 dias a 20 dias, onde são gerados aproximadamente 100 Nm³ de biogás a partir de uma tonelada de material alimentado no processo (KOMPOGAS, 2016b).

Ao final de todo processo o material digerido passa pelo processo de deságue, até atingir teor de sólidos por volta de 50 %, e em alguns casos é realizado a estabilização do material por meio de digestão aeróbia (compostagem).

(ii) Sistema Dranco (Processo Via Seca)

Semelhante ao sistema Kompogas, o sistema Dranco é um processo termofílico, de estágio único, com alto teor de sólidos.

Tecnologia desenvolvida em 1980 e patenteada pela OrganicWaste Systems (OWS), uma das pioneiras no fornecimento de tecnologia para tratamento de RSU com recuperação de biogás (OWS, 2016).

A entrada dos resíduos é feita por bombeamento para o topo do reator e a saída é pela base. A ciclagem do material é realizada pelo movimento descendente e pistonado dos resíduos e algumas bolhas de gás em movimento ascendente (ARSOVA, 2010; OWS, 2016).

Segundo Colturato (2015), o tempo de retenção varia entre 20 a 30 dias e a produção média de biogás é de 80 Nm³/t a 120 Nm³/t de resíduos orgânicos. O resíduo sólido pode passar pela etapa de estabilização adicional por meio de digestão aeróbia.

(iii) Sistema Bekon (Processo via extra-seca)

Diferentemente dos sistemas apresentados anteriormente, esse processo ocorre via extra-seca, ou seja, aceita material com 50 % de teor de sólidos, de forma que todo o resíduo pode ser empilhado e transportado com pás carregadeiras ou equipamentos semelhantes.

Como vantagens em relação ao processo via seca, esse sistema não exige agitação mecânica e aceita elevada porcentagem de impróprios.

A tecnologia Bekon (2016) pode ser considerada um sistema modular para o tratamento de resíduos orgânicos, sendo operado tanto em temperatura mesofílica (38°C) como em termofílica (55°C). Este processo envolve a digestão anaeróbia em batelada, inoculada pelo material do processo anterior, em um biodigestor do tipo garagem (túnel) sem partes internas móveis (Figura 24).

Figura 24 - Desenho esquemático do sistema Bekon

Fonte: Bekon (2016)

O sistema é composto por túneis retangulares, onde o resíduo permanece por aproximadamente 4 a 5 semanas, onde o excesso de material percolado é recirculado de forma a garantir as condições ideais para a produção do biogás, o qual é coletado e o composto orgânico gerado pode passar por uma etapa de estabilização por compostagem.

2.5. Aproveitamento não energético dos resíduos de poda de árvore

Os resíduos de poda urbana podem ser valorizados sem um aproveitamento energético. Comumente são desenvolvidas soluções em pequena escala, com iniciativas pontuais e desarticuladas (MEIRA, 2010). Dentre as possíveis alternativas para sua valorização são apresentados com detalhes a produção de pequenos objetos de madeira (POM) e os processos de compostagem.

De acordo com Vale; Sarmento e Almeida (2005) é possível utilizar os resíduos madeireiros, principalmente serragem, para a cama de animais ou para a fabricação de chapas de madeira reconstituída.

Segundo estudos a madeira, em lasca ou serragem, pode ser utilizada na confecção de biofiltros destinados a remoção de óleo e graxa provindos de esgoto doméstico ou na biofiltração aeróbia dos gases produzidos no tratamento de esgoto (BATISTA et al., 2013; FLORES; SANCINETTI; RODRIGUES, 2014).

2.5.1. Compostagem (Digestão aeróbia)

Existem relatos desde a metade do século XIX que os resíduos da matéria orgânica já eram utilizados como adubo, Guignet (1877 apud EIGENHEER, 2009) afirmava que a lavoura não poderia prosperar sem estrume, e que diferentemente do Brasil, que apenas alguns fazendeiros mais adiantados preparavam um adubo com materiais de origem animal e vegetal, em alguns países da Europa já utilizavam restos de cozinha, camas de palhas dos animais, e qualquer matéria de origem vegetal. Guignet (1877 apud EIGENHEER, 2009) relata, ainda,

que naquele tempo havia a detenção do conhecimento dos princípios da técnica de compostagem, como a necessidade de umedecer a matéria orgânica para que apodreça.

No Brasil, apesar de o resíduo orgânico estar presente em 51,4 % da composição dos resíduos gerados, as experiências de compostagem são ainda incipientes, as quais podem estar relacionadas com a falta de separação na fonte geração, fazendo com que todo resíduo orgânico seja encaminhado para disposição final junto com todo resíduo não reciclado. Importante ressaltar que a Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010) estabelece a compostagem como uma forma de destinação final ambientalmente adequada de resíduos.

Conforme citado, o município de São Paulo elaborou um Programa de Metas com horizonte de 2013 a 2016, onde se pretende criar 14 centrais de compostagem no município, sendo que um projeto piloto com pátio de compostagem na subprefeitura da Lapa foi inaugurado em 2015.

A compostagem é a decomposição aeróbia (com presença de ar) da matéria orgânica contida em resíduos de origem animal ou vegetal, pela ação de organismos biológicos, em condições físicas e químicas adequadas (FADE, 2014). Neste processo é originado um composto orgânico com propriedades e características diferentes do material que lhes deu origem, podendo ser utilizada no solo sem ocasionar riscos ao meio ambiente.

Alguns fatores físico-químicos podem influenciar na evolução do processo de compostagem, são eles (MODESTO FILHO, 1999; PEREIRA NETO, 1999 apud CORTEZ, 2011; REIS, 2005; DIAZ et al., 2007):

- Aeração: é necessária para que a atividade biológica se mantenha, possibilitando a decomposição da matéria orgânica de forma mais rápida (processo aeróbio);
- Temperatura: durante o processo a temperatura do sistema de compostagem sofre algumas variações, que precisam ser controladas periodicamente. O processo se inicia à temperatura ambiente (situação mesófila), mas conforme a atividade microbiana se intensifica a temperatura se eleva, podendo atingir em torno de 60°C (situação termófila), e posteriormente a temperatura decai até aproximadamente 30°C.
- Teor de umidade: é um importante parâmetro, visto que a atividade biológica está relacionada a ele. Neste caso o teor de umidade do sistema deve permanecer por volta de 50 % durante todo o processo. Se o teor de umidade ultrapassar este valor a produção de chorume será favorecida, e se ocorrer o contrário a atividade biológica será reduzida.
- Granulometria das partículas: para favorecer o contato matéria orgânica e ar, o ideal é que as partículas tenham um diâmetro de aproximadamente 3,5 cm. Visto que partículas

maiores são difíceis de serem decompostas e partículas muito pequenas facilitam a compactação da matéria orgânica, dificultando a interação com o oxigênio.

- Relação carbono e nitrogênio: fundamentais para o crescimento microbiano, visto que os microrganismo necessitam de carbono, como fonte de energia, e de nitrogênio para a síntese de proteínas.

As tecnologias de implantação do processo de compostagem admitem alternativas que podem variar de sistemas simples e manuais, até sistemas complexos, altamente tecnológicos, onde todos os parâmetros podem ser monitorados e controlados com precisão. Um sistema de compostagem deve ser adequado à comunidade em que será utilizado, do ponto de vista técnico e socioeconômico (Diaz et al., 2007).

Os sistemas de compostagem podem ser divididos em três tipos, descritos a seguir (FERNANDES; SILVA, 1999).

(i) Compostagem em leiras com revolvimento mecânico ou manual (“windrow”)

Considerado o mais simples dos sistemas, a compostagem em leiras com revolvimento é caracterizada com a disposição do material em longas leiras que são periodicamente revolvidas. O revolvimento pode ser realizado manualmente com pás, ou com tratores agrícolas adaptados ou equipamentos auto-propelidos, que se deslocam sobre a leira e realizam o revolvimento, deixando as leiras com dimensões padrão, como mostra a Figura 25.

Figura 25 - Exemplo de sistema de leiras revolvidas com equipamento auto-propelidos.

Fonte: Fernandes e Silva, 1999.

O processo de revolvimento dos resíduos favorece seu contato entre o material orgânico e a atmosfera rica em oxigênio, pela convecção e difusão do ar na massa do composto.

O centro nacional de referência em biomassa – CENBIO, atualmente Grupo de Pesquisa em Bioenergia, desenvolveu um projeto intitulado “Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda e remoção de árvores na área de concessão da AES Eletropaulo” em que realizou um projeto piloto de uma usina de compostagem destes resíduos. Foram estudados dois sistemas de compostagem, o de leiras revolvidas (Figura 26) e o de leiras estáticas aeradas.

Figura 26 – Leiras com revolvimento manual

Fonte: Cortez, 2011.

Segundo Cortez (2011), no projeto desenvolvido no CENBIO, o método de aeração estático se mostrou mais rápido do que as leiras revolvidas.

(ii) Compostagem em leiras estáticas aeradas

A compostagem em leiras estática aeradas é caracterizada pela injeção de ar realizada por meio de uma tubulação perfurada quando a mistura a ser compostada é colocada sobre essa tubulação, não havendo revolvimento mecânico das leiras, conforme Figura 27 (Diaz et al, 2007).

Figura 27 - Exemplo de sistema de compostagem com leiras estáticas aeradas

Fonte: Fernandes e Silva, 1999.

Segundo Kiehl (1998 apud Cortez, 2011) é imprescindível a colocação de uma camada de cavacos de madeira ou lascas de borrachas para que atue como leito filtrante para água de drenagem e chorume, além de facilitar a passagem do ar na leira.

Conforme citado anteriormente no projeto desenvolvido pelo CENBIO também foi estudado o processo de compostagem por leiras estáticas aeradas, conforme Figura 28.

Figura 28 – Leiras estáticas aeradas
Fonte: Cortez, 2011.

Segundo Cortez (2011) no projeto supracitado, a compostagem de resíduos de poda pode ser replicada em outros locais com fontes de nitrogênio, como resíduos de feiras livres, de restaurante e esterco bovino. Entretanto se a opção de fonte de nitrogênio utilizada no processo forem os produtos derivados de lodo de tratamento de esgoto devem-se atentar as restrições impostas pelo CONAMA para sua utilização.

(iii) Compostagem em reatores biológicos

Os reatores biológicos são sistemas fechados, que permitem o controle de todos os parâmetros do processo de compostagem. A aeração da compostagem em reatores é realizada sob pressão, onde a taxa é facilmente controlável, devido o sistema ser fechado. Monitora-se a saída dos gases, sendo que com o oxigênio abaixo de 2 %, aumenta-se a vazão do ar para evitar a anaerobiose.

Neste caso, a compostagem em reatores biológicos apresenta várias alternativas de reatores e níveis de automação, de modo geral os vários tipos de reator se enquadram em três grandes categorias: reatores contínuos de fluxo vertical, que são sistemas parecidos com silos verticais, onde o material orgânico entra pela parte superior e percorrem o reator no sentido descendente; reatores contínuos de fluxo horizontal, geralmente em forma cilíndrica, disposto horizontalmente, de forma que o resíduo entra por uma extremidade do reator e sai pela outra;

e os reatores de batelada, onde o composto fica confinado no mesmo local, normalmente sob agitação (FERNANDES; SILVA, 1999; DIAZ et al., 2007).

2.5.2. Pequenos Objetos de Madeira (POMs)

Os pequenos objetos de madeira são conhecidos no setor madeireiro pela sigla POM. Os POM podem ser agrupados em artigos domésticos utilitário, ou decorativo, de uso pessoal, brinquedos e complementos de outros produtos (STERNADT, 2002 apud Cortez, 2011).

Existe uma dificuldade em delimitar quando um objeto de madeira é considerado POM, mas segundo Viera (2006), normalmente são objetos portáteis, excluindo-se dessa classificação peças como móveis e peças de usos estruturais para construção civil (FIGURA 29).

Figura 29 - POMs. a) utensílio doméstico; b) canecas, caixas e porta copos; c) brinquedos em miniaturas.
Fonte: Lopes; Berberian; Gomes, 2013.

Os POMs podem ser produzidos manualmente ou industrialmente, quando realizados de maneira manual o artesão está presente em todas as etapas da produção, eventualmente fazendo uso de máquinas modificadas. Esta dualidade da produção entre a utilização de máquinas adaptadas e alguns processos realizados à mão se deve à lentidão do processo produtivo de peças de pequenas dimensões (LOPES; BERBERIAN; GOMES, 2013).

De acordo com o levantamento realizado por Meira (2010) as árvores com média densidade básica são mais recomendadas para a produção de POM, por serem mais fáceis de trabalhar com ferramentas convencionais e lixas. Entretanto, os resíduos de poda de árvores com alta densidade (acima de $0,7 \text{ g/cm}^3$) são indicados para a fabricação de componentes estruturais de móveis, em virtude de sua maior resistência mecânica.

Martins (2013) realizou um estudo com os resíduos de poda de árvore das três espécies mais frequentes no Município de Maringá propondo o aproveitamento de madeira para fabricação de pequenos objetos de madeira (POM), elementos estruturais para construção civil, e para a obtenção de carvão vegetal. Destas três espécies, duas poderiam ser utilizadas para fins não energéticos, são elas: Sibipuruna que podem ser utilizada em móveis e as Tipuana destinadas para a fabricação de POM, em virtude da sua baixa densidade.

A destinação dos resíduos madeireiros para a confecção de POM na cidade de Belém surgiu como alternativa econômica, social e ambiental. Deixando de ser um resíduo para ser matéria-prima nas mãos da maioria dos artesãos da cidade, as espécies mais utilizadas são Pau-roxo, Pau-amarelo, Cedro, Jatobá, Angelim, Copaíba, Timborana, Ipê, Cumaru e Bacuri (LOPES; BERBERIAN; RAMOS, 2013).

2.6. Aplicabilidade das tecnologias aos resíduos de poda de árvore

Os resíduos de poda de árvore podem ser utilizados em todos os tipos de aproveitamento levantados nesse estudo, tanto aproveitamento energético ou não energético, entretanto existem limitações do seu uso para cada tecnologia.

O pré-tratamento desse resíduo se faz necessário em todas as tecnologias aqui estudadas, com exceção da queima direta da lenha. Em todos os outros casos os resíduos precisam se adequar em relação a sua granulometria e teor de umidade. Em vista disso, a escolha da tecnologia utilizada para o aproveitamento desse resíduo dependerá dos aspectos econômicos, sociais, ambientais e tecnológicos do município.

A Figura 30 enumera de maneira simplificada algumas das vantagens e desvantagens de cada tecnologia.

Adensamento	<ul style="list-style-type: none"> •Vantagens: tecnologia simples; equipamento de médio custo; produto pode ser transportado e vendido para locais distantes da fábrica. •Desvantagens: necessidade de aglomerante; custo de processo associado a distância da fonte geradora de resíduos; e desgaste da matriz.
Digestão anaeróbia	<ul style="list-style-type: none"> •Vantagens: produção de biogás; geração de fração orgânica sólida e fração líquida para fertirrigação. •Desvantagens: controle do gás gerado; equipamentos simples podendo ter custos variáveis; processo de longo período.; necessidade de controle de temperatura e teor de umidade.
Combustão direta	<ul style="list-style-type: none"> •Vantagens: tecnologia simples e de baixo custo; resíduos não precisam de pré-tratamento; geração de energia elétrica em usinas termoeletricas. •Desvantagens: ineficiência do processo relacionado a alta umidade e baixa densidade energética do combustível; controle dos gases produzidos.
Gaseificação	<ul style="list-style-type: none"> •Vantagens: produção de combustível versátil (geração de energia elétrica ou térmica); acessível a comunidades isoladas com geradores de pequeno porte; podem ser utilizados resíduos de madeira e RSU. •Desvantagens: equipamento de complexidade média a alta; processo necessita de temperaturas elevadas; pode ocorrer a formação de alcatrão.
Pirólise	<ul style="list-style-type: none"> •Vantagens: tecnologia simples e de baixo custo (pirólise lenta); geração de combustíveis no estado sólido e líquido (pirólise rápida). •Desvantagens: controle da temperatura (alta) e gases produzidos; baixo rendimento em fornos rudimentares.
Compostagem	<ul style="list-style-type: none"> •Vantagens: tecnologia de baixo custo; pode ser realizada em de forma manual; geração de composto orgânico para adubo. •Desvantagens: necessidade de um espaço para a construção das leiras; controle de teor de umidade e temperatura de todo o processo; produção de chorume.

Figura 30 - Vantagens e desvantagens das tecnologias

Fonte: elaboração própria

Exceto o processo de compostagem, todas as tecnologias apresentadas na Figura 30 produzem algum tipo de combustível, que de acordo com o local produzido pode favorecer sua utilização. Nos processos de adensamento e pirólise, os combustíveis sólidos e líquidos gerados podem ser transportados a longas distâncias, desde que viáveis economicamente. Já os combustíveis gasosos produzidos nos processos de gaseificação e digestão anaeróbia necessitam de dutos para o seu transporte ou precisam ser consumidos próximos às fontes geradoras. Importante ressaltar que cada biocombustível oriundo do resíduo de poda de árvore deve ser analisado quanto aos parâmetros físico-químico permitidos por lei para seu uso comercial, residencial ou industrial.

3. O CASO DO CAMPUS DA USP NA CAPITAL

Conforme citado anteriormente, para que o estudo pudesse ser mais detalhado optou-se por escolher uma área delimitada, o local escolhido foi o Campus da USP na Capital. Este capítulo apresenta as características do local escolhido para o estudo, bem como o panorama da quantidade e destinação final dos resíduos de poda de árvore gerados no local.

Neste mesmo capítulo são tratados ainda os ensaios de adensamento realizados com os resíduos de poda de árvore coletados, bem como os resultados obtidos.

3.1. Local de estudo e sua de gestão de resíduos de poda de árvore

A Universidade de São Paulo possui unidades de ensino que estão distribuídas em seus sete campi universitários: um em São Paulo, capital, e seis no interior do estados, nas cidades de Bauru, Lorena, Piracicaba, Pirassununga, Ribeirão Preto e São Carlos (Figura 31).

Figura 31 – Campi da Universidade de São Paulo no Estado de São Paulo.
Fonte: Universidade de São Paulo, 2016.

O trabalho foi desenvolvido na Universidade de São Paulo, no Campus da Capital, conhecida como Cidade Universitária, localizado no município de São Paulo (SP), no bairro Butantã, em uma área de 7.443.770 m² (Figura 32).

Figura 32 - Universidade de São Paulo: Campus da Capital
 Fonte: USP MAPAS, 2016.

Na área delimitada pela Cidade Universitária está localizada a Prefeitura da USP – Campus da Capital do Estado de São Paulo, responsável pelo gerenciamento de poda de árvores do campus.

Para a caracterização do sistema de poda e remoção da arborização do Campus foram coletadas informações sobre os seguintes aspectos:

- Procedimentos e operações realizados para a execução dos serviços de poda e remoção;
- Destinação dos resíduos; e
- Custo para a realização da poda.

Os dados foram obtidos por meio da análise de documentos de licitação do serviço de poda e remoção da arborização do campus e a realização de entrevista com engenheira da área de Serviço Técnico de Gestão Ambiental da Prefeitura do Campus (Anexo A).

O serviço de poda de árvores é realizado por meio de uma equipe contratada através de um Edital de Pregão, destinado à prestação de serviços de conservação e manutenção de áreas verdes na Cidade Universitária.

Segundo o edital de 2015⁵, era necessária a contratação de uma empresa para a realização do serviço de poda de 1250 árvores localizadas no Campus da Capital e nas Unidades da USP na cidade de São Paulo, remoção dos resíduos e transporte para aterros legalizados, além de fornecimento de mão-de-obra qualificada para os serviços, com um contrato de 12 meses de validade. Em 2016 ainda não foi aberto nenhum edital de serviços de poda de árvore.

Por meio da entrevista realizada não foi possível obter informações consistentes para a construção de um panorama do gerenciamento de resíduos de poda de árvores do Campus da Capital. Por ser um serviço terceirizado e contratado anualmente, podendo ser diferentes empresas a cada ano, não existe a efetiva contabilização da quantidade de resíduos gerados, nem a distância percorrida em seu transporte ao aterro legalizado, e nem o conhecimento de qual aterro esta sendo depositado, acarretando na falta de informação da área técnica responsável por essa gestão.

Com o objetivo de melhorar as condições de iluminação e segurança para a comunidade uspiana, a Prefeitura do Campus USP da Capital elaborou uma programação para as podas de árvores no Campus da Capital e na USP Leste. O planejamento é dividido por áreas da Cidade Universitária, para facilitar o processo de poda. Foram realizadas solicitações para a Prefeitura de São Paulo de autorizações para os procedimentos de podas realizadas nas avenidas principais do campus.

De acordo com as informações obtidas na entrevista, as podas de árvores da USP eram destinadas a uma composteira, que permaneceu em funcionamento por 15 anos, mas devido a uma obra no local precisou ser desativada.

Para estimar a quantidade de resíduos de poda de árvores gerados no Campus da Capital, foram usados como referências os dados obtidos no estudo realizado por Meira (2010), que fez um levantamento da geração de resíduo de 11 espécies de árvores. Mesmo não sendo as mesmas espécies encontradas na Cidade Universitária (*Tipuana tipu*, *Piptadenia gonoacantha*, Palmeiras, Sibipuruna), optou-se por utilizar os dados obtidos para as duas maiores espécies estudadas, visto que na licitação realizada em 2015 foi requerida a poda de árvores com mais de 13 m de altura.

Segundo Meira (2010) as espécies de Chapéu de Sol e Sibipuruna geram respectivamente 66,6 kg e 59,0 kg de resíduos por indivíduo. Como foram realizados a poda

⁵ Foram consultados os Editais de Pregão, da Universidade de São Paulo, nº 00013/2015-PUSP-C (Processo nº 85.1.00194.49.9) e o de nº 00011/2014 – PUSP-C (Processo de nº 14.1.00073.49.6). Nos outros que foram consultados não constava o serviço de poda.

de 1250 árvores na USP, e a média de geração de resíduo das árvores citadas é aproximadamente 63,0 kg de resíduos por indivíduo, tem-se o total de 78,75 toneladas de resíduos de poda de árvores geradas em 12 meses, ou seja, 6,5 toneladas por mês.

O valor encontrado é uma estimativa do quanto pode ser gerado de resíduos no Campus da Capital, podendo ser um valor maior ou menor do que este calculado. É importante dizer que na licitação não foi citada a manutenção das árvores existentes no fragmento de floresta típica do planalto de São Paulo (bosque) que fica dentro da USP.

3.2. Materiais e métodos

Conforme citado anteriormente os resíduos de poda de árvores podem ser utilizados em todas as tecnologias de aproveitamento energético e não energético supracitados, entretanto para essa pesquisa optou-se pelo processo físico de adensamento, com as tecnologias de briquetagem e peletização. A escolha foi definida em virtude da simplicidade da tecnologia, bem como a pequena área necessária para a instalação dos equipamentos, a necessidade de apenas um técnico para a realização dos ensaios, e a não geração de resíduos no processo.

Para a realização dos ensaios de adensamento da poda de árvore optou-se por utilizar duas amostras com composições diferentes, uma amostra constituída apenas de galhos secos da árvore, enquanto outra composta por galhos com folhagem.

O fluxograma das etapas de processamento da poda de árvore é apresentado na Figura 33, e são descritas nos itens seguintes.

Figura 33 - Fluxogramas das atividades experimentais de avaliação tecnológica de pré-tratamento físico.
Fonte: Elaboração própria.

Conforme se observa na Figura 33 os resíduos de poda de árvore pré-tratados para que fossem adequadas as faixas granulométricas de estudo e o teor de umidade. Os valores de granulometria do material e do teor de umidade foram determinados em virtude das limitações dos equipamentos utilizados (Tabela 4).

Tabela 4– Limitações dos equipamentos

Equipamento	Teor de umidade	Granulometria
Briquetadeira Hidráulica	< 10 %	< 15 mm
Peletizadora	< 14 %	< 4 mm

Fonte: elaboração própria a partir dos manuais dos equipamentos

Os teores de umidade foram escolhidos baseados nos valores apresentados no Tabela 4, sendo eles: 8 %, 10 % e 12 % de umidade. Já a adequação granulométrica, que inicialmente havia sido escolhido uma granulometria de partículas de poda de árvore abaixo de 4 mm, precisou ser repensada, visto que estas partículas apresentavam aspectos muito grosseiros para serem utilizadas na peletizadora. Então optou-se por realizar ensaios com amostras abaixo de 4,0 mm apenas na briquetadeira hidráulica e amostras com granulometria abaixo de 1,7 mm na peletizadora.

3.2.1. Caracterização da poda de árvore

Os resíduos de poda de árvore utilizados nos ensaios realizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo - IPT foram caracterizados quanto à umidade e granulometria. Entretanto, por apresentar tamanhos desiguais de galhos, optou-se por realizar a picagem dos galhos e galhos com folhas para então realizar a caracterização da poda de árvore.

Na Tabela 5 estão relacionados os ensaios de caracterização realizados nas dependências de dois laboratórios do IPT: o Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes e o Laboratório de Análises Químicas e em quais normas os ensaios foram baseados pelos laboratórios.

Tabela 5 - Relação de ensaios de caracterização da poda

Ensaio	Normas
Teor de Carbono ⁶	DIN EN 15104-05
Teor de Hidrogênio ⁶	DIN EN 15104-05
Teor Nitrogênio ⁶	DIN EN 15104-05
Teor de cinzas ⁷	ASTM D1102-84
Enxofre total ⁸	ASTM D4239
Teor de matérias voláteis ⁹	ASTM D1762-84
Teor de Oxigênio ¹⁰	ASTM D3176-09
Poder calorífico ¹¹	DIN EN 14918-10
Teor de Umidade ¹²	DIN EN 14774-3/10
Teor de Cloreto (Cl ⁻) ¹³	DIN 51727/11
Teor de Sulfato (SO ₄ ²⁻) ⁸	DIN 15289/11
S (enxofre total) ⁸	DIN 15289/11

Fonte: elaboração própria a partir dos relatórios de ensaios emitidos.

Os ensaios de distribuição granulométrica, determinação do teor de umidade e densidade *bulk* foram realizados pelo Laboratório de Processos Metalúrgicos do IPT.

A determinação do teor de umidade da poda de árvore foi realizada baseada na norma europeia DIN EN 14774.1. Neste procedimento o material de massa conhecida é colocado em uma estufa a aproximadamente 105°C, até atingir uma massa constante. As umidades tratadas nesse estudo são determinadas em base úmida.

Como o teor de umidade é um parâmetro importante para o estudo de adensamento de biomassa, e como nesse estudo foram determinados 3 teores de umidade para a realização dos ensaios, o teor de umidade do material foi ajustado e determinado através de uma balança de umidade Ohaus modelo MB 45 (Figura 34).

⁶ A determinação de carbono, hidrogênio e nitrogênio, é importante para o controle de qualidade e os resultados podem ser utilizados como parâmetros de entrada para cálculos aplicados para a combustão de biocombustíveis sólidos. A importância ambiental do teor de nitrogênio está ligado a emissões de NO_x. O teor de hidrogênio é importante para o cálculo do poder calorífico. E o teor de carbono é necessário para a determinação das emissões de CO₂.

⁷ O teor de cinzas é uma medida aproximada do teor de minerais e inorgânicos presentes na madeira.

⁸ A importância ambiental do teor de enxofre está ligada a emissões de SO_x.

⁹ O teor de matérias voláteis no combustível influencia diretamente nas características de queima do material.

¹⁰ O teor de oxigênio é importante para o cálculo do poder calorífico.

¹¹ Valor absoluto da energia de combustão por unidade de massa de um biocombustível.

¹² O teor de umidade influencia na capacidade comburente do biocombustível.

¹³ A importância ambiental do teor de cloreto está ligada a emissões de óxidos de cloro, que contribuem para corrosão e emissões de gases nocivos.

Figura 34 - Balança de umidade.

Fonte: Elaboração própria.

As distribuições granulométricas foram realizadas após as adequações granulométricas das amostras. A metodologia utilizada foi baseada nas normas DIN EN 15149-1 e DIN EN 15149-2. Cada uma das amostras foi submetida a um peneiramento com oscilações horizontais, classificando mecanicamente os tamanhos das partículas.

Para esse ensaio foram utilizadas peneiras redondas, com 21,0 cm de diâmetro e com malhas de abertura 0,125 mm; 0,210 mm; 0,5 mm; 1,0 mm; 1,7 mm; 2,4 mm; 3,4 mm e 4,8 mm. As peneiras foram colocadas em um peneirador tipo Ro-Tap (Figura 35), por 15 minutos. As frações obtidas foram pesadas em uma balança com precisão de 0,01 g.

Figura 35 - Equipamento Ro-Tap utilizada para determinação da distribuição granulométrica.

Fonte: Elaboração própria

A definição da densidade *bulk* ou volumétrica é dada pela relação entre massa de partículas necessária para encher um recipiente e seu volume conhecido. Esta análise é comumente realizada utilizando um recipiente cilíndrico com volume nominal de 5 L ou 50 L segundo a norma DIN EN 15103:2010-04 (Figura 36).

Figura 36 - Ensaio de determinação da densidade *bulk*
Fonte: Elaboração própria.

Destaca-se que as dimensões dos galhos de árvore podados eram maiores que o recipiente, inviabilizando tecnicamente a determinação da densidade *bulk* da poda de árvore a partir da norma DIN EN 15103:2010-04. Por esta razão, a densidade *bulk* da poda de árvore foi estimada em função da massa da biomassa coletada e do volume ocupado por ela em um big bag de dimensões conhecidas.

3.2.2. Pré-processamento da poda de árvore

Uma das etapas mais importante do processo de adensamento de biomassa é a etapa de pré-processamento, visto que é por meio dela que se garantirá um produto final de qualidade satisfatória. Os parâmetros de maior relevância estudados nesse trabalho foram: o teor de umidade e a granulometria das partículas.

O ajuste do teor de umidade das biomassas, quando necessário, foi realizado em uma estufa com circulação mecânica de ar, modelo 320E, marca FANEM (Figura 37).

Figura 37- Estufa com circulação mecânica.

Para análise do desempenho da poda de árvore no processo de adensamento foram selecionados três valores aproximados de umidade: 8 %, 10 % e 12 % (base úmida). Esses teores foram determinados em função das limitações dos equipamentos, onde a peletizadora exige uma umidade entre 8 % e 12 % e a briquetadeira um teor abaixo de 10 %.

Como a poda de árvore utilizada no estudo estava armazenada em local aberto, o que favoreceu sua secagem natural, não houve necessidade de secá-la para alguns ensaios.

A adequação granulométrica da poda de árvore foi realizada em moinho de facas (picadores) da marca Plastimax com capacidade de 50 kg/h (Figura 38) com uma peneira de corte de 10 mm na saída do material, e posteriormente foi utilizado o peneirador vibratório para a classificação do material.

(a)

(b)

(c)

(d)

Figura 38 - Imagens ilustrativas do: (a) e (b) Picador; (c) Peneira de corte do picador (10 mm); e (d) Peneirador vibratório.
 Fonte: Elaboração própria

A poda de árvore picada foi peneirada em malhas de 4 mm, sendo que o material retido em 4 mm retornou ao picador até a obtenção do produto totalmente passante na malha determinada (4,0 mm). Entretanto, mesmo a poda de árvore estando abaixo de 4 mm ainda apresentava características grosseiras e pouco maleáveis (Figura 39). Com isso optou-se por obter um material abaixo de 1,7 mm.

Então uma fração do material passante em 4 mm foi peneirado em malha de 1,7 mm, sendo que o material retido retornou ao picador até a obtenção de produto totalmente passante na malha em 1,7 mm.

Figura 39 - Imagem da poda de árvore de microscópio eletrônico (a) Poda de árvore sem folha abaixo de 4,0 mm; (b) Poda de árvore sem folha abaixo de 1,7mm; (c) Poda de árvore com folha abaixo de 4,0 mm; (d) Poda de árvore com folha abaixo de 1,7mm.

Fonte: Elaboração própria.

Os tamanhos das partículas e os aspectos iniciais e finais de cada amostra de poda utilizada no estudo estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Granulometria e aspecto inicial e final das biomassas estudadas.

Biomassa	Granulometria inicial (mm)	Granulometria intermediária (mm)	Granulometria final (mm)
Galhos sem folhas
	+300	- 4,0	- 1,7
Galhos com folhas
	+ 300	- 4,0	-1,7

Fonte: Elaboração própria.

3.2.3. Ensaio de adensamento

O estudo de adensamento dos resíduos de poda foi realizado empregando-se duas técnicas, quais sejam: peletização e briquetagem com briquetadeira hidráulica. Na Tabela 7 são apresentadas as especificações técnicas dos equipamentos utilizados.

Tabela 7 - Equipamentos de adensamento utilizados.

Equipamento	Tecnologia de adensamento	Marca	Modelo	Capacidade	Produto e Diâmetro (mm)
Peletizadora vertical
Peletização	ENG- MAQ	ENG- 0200V	30 kg/h a 60 kg/h	<i>Pellet</i> Ø= 6 mm
Briquetadeira hidráulica
Briquetagem	Lippel	BH150B	60 kg/h a 120 kg/h	Briquete Ø= 80 mm

Fonte: Elaboração própria.

Para os ensaios realizados na peletizadora foram utilizadas amostras com partículas menores que 1,7 mm, visto que a poda de árvore mesmo abaixo de 4,0 mm apresentava partículas muito grosseiras e rígidas para serem alimentadas na peletizadora (Figura 40). Nos ensaios foi utilizada uma matriz horizontal perfurada com diâmetro de 6 mm.

Figura 40 - Processo de adensamento por peletização.
Fonte: Elaboração própria.

Nos ensaios realizados com a briquetadeira hidráulica foram utilizadas poda de árvores com partículas menores que 4,0 mm, nos três teores de umidade previamente escolhidos (Figura 41).

Figura 41 - Processo de adensamento por briquetagem.
Fonte: Elaboração própria.

3.2.4. Caracterização dos produtos adensados

Os ensaios de caracterização dos produtos adensados foram realizados no Laboratório de Processos Metalúrgicos (LPM), baseado nas seguintes normas: DIN EN 15210-1: 2010; DIN EN 15210-2; DIN EN 15103:2010 e DIN EN 16127:2012.

O ensaio de durabilidade mecânica dos *pellets* foi realizado em um tambor rotativo aletado desenvolvido no IPT, contendo 50 esferas de aço com 8 mm de diâmetro (Figura 42). Para este ensaio, os *pellets* foram classificados acima de 4,8 mm, posteriormente uma amostra correspondente ao volume de 100 ml de *pellets* foi pesada e transferida ao tambor. O ensaio foi realizado em triplicata, durante 5 minutos cada, nos quais o tambor estava a uma velocidade de 6 rotações por minuto. Ao final todo o material foi peneirado em malha de 3,36 mm e o material retido foi pesado.

Figura 42 - Ensaio de Durabilidade mecânica dos *pellets*. (a) Equipamento utilizado para o ensaio; (b) *pellets* de galhos no início do ensaio; (c) *pellets* de galhos após o ensaio; (d) *pellets* de galhos com folhas no início do ensaio; (e) e (f) *pellets* de galhos com folhas após o ensaio.

Fonte: Elaboração própria.

O ensaio de durabilidade mecânica dos briquetes foi realizado em um tambor rotativo com duas aletas. Neste ensaio foi utilizada uma alíquota de 5 kg de briquetes, que foi transferida para o tambor rotativo e processada a uma velocidade de 26 rotações por minuto

durante 10 minutos. Em seguida, todo o material de dentro do tambor foi classificado em peneira de abertura 38 mm (1 ½’’), e o material retido foi pesado (Figura 43).

Figura 43 - Ensaio de Durabilidade mecânica de briquetes: (a) Briquetes antes do ensaio; (b) Tambor em rotação; (c) Briquetes após ensaio.

Fonte: Elaboração própria.

O cálculo da durabilidade mecânica dos *pellets* e dos briquetes foi realizado de acordo com a equação 1.

$$D_U = \frac{m_A}{m_E} \times 100 \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

D_U é a durabilidade mecânica, em porcentagem;

m_E é a massa inicial, antes do tamboramento, em gramas;

m_A é a massa dos *pellets* e briquetes classificada após o ensaio (+3,36 mm e +38 mm), em gramas.

A durabilidade mecânica é um parâmetro utilizado para avaliar a capacidade de transporte do produto sem que ele sofra rupturas e desgastes. Neste caso, quanto maior o valor de durabilidade mecânica obtida melhor será as condições dos combustíveis sólidos apresentadas para o seu manuseio.

Densidade *bulk* é um parâmetro importante para o transporte de combustíveis sólidos e quando analisado juntamente com o poder calorífico é possível calcular a densidade energética do combustível. Também facilita a estimativa das necessidades de espaço para transporte e armazenamento (DIN EN 15103:2010).

Para se comparar energeticamente um produto adensado com a matéria prima *in natura*, preferencialmente, utiliza-se o parâmetro da densidade energética, já que o poder calorífico é uma propriedade da matéria prima e, portanto não deveria variar nas diferentes formas apresentadas de produto.

A densidade *bulk* dos *pellets* e briquetes foi realizada utilizando dois recipientes cilíndricos, resistentes à deformação, com volume nominal de 5 L para os *pellets* e 50 L para os briquetes (Figura 44).

Figura 44 - Recipientes para a determinação da densidade *bulk*.
(a) recipiente de 5 L e (b) recipiente de 50 L.
Fonte: Elaboração própria.

Para que este ensaio fosse realizado foi necessária a determinação do volume real dos recipientes, para isso inicialmente foram pesados os recipientes vazios, depois eles foram preenchidos com água a aproximadamente 25°C com algumas gotas de detergente até atingir a capacidade máxima dos recipientes, e então cada recipiente com a água foi pesado novamente e descontado o valor do recipiente vazio. A partir da massa de água necessária para preencher todo o recipiente e utilizando a densidade da água como 1 g/ml foi possível determinar o volume de cada recipiente, sendo o recipiente de volume nominal de 5 L apresenta uma volume real de 4,9 L e o de 50 L apresenta um volume real de 49,4 L.

Posteriormente à determinação dos volumes reais de cada recipiente, os ensaios foram realizados de forma que o material foi vertido em direção ao centro do recipiente até o total

preenchimento, e então o recipiente foi pesado. Este ensaio foi realizado em triplicata (Figura 45).

Figura 45 - Ensaio de determinação de densidade *bulk*. (a) Pellets no recipiente de 5 L e (b) Briquetes no recipiente de 50 L.
Fonte: Elaboração própria.

A densidade *bulk* (*DB*) foi calculada de acordo com a Equação 2, onde m_1 é a massa do recipiente vazio, m_2 corresponde à massa do recipiente cheio e V é o volume do recipiente.

$$DB = \frac{(m_2 - m_1)}{V} \quad \text{Equação 2}$$

A densidade energética do produto adensado é calculada por meio da Equação 3, utilizando os valores de densidade *bulk*, umidade e poder calorífico inferior (PCI), encontrados para os produtos adensados. Este último pode ser calculado a partir da Equação 4.

$$\text{Densidade energética} \left(\frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \right) = PCI \left(\frac{\text{kcal}}{\text{kg}} \right) \cdot DB \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \quad \text{Equação 3}$$

$$PCI = (1 - a) \cdot PCS - 9(1 - a) \cdot h \cdot h_{lv(25^\circ\text{C})} - a \cdot h_{lv(25^\circ\text{C})} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

PCI – Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)

PCS – Poder Calorífico Superior da poda de árvore (kcal/kg)

a – Umidade base úmida (%)

h – Percentual de hidrogênio do material seco

h_{lv} – Entalpia de vaporização da água a 25°C (kcal/kg), igual a 583,58 kcal/kg

Para fins de comparação da densidade energética dos produtos adensados, adotou-se o fator de comparação K, expresso pela Equação 5:

$$K = \frac{\text{Densidade energética do produto adensado}}{\text{Densidade energética da biomassa in natura}} \quad \text{Equação 5}$$

A meta a ser atingida no desenvolvimento dos trabalhos é a obtenção de um fator K de pelo menos 10.

3.3. Resultados e discussão

Os resultados e discussões foram divididos em duas subseções, a saber: caracterização da poda de árvore e estudo de adensamento da biomassa.

3.3.1. Poda de árvore

Essa seção apresenta os parâmetros de caracterização físico-químicos da poda de árvore estudada, divididos em parâmetros químicos e parâmetros físicos.

3.3.1.1. Parâmetros químicos

A Tabela 8 apresenta os resultados de caracterização química, o poder calorífico foi determinado antes e após secagem e as normas utilizadas como referência para a realização dos ensaios.

Tabela 8 - Caracterização das biomassas.

	Ensaio	Unidade	Poda de árvore sem folhas	Poda de árvore com folhas
Material Seco	Carbono	% em massa	46,8	46,2
	Hidrogênio	% em massa	5,69	5,72
	Nitrogênio	% em massa	1,2	1,6
	Teor de cinzas	% em massa	9,1 ± 1,6	13,6 ± 2,3
	Enxofre	% em massa	<0,1	0,21
	Matérias voláteis	% em massa	71,6 ± 1,1	67,8
	Oxigênio	% em massa	37,21	32,67
	Poder calorífico	MJ/kg	Superior: 18,76 Inferior: 17,53	Superior: 17,53 Inferior: 16,30
Umidade relativa	Teor de Umidade	% em massa	10,3	12,0
	Poder calorífico	MJ/kg	Superior: 16,83 Inferior: 15,48	Superior: 15,43 Inferior: 14,05
	Cloreto (Cl ⁻)	% em massa	0,025 ± 0,001	0,078 ± 0,004
	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	% em massa	0,25 ± 0,01	0,65 ± 0,01
	S (enxofre total)	% em massa	0,083 ± 0,003	0,216 ± 0,003

Fonte: Elaboração própria.

Os valores obtidos na caracterização das podas de árvores demonstram o seu alto poder calorífico com ou sem folha, 17,5 MJ/kg e 18,76 MJ/kg respectivamente. Por se tratar de resíduos madeireiros, a poda contém uma alta quantidade de carbono e oxigênio, os quais estão relacionados com o poder calorífico dos materiais.

Segundo Vidal e Hora (2011) o poder calorífico da madeira pra uma umidade de zero é de aproximadamente 18,5 MJ/kg, esse valor sofre variações conforme o teor de umidade da madeira. Após o corte a madeira apresenta uma umidade de 50 % ou mais atingindo um poder calorífico de aproximadamente 7,5 MJ/kg. Conforme se observa os valores encontrados para os resíduos de poda de árvore são condizentes com o valor de poder calorífico encontrado por Vidal e Hora (2011), entretanto verifica-se que há uma pequena diminuição no valor do poder calorífico da poda de árvore quando esta apresenta folhas em sua composição.

Segundo Brito e Barrichelo (1978) o teor de matérias voláteis no combustível influencia diretamente nas características de queima do material, uma vez que os componentes voláteis, quando aquecidos, passam rapidamente para forma gasosa. Neste caso, como os valores do teor de matérias voláteis entre os resíduos de poda de árvore com e sem folhas são próximos, acredita-se que as duas amostras possuem características comburentes, corroborando os valores encontrados de poder calorífico.

O teor de cinzas determina a quantidade de material inorgânico presente na madeira, que quando apresentado em grandes quantidades resultam em emissões de partículas durante

a queima, acarretando na necessidade de instalação de equipamentos para separação de partículas dos gases de combustão. No caso dos teores de cinzas observa-se um maior valor para o resíduo de poda de árvore com folha em comparação ao resíduo de poda sem folhas, neste caso o resíduo de poda de árvore sem folha emitiria uma menor quantidade de material particulado durante sua queima.

O teor de cinzas permitido para o *pellet* segundo as normas europeias é no máximo de 2 % para uso residencial e 3 % para uso industrial (ISO 17225-2). Neste caso, nenhum dos materiais se enquadraria neste padrão de qualidade. Entretanto, o teor de cinzas pode sofrer variação de acordo com a parte da árvore utilizada no processo de adensamento, normalmente a casca e as folhas apresentam teores de cinzas mais elevados, confirmando os dados obtidos, em que a amostra com folha apresenta maior teor de cinzas que a amostra sem folhas. Ademais o teor de cinzas pode ser constituído por impurezas presentes, como areia, terra, poluente veicular e outros contaminantes (CARVALHO, 2011; MOREIRA, 2015).

Os valores de cloro das podas de árvores estudadas variaram de 0,025 % a 0,078 %, enquanto que o enxofre variou de 0,083 % a 0,21 %. O teor destes elementos tem influência na comercialização de materiais adensados. A norma ISO 17225-2, por exemplo, especifica três possíveis classes de *pellets* de madeira baseadas em suas origens e fontes, sendo A1, A2 e B para usos domésticos e I1, I2 e I3 para industriais, com base nos valores aceitáveis para Cl e S, conforme apresentado na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores aceitáveis de Cl e S para uso doméstico e industrial.

Uso doméstico	Propriedade	Unidade	A1	A2	B
	Cl (cloro)	% - massa	≤ 0,02	≤ 0,02	≤ 0,03
Uso industrial	S (enxofre)	% - massa	≤ 0,04	≤ 0,05	≤ 0,05
	Propriedade		I1	I2	I3
Uso doméstico	Cl (cloro)	% - massa	≤ 0,03	≤ 0,05	≤ 0,06
	S (enxofre)	% - massa	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05

Fonte: ISO 17225-2.

A poda de árvore é uma biomassa de origem florestal, portanto utilizou-se a Tabela 9 para analisar os valores permitidos de cloro e enxofre presente nas amostras estudadas. Entretanto, diferentemente do esperado os resíduos de poda de árvore apresentaram valores elevados de enxofre total. Já os valores de cloro estão no limite do permitido.

Segundo estudo realizado por Moreira (2015) as cascas de árvores dos centros urbanos podem ser utilizadas para o biomonitoramento de poluentes em diferentes tipos de via, visto

que a deposição dos poluentes nas cascas ocorre principalmente pela deposição seca, quando as partículas são impactadas no tronco.

A principal fonte de poluentes do ar encontrada no Centro expandido da cidade de São Paulo pode ser atribuída à poluição veicular principalmente da emissão veicular, além de processos de desgastes de suas peças e da ressuspensão das poeiras das vias, cimento de construção, sal marinho e queima de madeira. Como a Cidade Universitária está localizada a margem da Marginal Pinheiros, uma das vias expressas de São Paulo, levantou-se a hipótese de que a concentração de enxofre total encontrada nas amostras de poda de árvore poderia ser de origem exógena, como a poluição.

Moreira (2015) demonstrou que o enxofre é encontrado em maior concentração em vias expressas. Nas cascas de árvores foi possível analisar a origem do enxofre que é, principalmente, da composição da madeira (37 %), de veículos automotores (31,6 %) e de elementos da crosta (19 %). O enxofre foi considerado por Moreira (2015) um dos marcadores de tráfego e a principal fonte de emissão veicular desse elemento é a frota de ônibus e o combustível utilizado.

Supõe-se que o enxofre encontrado nos resíduos de poda de árvores pode estar relacionado com as emissões geradas na via expressa (Marginal Pinheiros) ou até mesmo dentro da USP, onde existe tráfego intenso de ônibus. A técnica utilizada para determinar o teor de enxofre não possibilitou a diferenciação da origem do mesmo.

Segundo Escobar (2013) nem todas as biomassas poderiam ser transformadas em *pellets* para a exportação, pois ultrapassam os limites determinados pelas normas europeias nos teores de cloro e cinzas.

As qualidades dos *pellets* para uso residencial e para o uso industrial são diferentes. Este último necessita de parâmetros que garantem um transporte marítimo e manipulação (teor de finos e durabilidade), uma combustão eficiente (distribuição granulométrica), viabilidade de uso em caldeiras (teor de cloro e cinzas) e regulamentação ambiental (emissões e metal pesado). Então, para uma futura utilização e comercialização os parâmetros de qualidade devem ser analisados com afinco, inclusive verificando se os valores encontrados para as propriedades dos *pellets* são realmente intrínsecos à matéria-prima analisada, ou se são resultados de agentes externos, como a composição do solo, os poluentes atmosféricos, entre outros.

3.3.1.2. Parâmetros físicos

A caracterização dos resíduos de poda de árvore (com folha e sem folha) foi realizada quanto sua distribuição granulométrica, densidade *bulk* e densidade energética. Os resultados dos ensaios são apresentados a seguir.

(i) Distribuição granulométrica

A Figura 46 apresenta a distribuição granulométrica das amostras de poda de árvore sem folha, quais sejam: - 4,0 mm e - 1,7 mm e da poda de árvore com folha -1,7 mm.

Figura 46 - Distribuição granulométrica da poda de árvore.

Fonte: Elaboração própria.

A granulometria do material estudado é um dos principais parâmetros em um processo de adensamento. Neste caso, verificou-se que a distribuição da poda de árvore com ou sem folhas ficou bem próxima, sendo que a amostra com folhas apresentou um maior teor de finos.

A distribuição da amostra abaixo de 4,0 mm apoia o aspecto grosseiro da amostra verificada na imagem tirada em microscópio da Figura 46, isto porque 80 % do material está em uma faixa granulométrica entre 1,0 mm e 3,1 mm. Diferentemente das amostras moídas abaixo de 1,7 mm que apresentam 80 % do seu material (P_{80}) abaixo de 1,1 mm (árvore moída sem folha) e 0,95 mm (árvore moída com folha).

(ii) Densidade *bulk* e densidade energética

Conforme explicado anteriormente a densidade *bulk* da poda de árvore *in natura* (galhos antes de serem picados) foi estimada em função da massa dos resíduos de poda de árvores coletados em um big bag sendo seu volume estimado pelas dimensões conhecidas. O valor de densidade *bulk* obtido foi de $59,14 \text{ kg/m}^3$, a densidade *bulk* é referente a poda de árvore como um todo, inclusive com suas folhas. E o valor de densidade energética calculada foi de $0,91 \text{ GJ/m}^3$ para a poda de árvore sem folha e $0,90 \text{ GJ/m}^3$ para a poda de árvore com folha.

3.3.2. Produtos adensados

Os ensaios de adensamento de poda de árvore foram realizados na briquetadeira hidráulica e na peletizadora, e os produtos adensados foram caracterizados quanto a sua umidade, densidade *bulk*, durabilidade e densidade energética.

3.3.2.1. *Pellets* de poda de árvore

Os ensaios de peletização foram realizados com poda de árvore na granulometria abaixo de 1,7 mm, no Laboratório de Processos Metalúrgicos do IPT, conforme detalhado anteriormente. As condições de ensaios de peletização, bem como os resultados de caracterização dos *pellets* estão na Tabela 10. A nomenclatura adotada para os ensaios se

referem ao tipo de poda e de tecnologia utilizadas, ou seja, peletização de poda de árvore (PP) e peletização de poda de árvore com folha (PPF).

Tabela 10 - Condições de ensaio e resultados da caracterização dos *pellets* de poda de árvore.

Ensaio (unidade)	PP1	PP2	PP3	PPF1	PPF2	PPF3
<i>Granulometria da poda (mm)</i>	<1,7	<1,7	<1,7	<1,7	<1,7	<1,7
<i>Duração do ensaio (em segundos)</i>	-	615,22	507,06	340,26	605,26	317,68
<i>Massa de poda alimentada (kg)</i>	-	3,8	3,9	4,2	5,5	4,3
<i>Massa final do produto (kg)</i>	-	2,25	2,9	0,68	1,46	1,76
<i>PCS (MJ/kg)</i>	18,76	18,76	18,76	17,53	17,53	17,53
<i>Umidade* da poda (%)</i>	8,28	10,26	11,96	10,81	12,31	14,41
<i>Umidade* dos pellets (%)</i>	-	7,53	8,38	8,62	8,28	10,01
<i>PCI (MJ/kg)</i>	-	16,00	15,83	14,66	14,73	14,40
<i>Densidade bulk (kg/m³)</i>	-	499,03	524,77	420,25	511,26	468,43
<i>Densidade energética (GJ/m³)</i>	-	7,99	8,31	6,16	7,53	6,75
<i>Fator K (sem unidade)</i>	-	8,74	9,09	6,74	8,24	7,38
<i>Durabilidade mecânica (%)</i>	-	66,00	83,64	13,23	64,35	73,36
<i>Diâmetro (cm)</i>	-	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

* Teor de umidade em base úmida.

Fonte: Elaboração própria.

Conforme apresentado na Tabela 10 a umidade de 8 % foi insuficiente para a formação dos *pellets* de poda de árvore sem folhas, o que só foi possível a partir da umidade de 10 %. Sendo a maior durabilidade mecânica obtida na umidade de aproximadamente 12 % (PP3), atingindo o valor de 83,46 %.

Para os produtos formados a partir da amostra com folha, a melhor condição foi no PPF3, já na umidade de 10,8 %, a durabilidade foi de apenas 13,23 %, ou seja, praticamente todos os *pellets* que se formaram sofreram rupturas e quebras, se desintegrando.

A presença de maior teor de finos na amostra de poda de árvore com folhas não mostrou vantagens no processo de adensamento.

A densidade energética dos *pellets* de poda foi elevada, entre 6 GJ/m³ e 8 GJ/m³, apresentando o maior fator K de 9,09 para o ensaio PP3 e o menor de 6,74 para o ensaio PPF1. Este fator K representa quantas vezes foi possível aumentar a densidade energética do material.

O aspecto superficial dos *pellets* de poda de árvore antes e após o ensaio de durabilidade mecânica é apresentado na Figura 47, ilustrando os resultados de durabilidade obtidos. Ou seja, os *pellets* PP3 e PPF3 são os que apresentam maiores valores de durabilidade e os que apresentam melhor aspecto após o ensaio.

Figura 47 - Pellets de poda de árvore antes e após o teste de durabilidade.
Fonte: Elaboração própria.

Em função dos resultados obtidos nos ensaios de peletização de poda de árvore, considera-se que as melhores condições de ensaio encontradas foram no PP3 (Figura 48).

Figura 48 - Pellets do ensaio PP3.
Fonte: Elaboração Própria.

No caso do campus da USP na capital, onde são geradas 6,5 toneladas por mês de resíduos de poda de árvore, seria possível produzir na melhor condição (PP3) aproximadamente 4,8 toneladas de *pellets* por mês. Esta quantidade de *pellets* produzida representa 76 GJ de energia disponível para queima. É importante ressaltar que esse valor é apenas uma estimativa calculada a partir dos ensaios realizados neste estudo.

3.3.2.2. Briquetes de poda de árvore

As condições de ensaio e os resultados de caracterização dos briquetes de poda de árvores são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Condições de ensaio e resultados da caracterização dos briquetes de poda de árvore.

Ensaio (unidade)	BHP1	BHP2	BHP3
<i>Granulometria da poda (mm)</i>	<4	<4	<4
<i>Duração do ensaio (em segundos)</i>	2016,77	1649,52	2003,9
<i>Massa inicial (kg)</i>	30,4	19,3	28,7
<i>Massa final do produto (kg)</i>	23,6	19,2	24,2
<i>PCS (MJ/kg)</i>	18,76	18,76	18,76
<i>Umidade* da poda (%)</i>	8,76	10,58	11,93
<i>Umidade* dos briquetes (%)</i>	8,98	10,58	11,93
<i>PCI (MJ/kg)</i>	15,72	15,51	15,31
<i>Densidade bulk (kg/m³)</i>	343,32	388,66	362,35
<i>Densidade energética (GJ/m³)</i>	5,40	6,03	5,55
<i>Fator K (sem unidade)</i>	5,90	6,59	6,07
<i>Durabilidade mecânica (%)</i>	11,72	19,49	30,27
<i>Diâmetro (cm)</i>	7,9	7,9	7,9

* Teor de umidade em base úmida.

Fonte: Elaboração própria.

Ainda que a densidade energética do briquete de poda de árvore tenha atingido um fator K da ordem de 6, a sua baixa durabilidade mecânica (de 11 % a 30 %) indica a que é possível utilizar essa tecnologia para esta biomassa, entretanto nas condições estudadas os resultados são insatisfatórios, principalmente relacionado ao parâmetro para o seu manuseio (durabilidade mecânica).

Para que seja possível a obtenção de briquetes de poda com as características desejadas devem ser avaliadas outras condições operacionais, que favoreçam a interação entre as partículas a serem adensadas, como a redução da granulometria, ou mesmo o emprego de algum tipo de aglomerante.

A Figura 49 ilustra os briquetes de poda de árvore, antes e após os ensaios de durabilidade mecânica.

Figura 49 - Briquetes de poda de árvore antes e depois do teste de durabilidade.

Fonte: Elaboração própria.

Os aspectos dos briquetes produzidos demonstram um produto adensado aparentemente coeso, entretanto ao realizar o teste de durabilidade mecânica, verifica-se fragilidade na sua estrutura e reduzida coesão entre as partículas de poda. Aparentemente, o uso da briquetadeira hidráulica, que trabalha com baixas pressões e consequentemente baixas temperaturas, não gerou um meio favorável para a fluidização da lignina existente na biomassa, na granulometria e umidades estudadas.

No caso do campus da USP na capital, onde são geradas 6,5 toneladas por mês de resíduos de poda de árvore, seria possível produzir na melhor condição (BHP3) aproximadamente 5,5 toneladas de briquetes por mês. Esta quantidade de briquetes produzida representa 84 GJ de energia disponível para queima. É importante ressaltar que esse valor é apenas uma estimativa calculada a partir dos ensaios realizados neste estudo.

3.2 Avaliação das tecnologias de adensamento de poda de árvore

O presente estudo teve como objetivo estudar os processos de peletização e briquetagem de resíduos de poda de árvore, bem como avaliar se as tecnologias poderiam ser aplicadas ao resíduo em questão.

Nos ensaios de adensamento visou-se atingir uma densidade energética 10 vezes maior que o resíduo *in natura*, baseado no estudo de Werther et al. (2000) que afirma ser possível aumentar em 10 vezes a densidade *bulk* da cana de açúcar e em 9 vezes a sua densidade energética. Então, para fins de comparação estabeleceu-se o fator K, expresso pela razão entre a densidade energética do produto adensado e da biomassa *in natura*.

A Tabela 12 apresenta os melhores resultados (conforme discussão detalhada nos itens anteriores) dos ensaios nos quais foram aplicadas as tecnologias de peletização e briquetagem como técnicas de adensamentos dos resíduos de poda de árvores.

Tabela 12 - Melhores resultados obtidos pelo emprego da tecnologia de peletização e briquetagem para cada biomassa avaliada.

Ensaio (unidade)	Poda de árvore		
	<i>Pellet</i> PP3	<i>Pellet</i> PPF3	<i>Briquete</i>
<i>Granulometria da biomassa (mm)</i>	<1,7	<1,7	---
<i>Duração do ensaio (em segundos)</i>	507,06	317,68	---
<i>Massa de biomassa alimentada (kg)</i>	3,9	4,3	---
<i>Massa final do produto (kg)</i>	2,9	1,76	---
<i>PCS (MJ/kg)</i>	18,76	17,53	---
<i>Umidade* da biomassa (%)</i>	11,96	14,41	---
<i>Umidade* dos adensados (%)</i>	8,38	10,01	---
<i>PCI do produto adensado (MJ/kg)</i>	15,83	14,40	---
<i>Densidade bulk (kg/m³)</i>	524,77	468,43	---
<i>Densidade energética produto adensado (GJ/m³)</i>	8,31	6,75	---
<i>Fator K (sem unidade)</i>	9,09	7,38	---
<i>Durabilidade (%)</i>	83,64	73,36	---

Fonte: Elaboração própria.

Conforme se observa na Tabela 12, a tecnologia de peletização permitiu a obtenção de produtos adensados tanto dos resíduos de poda de árvore com folhas como sem folhas. Os *pellets* do ensaio PPF3 foram escolhidos como os melhores, pois mesmo que obtiveram um fator K menor do que o obtido no ensaio PPF2, a durabilidade alcançado foi maior e a umidade dos resíduos utilizados foi maior, ou seja, não foi preciso realizar a secagem do material.

Os *pellets* obtidos no ensaio PP3 (peletização de poda sem folhas) apresentaram Fator K de 9,09 muito próximos da meta estipulada de 10 e o valor de durabilidade obtido foi considerado satisfatório, podendo ser manipulado mais facilmente sem sofrer quebras e perdas significativas.

Segundo Garcia, Caraschi e Ventorim (2012) os *pellets* de madeira de pinus e eucalipto superam em até 4 vezes a densidade da serragem e em 3 vezes a do cavaco. As densidades energéticas da serragem e do cavaco medidas por eles foram, respectivamente, 2,68 GJ/m³ e 3,39 GJ/m³, os quais quando comparados com a melhor condição de *pellets* produzidos (PP3) verificam-se os aumentos de 3,4 em relação à serragem e 2,7 em relação aos cavacos. Com isso é possível verificar que os *pellets* produzidos com resíduos de árvores podem ser comparados energeticamente com os produzidos com madeiras provenientes de plantações energéticas.

Embora a briquetagem dos resíduos de poda seja possível de realizar, os resultados de caracterização dos produtos obtidos não foram significativos, visto que eles apresentaram baixa resistência mecânica, tornando-se inviáveis para o transporte ou uso desse produto.

Ainda que os briquetes de poda de árvore não tenham apresentados bons resultados, não é possível afirmar que não seja aplicável para esta biomassa; outros fatores deverão ser levados em conta, tais como diminuir a granulometria da poda de árvore, avaliar o processo para outros teores de umidade e utilizar agentes aglomerantes para favorecer a compactação do mesmo, aumentando sua resistência mecânica, bem como trabalhar com briquetadeiras com pressões mais elevadas, favorecendo a elevação de temperatura e consequentemente a fluidização da lignina.

Os *pellets* produzidos podem ser utilizados nas condições estudadas para queima no mesmo local de produção, ou até mesmo ser vendidos e transportados para outros locais. Os resultados obtidos ainda são bastante preliminares, possibilitando o estudo de outras variáveis de processo de forma a garantir um produto com melhor qualidade de queima e transporte. Além disso, é importante ressaltar que há a necessidade de estudos adicionais para verificar a viabilidade econômica da produção desses biocombustíveis, visto que por se tratarem de

produtos a partir de resíduos - o custo da matéria prima utilizada no processo pode ser reduzido ou até mesmo nulo, acarretando em um custo de produção menor.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação teve como objetivo principal, avaliar o potencial de utilização do resíduo de poda de árvore urbana para o seu aproveitamento energético por meio dos processos de adensamento (peletização e briquetagem), tendo como base o caso do Campus da Universidade de São Paulo da Capital.

Em virtude do gerenciamento inadequado dos resíduos de poda de árvores efetuado pela Prefeitura do Campus da USP Capital foram apresentadas tecnologias de aproveitamento energético por meio de processos físicos (peletização, briquetagem e extrusão), termoquímicos (combustão, pirólise e gaseificação) e biológicos (digestão anaeróbia), além da reutilização dos resíduos pela confecção de pequenos objetos de madeira e reciclagem por meio da compostagem com o intuito de sugerir tratamentos adequados ao resíduo sem que ele seja desperdiçado.

Todas as tecnologias levantadas neste estudo são aplicáveis aos resíduos de poda desde que estes apresentem características adequadas de acordo com a necessidade de cada uma delas. O aproveitamento energético ou não energético dos resíduos de poda acarreta na economia de recursos e de combustíveis, e conseqüentemente, dos gases poluentes, originários do transporte desses resíduos, além de outros impactos ambientais gerados na disposição inadequada desses resíduos.

Dos ensaios de adensamento realizados, pode-se afirmar que é possível obter *pellets* dos resíduos de poda de árvore com características satisfatórias de resistência ao manuseio e de densidade energética. Os briquetes foram produzidos, confirmando a capacidade de aplicação da tecnologia nos resíduos de poda de árvore, entretanto os produtos não apresentaram resultados satisfatórios nas condições estudadas, os quais apresentaram baixa resistência mecânica.

Nos ensaios de peletização o produto da melhor condição aumentou a densidade energética em 9 vezes em relação ao resíduo de poda de árvore utilizado no estudo. Demonstrando que o aproveitamento energético de poda é uma alternativa promissora. Embora não se trate de potencial com dimensão suficiente para sustentar uma estratégia de expansão da oferta de energia elétrica do país no longo prazo, mas é sem dúvida, elemento importante de uma estratégia regional ou local e, portanto, não deve ser desconsiderada.

No caso do Campus da USP na Capital esses produtos gerados poderiam ser utilizados em pequenas usinas termoeletricas, para a geração de energia elétrica para o Campus, ou até

mesmo para uso de aquecimento nos restaurantes. Além disso, existem diversos estabelecimentos próximos a Cidade Universitária que poderia utilizar os *pellets*, como pizzarias, padarias, cimenteiras, entre outros.

Conforme observado nesta dissertação os resíduos de poda de árvore podem ser adensados através das tecnologias de briquetagem e peletização, entretanto segundo a norma europeia ISO 17227-2 esses produtos não poderiam ser utilizados em ambientes residências ou mesmo industriais, visto que apresentaram parâmetros, como teor de cinzas e enxofre, fora do permitido.

Em face dessa problemática, os parâmetros citados devem ser analisados com mais detalhamento para que se possa verificar se os resultados obtidos podem ser variáveis de acordo com a espécie de árvore, ou se são resultados de ações exógenas, entre outras. Outro fator importante que deve ser considerado é o aprimoramento das tecnologias de limpeza dos gases gerados na combustão, que pode favorecer o uso de adensados com parâmetros diferentes dos estabelecidos na norma.

O uso desses resíduos para o aproveitamento energético pode colaborar com a redução do desmatamento de florestas energéticas ou desmatamentos clandestinos, além da emissão com balanço nulo de CO₂ durante a queima, devido à reabsorção do composto no próximo ciclo de vida da planta, durante o processo de fotossíntese.

5. PERSPECTIVAS FUTURAS

Deve -seressaltar a urgência na elaboração de Planos de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos (PGIRS) para todos os municípios, o que facilitaria o tratamento e disposição adequada dos RSU. Por mais que muitos municípios já tenham elaborado o PGIRS, ainda existe a falta de comprometimento dos mesmos em alimentar o sistema nacional de informações sobre a gestão dos resíduos sólidos (SINIR), por exemplo.

Diante de tudo que foi levantado no estudo é evidente que além de existir a previsão para a gestão integrada dos RSU dos municípios, estas devem ser colocadas em prática, garantindo um tratamento e disposição final adequada para o RSU gerado. Uma série de medidas revela-se necessária, principalmente o estudo das tecnologias de aproveitamento energético e não energético para cada tipo de resíduo, considerando as características particulares dos municípios.

Como trabalhos futuros, recomenda-se o estudo do processo de adensamento de resíduos de poda de árvores em condições diferentes das estudadas nessa dissertação, principalmente visando à minimização dos teores de impróprios exógenos, como por exemplo, adensar a poda de árvore sem casca e sem folhas (maiores “veículos” de impróprios exógenos da árvore). Além disso, os processos de adensamento podem ser analisados em outros teores de umidade e granulometria, para alcançar valores de densidade e resistência melhores que os obtidos nessa dissertação.

No tocante ao aproveitamento energético dos resíduos de poda de árvore, seria conveniente testar outras tecnologias existentes, para que todos os estudos servissem de base para a escolha da tecnologia mais adequada para cada município e para a elaboração de legislações específicas para os biocombustíveis gerados a partir madeira e dos resíduos de poda de árvores.

REFERÊNCIAS

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2011.pdf>>. Acesso em: maio de 2016.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2012**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2012.pdf>>. Acesso em: maio de 2016.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014**. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>>. Acesso em: maio de 2016.

ABRELPE. **Resíduos Sólidos Urbanos: Recuperação Energética**. 2012. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/download/informativo_recuperacao_energetica.pdf>. Acesso em: maio de 2016.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2ª ed, Brasília. 2005.

ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3ª ed, Brasília. 2008.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Nota técnica n° 157**, de 17 de setembro de 2014. 2014.

ARSOVA, L. **Anaerobic digestion of food waste**: Current status, problems and an alternative product. (Dissertação de Mestrado). Columbia University, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10.004**. Resíduos sólidos: classificação. Rio de Janeiro, 2004.

BANDEIRA, G.C.; TÔRRES FILHO, A. Desempenho ambiental e energético de um biocombustível sólido obtido de resíduos de madeira gerados em área metropolitana. **Biomassa e Energia**, v. 2, n. 2, 2005.

BATISTA, R.O. et al. Remoção de óleo e sólidos totais em biofiltros operando com esgoto doméstico primário. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 1, p. 37-43, 2013.

BEKON. Disponível em: <<http://www.bekon.eu/>>. Acesso em: maio de 2016.

BELGIORNO, V. et al. Energy from gasification of solid wastes. **Waste Management**, n. 23, p. 1-15, 2003.

BOYLE, G. **Renewable energy: power for a sustainable future**. 2^oed. Oxford: Oxford University Press, 2004.

BRASIL, Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução Conama nº316, de 29 de outubro de 2002. 2002. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=338>>. Acesso em julho de 2016.

BRASIL, Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei nº 11.445**, de 5 de janeiro de 2007. 2007. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em: abril de 2016.

BRASIL, Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: dezembro de 2015.

BRASIL, Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Decreto nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010. 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: dezembro de 2015.

BRASIL. Governo Federal. Ministério do meio ambiente. **Plano Nacional de resíduos sólidos**. 2012. Disponível em: <http://www.sinir.gov.br/documents/10180/12308/PNRS_Revisao_Decreto_280812.pdf/e183f0e7-5255-4544-b9fd-15fc779a3657>. Acesso em: dezembro de 2015.

BREURE, A.M. **Hydrolysis and acidogenesis fermentation of protein and carbohydrates in anaerobic waste waster treatments**. Off setduikkerij Kanters, B. V., Alblaserdam. 1986.

BRIDGWATER, A.V.; TOFT, A.J.; BRAMMER, J.G. A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 6, p. 181-248, 2002.

BRIDGWATER, A.V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. **Chemical Engineering Journal**, n. 91, p. 87-102, 2003.

BRITO, J.O. Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira. **Documentos Florestais**, n.9, p. 1-9, Piracicaba, 1990. Disponível em: <<http://www.ipef.br/publicacoes/docflorestais/cap9.pdf>>. Acesso em maio de 2016.

BRITO, J.O.; BARRICHELO, L.E.G. Características do eucalipto como combustível: análise química imediata da madeira e da casca. **IPEF**, n. 16, p. 63-70, 1978.

CAMILO, D.R.; ESPADA, S.L.V.; MARTINS, J.R.F. **Caracterização do sistema de gestão dos resíduos de poda e remoção da arborização urbana nos municípios do Estado de São Paulo**. 2008. 30p. Relatório de estágio supervisionado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiróz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

CARNEIRO, T.F. **Digestión anaeróbia termofílica seca de residuos sólidos urbanos: estudio de las variables del proceso en el arranque y estabilización del bio-reactor**. (Tese de doutorado). Departamento de Ingeniería Química, Tecnología de Alimentos y Tecnología del Medio Ambiente, Universidad de Cádiz, Espanha. 2005.

CARVALHO, N.P.R. de. **Implementação do plano de controlo, inspecção e ensaio na produção de pellets de madeira**. 2011. Dissertação (Mestre em Tecnologias ambientais), Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Portugal, 2011.

CENBIO (Centro Nacional de Referência em Biomassa). **Comparação entre tecnologias de gaseificação de biomassa existentes no Brasil e no exterior e formação de recursos humanos na região norte**: Estado da arte da gaseificação. FINEP/ CETENERG, 2002. Disponível em: <[http://143.107.4.241/download/publicacoes/Estado da Arte.pdf](http://143.107.4.241/download/publicacoes/Estado_da_Arte.pdf)>. Acesso em maio de 2016.

CENBIO (Centro Nacional de Referência em Biomassa). **Carvão Vegetal: aspectos técnicos, sócias, ambientais e econômicos**. Nota técnica X. 2008.

CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa. Disponível em: <www.iee.usp.br/gbio>. Acesso em: julho de 2016.

CHEN, G.; ANDRIES, J.; SPLIETHOFF, H. Biomass conversion into fuel gas using circulating fluidized bed technology: the concept improvement and modelling discussion. **Renewable Energy**, v. 28, p. 985-994, 2003.

CHERNICHARO, C.A.L. **Reatores Anaeróbios**. Belo Horizonte: DESA-UFME. 1997.

COLOMBO, S.F.O.; PIMENTA, A.S.; HATAKEYAMA, K. Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável. In: 13º Simpósio de Engenharia de Produção, 2006, Bauru. **XIII SIMPEP**. Bauru: São Paulo, 2006.

COLTURATO, L.F.D.B. (cord.). **RSU – O Estado da Arte da Tecnologia da Metanização Seca**. Ministério das Cidades: Brasília – DF. 2015.

CORTEZ, C.L. **Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: Estudo de caso: AES Eletropaulo**. 2011. 246 f.. Tese (Doutorado em ciências) Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

DE BAERE, L. **Will anaerobic digestion of solid waste survive in the future?** 4th International Symposium Anaerobic Digestion of Solid Waste. Copenhagen, Denmark. 2005.

DIAS, J.M.C.S. et al. **Produção de briquetes e péletes a partir de resíduos agrícolas, agroindustriais e florestais**. Documentos 13. Embrapa Agroenergia, 2012.

DIAZ, L.F., et al. **Compost Science and technology**. Elsevier, 2007. (Waste Management series, v. 8)

DINKELBACH, L. **Thermochemical conversion of willow from short rotation forestry**. 2000. Disponível em: <<ftp://ftp.ecn.nl/pub/www/library/report/2000/c00028.pdf>>. Acesso em: abril de 2016.

DUTENHEFNER, S. **Estudo do uso de biomassa como fins energéticos e análise das emissões de gases de efeito estufa na produção do álcool a partir da cana-de-açúcar**. (Dissertação de mestrado). Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. São Paulo, 2011.

EDENHOFER, O. et al. **Renewable energy sources and climate change mitigation: special report of the intergovernmental panel on climate change**. Nova York: Cambridge University Press, 2012.

EIGENHEER, E.M.; FERREIRA, J.A.; ADLER, R.R. **Reciclagem: Mito ou Realidade**. Rio de Janeiro: In Folio, 2005.

EIGENHEER, E.M. **História do Lixo: A limpeza urbana através dos tempos**. Rio de Janeiro: Ed. Campus, 2009.

EPE (Empresa de Pesquisa Energética - Ministério de Minas e Energia do Brasil). **Balanço Energético Nacional 2015: ano base 2014**. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

ESCOBAR, J.F. **O potencial da produção de sustentável de madeira para energia no Brasil: o caso dos pellets de madeira**. 2013. Qualificação de Tese (Doutorado em Energia), Programa de Pós-graduação em Energia, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

ESCOBAR, J.F. No mundo à procura da redução dos GEE. Qual é a importância da produção de florestas energéticas no Brasil?. (em edição). **Anuário Brasileiro de Biomassa (2016)**. São Paulo; ISSN 2447-5785., Jan., 2016a.

ESCOBAR, J.F. **O potencial energético da biomassa florestal**. São Paulo. 2016b. Apresentação em Power-point. 81 slides.

FADE – Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco. **Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão**. BNDES, 2014.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). **Wood gas as engine fuel**. 1986. Disponível em: <<http://www.fao.org/3/a-t0512e.pdf>>. Acesso em maio de 2016.

FARIAS, L.M.; SELLITTO, M.A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 01-106, jan./jun.2011.

FERNANDES, F.; SILVA, S.M.C.P. **Manual prático para compostagem de biossólidos**. Rio de Janeiro: ABES. 1999.

FILIPPETTO, D. **Briquetagem de resíduos vegetais: viabilidade técnico-econômica e potencial de mercado**. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) Pós-graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2008.

FLORES, M.C.; SANCINETTI, G.P.; RODRIGUES, M.V. Avaliação de diferentes materiais suporte para aplicação na biofiltração para remoção de odor de sistemas de esgotos sanitários. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 2014. Florianópolis. **COBEQ2014**.

GARCIA, D.P.; CARASCHI, J.C.; VENTORIN, G. Caracterização energética de pellets de madeira. In: **7º Congresso Internacional de Bioenergia**, 2012. São Paulo.

GARCIA, D.P. Pellets: uma questão de competitividade e preço. **Revista da Madeira**, v. 138, p. 32-34, 2014.

GARCIA, D. P. et al. Trends and challenges of Brazilian pellets industry originated from agroforestry. **CERNE**, v. 22, n. 3, p. 233-240, 2016.

GAVIRIA, J.C. **Pelletizar maderas, una forma económica y ecológica de producir combustible**. 2007. Disponível em: <<https://www.engormix.com/MA-balanceados/fabricacion/articulos/pelletizar-madera-forma-economica-t1778/801-p0.htm>>. Acesso em: dezembro de 2015.

GENOVESE, A.L.; UDAETA, M.E.M.; GALVAO, L.C.R.; **Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo**. In: 6º Encontro de energia no meio rural, Campinas, 2006. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022006000100021&script=sci_arttext>. Acesso em: abril de 2016.

GOLDEMBERG, J. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. São Paulo: Edusp. 2010.

GUERRERO L. A., MAAS G., HOGLAND W. Solid waste management challenges for cities in developing countries. **Waste Management**, v. 33, n.1, p.220–232, 2013.

GUIGNET, C.E. **Relatório sobre cimica industrial, agricultura e silvicultura**. Rio de Janeiro, 1877.

HZI - **HITACHI ZOSEN INOVA ENGENHARIA**. Disponível em: <http://www.hz-inova.com/cms/wp-content/uploads/2015/06/HZI_Kompogas_10_engl_RZ_3_WEB.pdf>. Acesso em: maio de 2016. 2016a.

HZI - **HITACHI ZOSEN INOVA ENGENHARIA**. <http://www.hz-inova.com/cms/en/home?page_id=964>. Acesso em maio de 2016. 2016b.

IBGE – Instituto de Geografia e estatística. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. **Perfil dos Municípios Brasileiros 2015**. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/perfilmunic/2015/default.shtm>>. Acesso em: junho de 2016.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17225-2**: Solid biofuels: Fuels specifications and classes – Part 2: Graded wood pellets. 2014.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos** – Relatório de pesquisa. 2012.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas / CEMPRES – Compromisso Empresarial para Reciclagem. **Lixo Municipal: Manual de gerenciamento integrado**. 3ª ed. São Paulo, 2010.

JENKINS, B.M. et al. Combustion properties of biomass. **Fuel Processing Technology**. n. 54, p. 17-46. 1998.

JUCÁ, J.F. Destinação final de resíduos sólidos urbanos no Brasil. In: 5º Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2003, Porto Alegre. **REGEO' 2003**.

KALIYAN, N.; MOREY, R.V. Densification characteristics of corn stover and switchgrass. **Transactions of the ASABE**, v.52, p. 907-920, 2009.

KIEHL, E.J. **Manual de compostagem** – Maturação e Qualidade do Composto. Piracicaba: Degaspari. 1998.

KLEIN, A. **Gasification: An alternative process for energy recovery and disposal of municipal solid waste**. 2002. Disponível em: <<http://www.seas.columbia.edu/earth/kleinthesis.pdf>>. Acesso em maio de 2016.

KOMPOGAS. **Solução no tratamento de resíduos sólidos urbanos**. Disponível em: <http://www.kuttner.com.br/Files/Filer/Downloads/pt/kuttner_apr_beneficiamento_lixo_urbano.pdf>. Acesso em: fevereiro de 2016. 2016a.

KOMPOGAS. Disponível em: <<https://www.axpo.com/axpo%20kompogas/%20de/home.html>>. Acesso em: fevereiro de 2016. 2016b.

KÜTTNER. Tecnologias para tratamento de resíduos sólidos urbanos. Disponível em: <http://www.kuttner.com.br/Files/Filer/Downloads/pt/kuttner_cat_pt_tratamento_de_residuos_solidos_urbanos.pdf>. Acesso em: fevereiro de 2016.

LETHIKANGAS, P. Quality properties of pelletized sawdust, logging residues and bark. **Biomass and Bioenergy**, v.19, n.20, p.351-360, Aug. 2001.

LOUÇÃO, I. **Valorização da biomassa florestal, proveniente da doença de nematódeo de pinheiro, para produção de pellets**. Universidad de Nova de Lisboa. Lisboa, 2008.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. A review of techonolgies and performances of termal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Management**, v. 37 ,p. 26-44, 2015.

LOPES, K.V.; BERBERIAN. G.A.; RAMOS, C.J.G.O reaproveitamento do resíduo madeireiro na produção de pequenos objetos de madeira na cidade de Belém PA. In: **10º Congresso Nacional de Meio Ambiente de Poços de Caldas**, 2013.

MARTINS, C.H.O aproveitamento de madeiras das podas da arborização viária de Maringá/PR. **Revista Verde de agroecologia e desenvolvimento sustentável**, v. 8, n. 2, p. 257-267, 2013.

MARTINS, H. **Madeira como fonte de energia**. In Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC). Uso da madeira para fins energéticos. Belo Horizonte, 1980. (Série de publicações técnicas, 1)

McDOUGALL, F. et al. **Integrated solid waste management: a life cycle inventory**. 2ª ed. Blackwell Publishing, 2001.

MEIRA, A.M. de. **Gestão de resíduos da arborização urbana**. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba, 2010.

MICHAELIS. **Dicionário prático: Língua Portuguesa**. 2 ed. São Paulo: Companhia Melhoramentos, 2011.

MODESTO FILHO, P. Reciclagem da matéria orgânica através da vermocompostagem. In: BIDONE, F. R. A. (Org.). **Metodologias e técnicas de minimização reciclagem, e reutilização de resíduos sólidos urbanos**. 1 ed. Rio de Janeiro: ABES. Cap.5, p. 31-39. 1999

MONTEIRO, J.H.P. et al. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MOREIRA, J.M.A.P. Potencial e participação das florestas na matriz energética. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.31, n. 68, p. 363-372, abr./jun. 2011.

MOREIRA, T.C.L. **Biomonitoramento intra-urbano da poluição de origem veicular: utilização da casca de árvore na identificação de fontes de poluição atmosférica**. 2015. Tese (Doutorado em Ciências) Programa de Patologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

NOLASCO, A.M. **Resíduos da colheita e beneficiamento da caixeta - *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC.: caracterização e perspectivas**. (Tese de doutorado) Universidade de São Paulo. São Carlos, 2000.

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

OBERNBERGER, I.; THEK, G. Physical characterisation and chemical composition of densified biomass fuels with regard to their combustion behaviour. **Biomassa & Bioenergy**. n. 27, p. 653-669, 2004.

OWS. **Biogas Plants – DRANCO**. Disponível em: http://www.ows.be/household_waste/dranco/. Acesso em: fevereiro de 2016. 2016.

PÉREZ, J.M.M. **Testes em uma planta de pirólise rápida de biomassa em leito fluidizado: critérios para sua otimização**. (Tese de doutorado). Faculdade de engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2004.

PEREIRA NETO, J.T. **Quanto vale o nosso lixo**. Belo Horizonte: IEE, 1999.

PIETSCH, W. **Agglomeration processes – phenomena, technologies, equipment**. Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim. Germany, 2002.

PIVETTA, K.F.L.; SILVA FILHO, D.F. **Arborização Urbana**. Boletim Acadêmico. Jaboticabal, SP: UNESP/FCAV/FUNEP. 2002.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Decreto nº 42.214 de 2002**. Disponível em: http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=25072002D%20422170000. Acesso em: abril de 2016.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Ecopontos**. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/chamadas/quantitativos_de_residuos_recebidos_nos_ecopontos_-_2013_1396295399.pdf>. Acesso em: abril de 2016.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Lei 14.723 de 2008**. Programa de aproveitamento de madeira de poda de árvores. Disponível em: <http://www3.prefeitura.sp.gov.br/cadlem/secretarias/negocios_juridicos/cadlem/integra.asp?alt=16052008L%20147230000>. Acesso em: abril de 2016.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da cidade de São Paulo**. São Paulo, 2014.

PwC - PricewaterhouseCoopers Corporate Finance & Recovery Ltda. **Três anos após a regulamentação da Política Nacional de Resíduos Sólidos: seus gargalos e superações**. 2014. Disponível em: <http://www.selur.com.br/wordpress/wp-content/uploads/2014/09/estudo-selur-PNRS-2014_acessivel1.pdf>. Acesso em: abril de 2016.

QUIRINO, W. F. **Briquetagem de resíduos lignocelulósicos**. (Circular Técnica, 2). Brasília: LPF/IBAMA, 1991.

REIS, M.F.P. **Avaliação do processo de compostagem de resíduos sólidos urbanos**. 2005. Tese (Doutorado em engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century). **Renewables 2015: Global status report**. 2015. Disponível em: <http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/REN12-GSR2015_Onlinebook_low1.pdf>. Acesso em: março de 2016.

RISE-AT (Regional information service center for south east Asia on appropriate technology). **Review of current status of anaerobic digestion technology for treatment of municipal solid waste**. Institute of Science and Technology research and development. Chiang Main University, 1998. Disponível em: http://rymd.lwr.kth.se/grundutbildning/ae2301/impegax/reading/Waste/ANAEROBIC_DIGESTION_TECHNOLOGY/Adreview.pdf. Acesso em: junho de 2016.

ROUSSET, P. et al. LCA of eucalyptus wood charcoal briquettes. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 14, p. 1647-1653. 2011.

RUMPF H. **The strength of granules and agglomerates**. Knepper WA. Agglomeration. 1962.

SALOMOM, K.R.; FILHO, G.L.T. **Dendroenergia – Série Energias Renováveis**. 1 ed. Itajuba, MG: FAPEPE, 2007

SAMPAIO, J.A.; COSTA, L.S.; ANDRADE, M.C. de. **Ensaio contínuo de briquetagem em bancada e piloto**. CETEM (Centro de Tecnologia Mineral). Parte V – Aglomeração. Cap. 22. p. 379, Rio de Janeiro, 2007.

SAMSON, R et al. The potential of C4 perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry. **Critical Reviews in Plant Sciences**. v.24, p.461- 495. 2005.

SÃO PAULO (Estado) Secretaria do Meio Ambiente. **Resolução SMA-079, de 04 de novembro de 2009**. 2009. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/resolucao/2009/2009_res_est_sma_79.pdf> Acesso em julho de 2016.

SILVA FILHO, D. F. Videografia aérea multiespectral em silvicultura urbana. **Ambiência Guarapuava**, PR. Edição Especial, v.2 p. 55-68, 2006.

SONNNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C.; VAN WYLEN, G.J. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.

STELTE, W et al. A study of bonding and failure mechanisms in fuel pellets from different biomass resources. **Biomass e Bioenergy**, v. 35. p.910-918. 2011

STERNADT, G.H. **Pequenos objetos de madeira – POM: compostagem de madeira serrada**. Brasília: Ibama, LPF. 2002.

SVMA (Secretaria do Verde e do Meio Ambiente do Município de São Paulo). **Manual de Poda**. 2005. Disponível em: <http://ww2.prefeitura.sp.gov.br/arquivos/secretarias/meio_ambiente/eixo_biodiversidade/arborescencia/0002/Manual_poda_final.pdf>. Acesso: maio de 2016.

STEIL, L. **Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos**. (Dissertação de mestrado). Instituto de Química, Universidade Estadual Paulista, Araraquara. 2001.

TAVARES, S.R.L.; SANTOS, T.E. Uso de diferentes fontes de biomassa vegetal para a produção de biocombustíveis sólidos. **Holos**, ano 29, vol. 5, 2013.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of solid waste management**. 2ª ed. McGRAW-HILL. 2002.

TUMULURU, J.S.; WRIGHT, C.T.; KENNY, K.L.; HESS, J.R. **A review on biomass densification technologies for energy application**. Idaho National Laboratory of U. S. Department of Energy. 2010 .

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP. **USP e as profissões: Campi**. Disponível em: <<http://prceu.usp.br/uspprofissoes/campi/>>. Acesso em: julho de 2016. 2016.

USP MAPAS. Disponível em: <http://www.usp.br/mapas/cidade_universitaria.html>. Acesso em: julho de 2016. 2016.

VALE, A.T.; SARMENTO, T.R.; ALMDEIRA, A.N. Caracterização e uso de madeiras de galhos de árvores provenientes da arborização de Brasília, DF. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 15, n. 4, p. 411-420, 2005.

VIDAL, A. C. F.; HORA, A. B. da. Perspectivas do setor de biomassa de madeira para a geração de energia. **BNDES Setorial: Papel e Celulose**, p. 261-314, 2011.

VIEIRA, R. da S. **Pequenos objetos de madeira de eucalipto: Possibilidade de aproveitamento de resíduo**. 2006. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2006.

VILHENA, A., (Coord.). **Lixo Municipal: Manual de gerenciamento integrado**. 3 ed. São Paulo: CEMPRE, 2010.

WANG, X. et al. Wood biodegradation in laboratory-scale landfills. **Environmental, Science and Technology**. v. 45, n.16, p. 6864-6871, 2011.

WERTHER, J. et al. Combustion of agricultural residues. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 26. p.1-27. 2000.

WCED (World Commission on Environment and Development). **Our common future**. 1987. Disponível em: <<http://www.un.org/documents/ga/res/42/ares42-187.htm>>. Acesso em: dezembro de 2014.

WORLD BANK. **What a waste:** A global review of solid waste management. Washington, USA. 2012. Disponível em: [http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What a Waste2012 Final.pdf](http://siteresources.worldbank.org/INTURBANDEVELOPMENT/Resources/336387-1334852610766/What_a_Waste2012_Final.pdf)>. Acesso em: junho de 2016.

WSP. **Review of state-of-the-art waste-to-energy Technologies.** 2013. Disponível em: http://www.wtert.com.br/home2010/arquivo/noticias_eventos/WSP%20Waste%20to%20Energy%20Technical%20Report%20Stage%20Two.pdf>. Acesso em: maio de 2016.

XIMENES, F.A.; GARDNER, W.D.; COWIE, A.L. The decomposition of wood products in landfills in Sydney, Australia. **Waste Management**, v. 28, n. 11, p. 2344-2354, 2008.

XIMENES, F.A. et al. The decay of wood in landfills in contrasting climates in Australia. **Waste Management**, n. 41, p. 101-110. 2015.

ANEXO A – Entrevista com engenheira da área de Serviço Técnico de Gestão Ambiental da Prefeitura do Campus

Questionário destinado a Prefeitura do Campus da USP na Capital a respeito da gestão de resíduos sólidos urbanos – Poda na USP.

1º) Quantos quilos de poda são gerados mensalmente ou anualmente?

R: *Não temos este valor*

2º) Qual a destinação final deste resíduo?

R: *Aterros legalizados*

3º) Se não for aterro, o que é feito com a poda?

4º) Como é realizada esta destinação? A empresa faz a coleta ou vocês tem um carro para isso? Ou o carro é alugado ou emprestado conforme a demanda?

R: *Contratamos empresa por registro de preço que realiza a poda e destina os galhos para aterro*

5º) Quantos veículos ou viagens são necessários para fazer o transporte da poda?

R: *Não sei*

6º) Qual a distância da USP até o destino final?

R: *Não sei*

7º) Esse resíduo é “descartado” sozinho ou com outro resíduo (varrição, restaurantes, lixo comum, etc)?

R: *É descartado sozinho*

8º) Existe algum planejamento para a realização das podas? Elas são programadas?

R: *Sim, temos uma programação*

9º) Se tem programação, ela é feita baseada em qual conceito: clima/estação do ano/ espécie da planta, etc?

R: *Verificamos a necessidade de poda (galhos: seco, baixo, encobrindo luminárias, encostado em janelas, prédio, execução de obra, entre outros motivos)*

10º) Qual a periodicidade de serviço?

R: *Não tem periodicidade*

11º) Se não são planejadas, são podas emergenciais por quedas, quebras?

R: *São planejadas por necessidade, após realizarmos vistoria, e emergenciais, mas apenas com autorização da Subprefeitura*

12º) O pessoal que realiza a poda é da USP ou contratados?

R: *Contratado*

14º) Se são da USP, são treinados especificamente para isso? Existe algum custo esse treinamento, ou a própria prefeitura dá?

15º) Existe algum estudo quanto a espécie de cada árvore relacionada com as necessidades de poda delas?

R: *Não*

16º) Já foram feitos projetos ou pesquisas direcionados para o aproveitamento dessa poda (compostagem, moveis com os troncos, queima para energia)?

R: *Sim, tínhamos uma composteira que funcionou por 15 anos*

17º) Algum desses projetos ou pesquisas já foram aplicados? Deram certo? Por que não?

R: *A composteira deu certo até o momento em que foi realizada uma obra no local da composteira.*

18º) Quanto é gasto com todo o processo de destinação final deste resíduo, aterro+transporte+pessoal?

R: *Não sei o custo da destinação, apenas o valor do serviço de poda*