

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ADELINO CARLOS MACCARINI

DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO PARA CONVERSÃO ENERGÉTICA DE
RESÍDUOS DE PLANTIOS FLORESTAIS E DE PODA DE ÁRVORES URBANAS

CURITIBA
2016

ADELINO CARLOS MACCARINI

DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO PARA CONVERSÃO ENERGÉTICA DE
RESÍDUOS DE PLANTIOS FLORESTAIS E DE PODA DE ÁRVORES URBANAS

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental como requisito parcial à obtenção do título de Doutor Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Risso Errera

Coorientador: Prof. Dr. Marcelo Rodrigues Bessa

CURITIBA

2016

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

- M123d Maccarini, Adelino Carlos
Desenvolvimento metodológico para conversão energética de resíduos de plantios florestais e de poda de árvores urbanas / Adelino Carlos Maccarini – Curitiba, 2016.
234p.: il. [algumas color.]; 30 cm.
- Tese (doutorado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, 2016.
Orientador: Marcelo Risso Errera
Coorientador: Marcelo Rodrigues Bessa.
Bibliografia: p. 109-112.
1. Biomassa – Resíduos florestais. 2. Fornalhas. 3. Energia – Fontes alternativas. I. Universidade Federal do Paraná. II. Errera, Marcelo Risso. III. Bessa, Marcelo Rodrigues. IV. Título.

CDD: 662.88

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



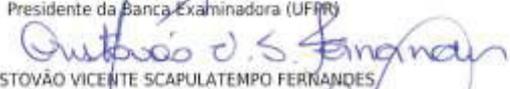
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL
Código CAPES: 40001016021P0.

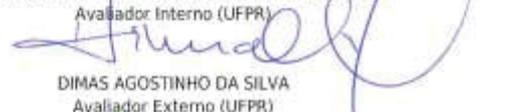
TERMO DE APROVAÇÃO

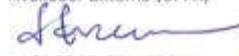
Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE RECURSOS HÍDRICOS E AMBIENTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **ADELINO CARLOS MACCARINI**, intitulada: **"DESENVOLVIMENTO METODOLÓGICO PARA CONVERSÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS DE PLANTIOS FLORESTAIS E DE PODA DE ÁRVORES URBANAS"**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua Aprovação.

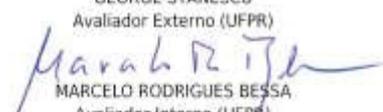
Curitiba, 01 de Novembro de 2016.


MARCELO RISSO FERRERA
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


CRISTOVÃO VICENTE SCAPULATEMPO FERNANDES
Avaliador Interno (UFPR)


DIMAS AGOSTINHO DA SILVA
Avaliador Externo (UFPR)


GEORGE STANESCU
Avaliador Externo (UFPR)


MARCELO RODRIGUES BESSA
Avaliador Interno (UFPR)


FERNANDO FERNANDES
Avaliador Externo (UEL)

DEDICATÓRIAS

Dedico esta Tese à minha família, principalmente aos meus pais Valdir (*in memoriam*) e Zenaide, origem de tudo. E também à minha querida esposa, Eliane, aos meus filhos Naiá, Lorenzo e Bianca, continuidade de tudo.

Ao meu orientador, Marcelo Risso Errera por sua atenção e paciência.

Àqueles que lutam, que acreditam e que buscam por um ideal.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Que criou o sangue. É! o sangue! este líquido precioso que circulou em minhas veias, que me forneceu energia, que me sustentou, que me manteve a vida, que estava lá, presente, passando pelo meu corpo e nutrindo minha alma por todo o tempo sem que eu percebesse, diuturnamente.

Nas lutas diárias, algumas vezes, se perdeu algumas gotas. Era tão pouco, mas outras vezes, até parecia que iria faltar. Porém, como o sinal vermelho em uma avenida de tráfego intenso, como a seiva nas plantas, não pôde faltar. Contudo, graças a ele, pelo fato de me conservar em pé, consegui atingir metas e objetivos. E foi por cada gota utilizada - quem sabe, no mínimo alguns milhares de quilocalorias equivalentes -, que se elaborou esta tese.

Esse sangue também circulou pelo coração de pessoas maravilhosas, de amigos que repetiam a frase “no fim, tudo irá dar certo, acredite! mas busque!”, amigos que me deram força e amparo. Circulou nas veias de cientistas e estudiosos diversos e de outros autores que me apresentaram boas referências para realizar este trabalho. A eles, toda a gratidão.

Mas, gratidão mesmo, dedico ao meu orientador e querido amigo Marcelo Risso Errera que aceitou o desafio da Tese;

Também ao meu coorientador e amigo, Marcelo Rodrigues Bessa que forneceu dicas e esclarecimentos valiosos;

Grato também, a todos da banca que proporcionaram a melhoria deste trabalho;

Ao Celmar, secretário do PPGERHA. Este cara merece! Sua frase mais marcante: “notícia boa demora para chegar, não se preocupe!”. E realmente, não era para preocupar.

À minha família, principalmente aos meus queridos pais, Valdir (*in memoriam*) e Zenaide. À minha querida esposa Eliane, meus queridos filhos Naiá, Lorenzo e Bianca.

A todos meus amigos, colegas e outros, que me auxiliaram na elaboração do trabalho e me deram força para chegar no final: Ao Gilson Adamczuk Oliveira, Mauro Vestena, Sérgio Pessa, Paulo Cesar Adamczuk, Cesar Destro, Robinson Ploszai, Luís Buchir, ao meu sobrinho Antônio Augusto, entre outros.

Ao professor Dimas Agostinho da Silva e Fernando do Laboratório de Energia de Biomassa (LEB) do Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal da UFPR;

À prefeitura municipal de Pato Branco em nome de Clodomir Ascari;

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR, à prefeitura do Centro Politécnico da UFPR; ao prof. Carlos Yamamoto do LACAUT;

Ao PPGERHA e a todos os professores e colegas;

À UTFPR-Câmpus Pato Branco, professores e colegas;

À Fundação Araucária;

Quero agradecer também aos percalços que encontrei no caminho, aos bichos peçonhentos (cobras, aranhas, etc.) e outros insetos, pois me mostraram e ensinaram a ter mais atenção a tudo, inclusive indicando alternativas de busca. Percebi que estas alternativas de busca e todas as cobranças e críticas, foram bem vindas. Percebi, como lição de vida que, por mais intensa que elas fossem, a “árvore” ficou em pé. As folhas caíram, sobrou apenas os galhos e o cerne. No entanto, por sorte, em volta do cerne, restou uma parcela da casca ainda intacta, de onde percolou a seiva (ou o sangue). Assim que terminou o “vento”, as “intempéries” e o “frio”, as folhas começaram a brotar, as flores começaram a se abrir e, aquilo que parecia estar acabado, reviveu. Os galhos pareciam estar secos, mas estavam apenas dormentes. O que parecia estar morto? O que havia sido cortado e aranhado? Foi apenas a superfície. O interior, o cerne, que foi o mais forte, era e continua denso e vivo, pois existia muito mais do que aquilo que aparecia na superfície.

Também quero agradecer ao Que criou: a madeira dura, a madeira macia, a madeira curva, a fibra para fabricar um cordão, as leis da física, do atrito, da termoquímica e da termodinâmica. Sem isto, não seria possível que o homem primitivo fabricasse os apetrechos para iniciar as primeiras centelhas e descobrir como iniciar o fogo, que provavelmente deu origem ao desenvolvimento da tecnologia e de melhorias de qualidade de vida ao homem. Por mais que a técnica de iniciar o fogo tenha se alterado e sua importância tenha se diluído com o tempo, sem ele não haveria possibilidade em realizar este trabalho.

Enfim, ao Que criou o sangue, a seiva, a vida, o fogo e as leis da natureza, é ao Que mais eu agradeço: ao Poder Superior.

Muitas vezes não importa o preço, o valor ou o custo.

A situação mais crítica poderá se dar pela falta, pela carência ou pela extinção.

Quando algo está se extinguindo ou prestes a faltar, é neste momento que se dá o devido valor, não importando se o preço ou os custos sejam elevados.

RESUMO

Com a finalidade de reduzir os impactos ambientais na geração de energia térmica e reduzir os impactos ambientais provocados pela disposição inadequada de biomassa residual, evitando que se destinasse a lixões ou que se deixasse no campo para decomposição, foi elaborado estudo com metodologia apropriada para enfrentar este problema. Sendo assim, esta tese foi dividida em três etapas: a primeira trata do gerenciamento da biomassa residual proveniente de plantios florestais a partir de levantamentos no estado do Paraná e da poda urbana tendo como estudo de caso a cidade de Pato Branco, onde espécies de *Ligustrum lucidum*, *Schinus molle*, *Schinus terebinthifolius*, *Tipuana tipu*, *Lagerstroemia indica*, *Cassia fistula*, *L.*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus sp.*, *Eucalyptus sp.*, foram as matérias-primas estudadas. A segunda, trata da viabilização técnica e ambiental empregando fornalha de fluxo cocorrente para a queima da biomassa, com monitoramento de temperaturas e análise de gases formados durante a combustão e os procedimentos operacionais para utilizá-las como substitutos à lenha convencional. A terceira, com estudo de viabilidade socioeconômica e desenvolvimento de metodologia para sua conversão termelétrica.

Foi desenvolvidas técnicas para o armazenamento dos resíduos das diferentes espécies de árvores após o corte, transporte e secagem, com a obtenção de gradientes de secagem das leiras, bem como as curvas características da perda de umidade envolvendo cada tipo de resíduo estudado em suas variadas formas de disposição, umidade e compactação. Foram realizados ensaios com fornalha de fluxo cocorrente, atingindo temperaturas acima de 1.150 °C, com emissões de CO, NO_x, SO₂ e H₂S, abaixo dos limites permitidos pela Resolução SEMA de 2014.

As avaliações socioeconômicas e comercialização dos produtos finais, ficaram vinculadas à utilização da energia e melhorias no sistema de coleta da biomassa (galhos e folhas) após o corte, transporte e a devida importância de inseri-la no mercado. Mostrou resultados de potencial impacto na economia setorial e social, onde envolveu um estudo de viabilidade técnica e econômica para a instalação de usina termelétrica com o aproveitamento do calor gerado pela combustão da biomassa residual.

Palavras-chave: Poda. Resíduos de poda. Resíduos de plantios florestais. Biomassa residual. Fornalha cocorrente. Cogeração. Alternativa energética.

ABSTRACT

With the aim of both reducing the environmental impact of thermic energy generation and inadequate residual biomass discard, thus avoiding its deposit in landfills or in wasteland for decomposition, this study was carried out with appropriate methodology to approach this problem. In this way, this doctoral thesis is divided into three sections: the first one deals with the management of both the residual biomass coming from forest planting and from urban trees pruning in the State of Paraná. For this purpose, a case study from the city of Pato Branco was utilized, in which the species of *Ligustrum lucidum*, *Schinus molle*, *Schinus terebinthifolius*, *Tipuana tipu*, *Lagerstroemia indica*, *Cassia fistula*, *L.*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus sp.*, *Eucalyptus sp.* were selected as study raw-material. The second part of this research presents its technical and environmental feasibility, by making use of a counter-current flow furnace for burning biomass, with monitoring of temperature and the analysis of gases formed during combustion and operational procedures in order to use them as replacement for conventional firewood. The third section of this work brings both a study of the economic viability and methodology development for its thermoelectric conversion.

Techniques were developed for different species trees residue storage after cutting, transport and drying, with the attainment of drying gradients of rows, as well as characteristic curves of humidity loss, by involving each type of residue studied in its various forms of placement, humidity and compression. Assays with a downdraft flow wood burning furnace were carried out, reaching temperatures above 1.150 °C, with emissions of CO, NO_x, SO₂ and H₂S, below the legal limits set by SEMA Resolution of 2014.

The final products socio-economic assessments and commercialization were dependent on the use of energy and the improvement of the biomass collection system (branches and leaves) after cutting, transport and the relevance of its introduction to the market. Results were obtained of a potential impact in the sectorial and social economy, which included a technical and economic feasibility study for the installation of a thermoelectric plant, with the use of heat generated by residual biomass combustion.

Key-words: Pruning. Pruning residue. Forest planting residue. Biomass. Residual biomass. Downdraft furnace. Cogeneration. Energetic alternative energy source.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- ATERRO PARA DEPÓSITO DOS RESÍDUOS DE PODA URBANA NA CIDADE DE PATO BRANCO.....	38
FIGURA 2	- FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTOS ENTRE A COLETA E O DESTINO FINAL DA PODA NA CIDADE DE PATO BRANCO.....	39
FIGURA 3	- AGREGAÇÃO DE VALORES QUANTO À DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS DE PODA.....	51
FIGURA 4	- ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE DÉFICIT OU DISPONIBILIDADE DE ÁREA DE PLANTIO DE <i>Eucalyptus sp.</i> PARA LENHA NO ESTADO DO PARANÁ.....	53
FIGURA 5	- LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS PONTOS DE PRODUÇÃO DE TORAS DE PINUS PARA SERRARIA (SAFRA 2009).....	54
FIGURA 6	- LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS PONTOS DE PRODUÇÃO DE TORAS DE PINUS PARA LAMINAÇÃO (SAFRA 2009).....	54
FIGURA 7	- LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS PONTOS DE PRODUÇÃO DE TORAS PARA CELULOSE E PAPEL (SAFRA 2009).....	55
FIGURA 8	- LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS PONTOS DE PRODUÇÃO DE TORAS PARA LENHA (SAFRA 2009).....	55
FIGURA 9	- MECANISMOS DA COMBUSTÃO DA BIOMASSA, ENVOLVENDO A FORMAÇÃO DE CINZAS.....	59
FIGURA 10	- PERFIS TERMOGRAVIMÉTRICOS DA SERRAGEM E SEUS TRÊS COMPONENTES NA TAXA DE AQUECIMENTO DE 15 °C/min.....	60
FIGURA 11	- FORNALHA DE FLUXO COCORRENTE INSTALADA NO LEIS.....	63
FIGURA 12	- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE TROCADOR DE CALOR COM GERAÇÃO TERMELÉTRICA.....	64
FIGURA 13	- DIAGRAMA DE TEMPERATURA–ENTROPIA PARA O VAPOR DA ÁGUA.....	65
FIGURA 14	- DETALHES DA INSTALAÇÃO DE UMA TURBINA A VAPOR.....	67
FIGURA 15	- DETALHAMENTO DOS PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA A CONVERSÃO DA BIOMASSA RESIDUAL.....	73
FIGURA 16	- MAPA DOS PLANTIOS FLORESTAIS NO PARANÁ.....	76

FIGURA 17	- IDENTIFICAÇÃO DO CORTE DE <i>Eucalyptus sp.</i> PARA A INDÚSTRIA DE CELULOSE, LAMINAÇÃO, SERRARIA OU GERAÇÃO DE ENERGIA.....	77
FIGURA 18	- FLUXOGRAMA MAIS USUAL DE PROCEDIMENTOS NO DESBASTE DE ÁRVORES DESTINADAS À INDÚSTRIA.....	78
FIGURA 19	- A PODA DE <i>Ligustrum lucidum</i> NA CIDADE DE PATO BRANCO....	79
FIGURA 20	- RELAÇÃO PERCENTUAL DE ESPÉCIES DE ÁRVORES URBANAS MAIS ENCONTRADAS NA CIDADE DE PATO BRANCO.....	80
FIGURA 21	- MEDIÇÃO DA ALTURA DE ÁRVORES COM A UTILIZAÇÃO DE CLINÔMETRO.....	82
FIGURA 22	- RECIPIENTES PARA ACONDICIONAR AMOSTRAS PARA SECAGEM NO LABORATÓRIO: (a) BALDE E (b) TONEL.....	90
FIGURA 23	- DIMENSÕES DA LEIRA DE CAVACO DEPOSITADO NO PÁTIO DA UNIVERSIDADE.....	91
FIGURA 24	- SIMULAÇÃO DA PERDA DE UMIDADE NA LEIRA, TENDO COMO MODELO OS RECIPIENTES DAS AMOSTRAS.....	92
FIGURA 25	- COLETA DE AMOSTRAS DE CAVACO DE PODA NA LEIRA.....	93
FIGURA 26	- DIMENSÕES DAS CAVIDADES REALIZADAS NAS LEIRAS PARA RETIRADA DE AMOSTRAS.....	94
FIGURA 27	- DIMENSÕES DA FORNALHA – VISTAS LATERAL E SUPERIOR..	95
FIGURA 28	- DEMONSTRAÇÃO DAS FASES DE COMBUSTÃO DA BIOMASSA E ESCAPE DOS GASES NA FORNALHA.....	95
FIGURA 29	- RAIOS DE SUPRIMENTO REGIONAL E DOS PRINCIPAIS PRODUTORES DE PLANTIOS FLORESTAIS NO ESTADO DO PARANÁ.....	112
FIGURA 30	- TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE GALHOS COM FOLHAS DO <i>Ligustrum lucidum</i> ARMAZENADAS EM ABRIGO.....	116
FIGURA 31	- TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE FARDOS DE GALHOS E FOLHAS DO <i>Ligustrum lucidum</i>	117
FIGURA 32	- TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE EM AMOSTRAS DE CAVACO DEIXADAS EM RECIPIENTES DENTRO DO LABORATÓRIO AO ABRIGO.....	118

FIGURA 33	- TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE GALHOS, CASCAS E FOLHAS DA <i>Schinus molle</i> DEPOSITADAS AO ABRIGO.....	119
FIGURA 34	- TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE EM AMOSTRAS DE FOLHAS DE <i>Schinus molle</i> DEIXADAS EM RECIPIENTES AO ABRIGO.....	120
FIGURA 35	- TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE COMPARTIMENTOS DE <i>Eucalyptus sp.</i> , (GALHOS, FOLHAS, CASCAS E SEMENTES)....	121
FIGURA 36	- TAXAS DE SECAGEM DE GALHOS, FOLHAS E CASCAS DO <i>Pinus sp.</i> DEPOSITADAS AO ABRIGO.....	122
FIGURA 37	- TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE GALHOS DE <i>Schinus terebinthifolius</i>	122
FIGURA 38	- TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE GALHOS DO <i>Cupressus sempervirens</i> EM COMPARAÇÃO COM OS DE <i>Ligustrum lucidum</i>	123
FIGURA 39	- FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DE PROCEDIMENTOS PARA OS RESÍDUOS DA PODA URBANA E DE PLANTIOS FLORESTAIS.....	135
FIGURA 40	- MAPA DE PROCEDIMENTOS PROPOSTO PARA O GERENCIAMENTO DA PODA DE ÁRVORES URBANAS E PLANTIOS FLORESTAIS.....	136
FIGURA 41	- TEMPERATURAS NA PRIMEIRA CORRIDA PARA LENHA E CAVACO.....	139
FIGURA 42	- TEMPERATURAS NA PRIMEIRA CORRIDA PARA O CAVACO....	139
FIGURA 43	- TEMPERATURAS NA SEGUNDA CORRIDA PARA O CAVACO....	140
FIGURA 44	- TEMPERATURAS NA SEGUNDA CORRIDA PARA FOLHAS.....	141
FIGURA 45	- TEMPERATURAS NA TERCEIRA CORRIDA PARA LENHA E CAVACO.....	142
FIGURA 46	- CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA, COM O CAVACO A 25 kg/h.....	144

FIGURA 47	- CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA, COM CAVACO A 17 kg/h.....	146
FIGURA 48	- CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA, COM FOLHAS A 9 kg/h.....	147
FIGURA 49	- CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA, COM CAVACO A 17 kg/h.....	149
FIGURA 50	- CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA, COM CAVACO A 17 kg/h.....	150
FIGURA 51	- CONCENTRAÇÃO DE O ₂ , CO ₂ E NA SAÍDA DA CÂMARA DE COMBUSTÃO LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA.....	151
FIGURA 52	- CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO ₂ , NO ₂ , NO, C _x H _x , H ₂ S, NO _x , EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA.....	152
FIGURA 53	- CONCENTRAÇÃO DE O ₂ E CO ₂ EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS T2 DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA PARA O CAVACO.....	152
FIGURA 54	- CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO ₂ , NO ₂ , NO, C _x H _x , H ₂ S, NO _x , EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS T2 DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA COM O CAVACO.....	153
FIGURA 55	- CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA PARA O CAVACO.....	154
FIGURA 56	- CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA.....	155

FIGURA 57	- CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO ₂ , NO ₂ , NO, C _x H _x , H ₂ S, NO _x , EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA COM O CAVACO.....	155
FIGURA 58	- CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO ₂ , NO ₂ , NO, C _x H _x , H ₂ S, NO _x EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA COM O CAVACO.....	156
FIGURA 59	- CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO ₂ , NO ₂ , NO, C _x H _x , H ₂ S, NO _x EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA COM FOLHAS.....	156
FIGURA 60	- CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO ₂ , NO ₂ , NO, C _x H _x , H ₂ S, NO _x EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA TERCEIRA CORRIDA COM O CAVACO.....	157
FIGURA 61	- VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL) DO ORÇAMENTO 2 COM RELAÇÃO À TAXA DE DESCONTO.....	165
FIGURA 62	- FLUXO DE CAIXA DESCAPITALIZADO ACUMULADO PARA O ORÇAMENTO 2 EM RELAÇÃO AOS 240 MESES.....	165
FIGURA 63	- VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL) DO ORÇAMENTO COM RELAÇÃO À TAXA DE DESCONTO.....	172
FIGURA A1	- MEDIÇÃO DOS DIÂMETROS DOS GALHOS E TRONCOS PARA QUANTIFICAR A BIOMASSA EM CADA INDIVÍDUO.....	193
FIGURA A2	- MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DOS GALHOS E DA LARGURA DA COPA.....	193
FIGURA A3	- PESAGEM DE AMOSTRAS APÓS O CORTE E APÓS A SECAGEM.....	194
FIGURA A4	- DENSÍMETRO PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO CAVACO.....	194
FIGURA A5	- AMOSTRA DE FOLHAS E FLORES DE DIVERSAS ESPÉCIES DE ÁRVORES PARA SECAGEM TOTAL NA ESTUFA.....	195
FIGURA A6	- CALORÍMETRO UTILIZADO PARA AVALIAR O POTENCIAL CALORÍFICO DAS AMOSTRAS.....	195
FIGURA A7	- PESAGEM DE AMOSTRAS EM BALANÇA DE PRECISÃO.....	196
FIGURA A8	- CARBONO FIXO DAS AMOSTRAS APÓS A QUEIMA NO FORNO	196

FIGURA A9 - AMOSTRAS APÓS QUEIMA NO FORNO PARA DETERMINAR O CARBONO FIXO.....	197
FIGURA A10 - CINZAS REMANESCENTES DAS AMOSTRAS APÓS A QUEIMA NO FORNO.....	197
FIGURA A11 - TORQUÍMETRO ACOPLADO À ELETROSSERRA PARA REALIZAR OS TESTES DE RESISTÊNCIA AO CORTE DAS AMOSTRAS.....	198
FIGURA A12 - LOCAL DE SECAGEM E PESAGEM DE GALHOS DE <i>Ligustrum lucidum</i>	198
FIGURA A13 - FARDOS DE <i>Ligustrum lucidum</i> APÓS O CORTE E PESAGEM.....	199
FIGURA A14 - TRITURADOR PARA TRANSFORMAR OS GALHOS E FOLHAS EM CAVACO.....	199
FIGURA A15 - LEIRAS DE DEPÓSITO DE CAVACO E COLETA DE AMOSTRAS PARA ESTUDO.....	200
FIGURA A16 - RECIPIENTES COM CAVACO PARA SECAGEM NATURAL À SOMBRA.....	200
FIGURA A17 - COLETA DE AMOSTRAS DE CAVACO DA PARTE EXTERNA E INTERNA DA LEIRA PARA DETERMINAR O TEOR DE UMIDADE.....	201
FIGURA A18 - LEIRA DE CAVACO INDICANDO A CAMADA EXTERNA DA LEIRA EXPOSTA AO SOL, CHUVA E VENTOS, ÚMIDA, E SEU INTERIOR, SECO.....	201
FIGURA A19 - CAÇAMBAS PARA SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE CAVACOS PARA A FORNALHA.....	202
FIGURA A20 - IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS TERMOPARES NA FORNALHA.....	203
FIGURA A21 - ANALISADOR DE GASES UTILIZADO NAS CORRIDAS DA FORNALHA.....	203
FIGURA A22 - FLUXO DE CALOR NA CHAMINÉ (VISTA SUPERIOR).....	219
FIGURA A23 - FLUXO DE CALOR NAS PAREDES DA FORNALHA (VISTA SUPERIOR).....	219
FIGURA A24 - PAREDE LATERAL DA CÂMARA DE COMBUSTÃO.....	223
FIGURA A25 - TAMPA SUPERIOR DA CÂMARA DE COMBUSTÃO.....	225

FIGURA A26 - BASE DA CÂMARA DE COMBUSTÃO.....	226
FIGURA A27 - PAREDE LATERAL DA ZONA DE PIRÓLISE.....	228
FIGURA A28 - BASE DA ZONA DE PIRÓLISE.....	229
FIGURA A29 - FLUXO DE CALOR EM SISTEMAS CILÍNDRICOS.....	230
FIGURA A30 - CORTE TRANSVERSAL DA CHAMINÉ.....	231

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- DETALHES SOBRE RESÍDUOS DE PODA URBANA EM ALGUMAS CIDADES BRASILEIRAS.....	39
TABELA 2	- ANÁLISE ELEMENTAR PARA DIVERSAS FONTES ENERGÉTICAS DE BIOMASSA.....	44
TABELA 3	- ANÁLISE ELEMENTAR PARA O <i>Eucalyptus grandis</i> , <i>M. Scabrella</i> E <i>A. Mearnsii</i>	45
TABELA 4	- PROPRIEDADES DO <i>Eucalyptus urophylla</i> E <i>Eucalyptus grandis</i> .	45
TABELA 5	- COMPOSIÇÃO QUÍMICA ESTRUTURAL PERCENTUAL PARA AS FRAÇÕES DA BIOMASSA DE UMA ÁRVORE.....	46
TABELA 6	- COMPOSIÇÃO QUÍMICA ESTRUTURAL PERCENTUAL DE BIOMASSAS PARA ENERGIA.....	46
TABELA 7	- RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MADEIRAS (Mpa).....	47
TABELA 8	- PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE CINCO PROCEDÊNCIAS DE <i>Pinus caribaea</i> DE 23 ANOS DE IDADE (Mpa).....	47
TABELA 9	- CONSUMO BRASILEIRO DE MADEIRA EM TORAS PARA USO INDUSTRIAL EM 2011 (m ³).....	52
TABELA 10	- CONSUMO PARANAENSE DE PRODUTOS FLORESTAIS PARA USO INDUSTRIAL EM 2012.....	52
TABELA 11	- ENTALPIA DE COMBUSTÃO (ΔH) A 25 °C DE ALGUMAS SUBSTÂNCIAS ENCONTRADAS NA BIOMASSA.....	58
TABELA 12	- RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA, TEMPERATURA E PRESSÃO NAS TURBINAS A VAPOR.....	66
TABELA 13	- ÁREA TOTAL DE PLANTIOS DE <i>Pinus sp.</i> E <i>Eucalyptus sp.</i> NO ESTADO DO PARANÁ NO ANO DE 2013.....	76
TABELA 14	- MATRIZ DE PLANEJAMENTO PARA OS TESTES, INDICANDO AS VARIÁVEIS E SEUS NÍVEIS.....	98
TABELA 15	- MATRIZ DE PLANEJAMENTO PARA OS TESTES, INDICANDO OS FATORES E NÍVEIS COM SUAS VARIÁVEIS.....	99
TABELA 16	- VARIÁVEIS RESPOSTA.....	99

TABELA 17	- ESPECIFICAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA LOCALIZAÇÃO DOS TERMOPARES.....	101
TABELA 18	- INDÚSTRIAS QUE UTILIZAM CALOR EM SEUS PROCESSOS INDUSTRIAIS À TEMPERATURAS ENTRE 260 A 1.100 °C.....	108
TABELA 19	- PRODUÇÃO DE <i>Pinus sp.</i> PARA SERRARIAS EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA.....	113
TABELA 20	- PRODUÇÃO DE <i>Pinus sp.</i> PARA LAMINAÇÃO EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA.....	113
TABELA 21	- PRODUÇÃO DE <i>Pinus sp.</i> PARA CELULOSE E PAPEL EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA.....	114
TABELA 22	- QUANTIFICAÇÃO DE MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA EM RELAÇÃO À PRODUÇÃO DE TORAS PARA LENHA.....	114
TABELA 23	- NÚMERO DE INDIVÍDUOS DE CADA ESPÉCIE ESTUDADA NOS LOGRADOUROS PÚBLICOS DE PATO BRANCO EM RELAÇÃO AO TOTAL DE 45.470 INDIVÍDUOS.....	115
TABELA 24	- TAXA TOTAL DE DECRÉSCIMO DE UMIDADE EM RELAÇÃO À BASE SECA DAS AMOSTRAS DE <i>Ligustrum lucidum</i>	116
TABELA 25	- TAXAS DE DECRÉSCIMO DE UMIDADE EM RELAÇÃO À BASE SECA DAS AMOSTRAS DE <i>Schinus molle</i>	119
TABELA 26	- UMIDADE REMANESCENTE DE AMOSTRAS DE LEIRAS DEIXADAS AO TEMPO.....	124
TABELA 27	- DIFERENÇAS NO TEMPO DE CORTE ENTRE AMOSTRAS DE <i>Ligustrum lucidum</i> SECA E VERDE.....	125
TABELA 28	- DENSIDADE APARENTE MÉDIA E GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS DE CAVACO.....	126
TABELA 29	- TEOR DE UMIDADE EM RELAÇÃO À BASE SECA E ÚMIDA DO <i>Ligustrum lucidum</i>	126

TABELA 30	- MÉDIA DAS MASSAS DAS AMOSTRAS COM AS RESPECTIVAS UMIDADES.....	126
TABELA 31	- PODER CALORÍFICO MÉDIO E RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS IMEDIATAS DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.....	127
TABELA 32	- RELAÇÃO PERCENTUAL ENTRE GALHOS, CASCAS E FOLHAS DAS AMOSTRAS DE BIOMASSA RESIDUAL DE <i>Ligustrum lucidum</i> E <i>Schinus molle</i>	128
TABELA 33	- PODER CALORÍFICO UNITÁRIO DA MÉDIA PONDERADA DAS AMOSTRAS ESTUDADAS.....	128
TABELA 34	- PODER CALORÍFICO E DENSIDADE DO <i>Eucalyptus sp.</i> E <i>Pinus sp.</i>	129
TABELA 35	- ENERGIA QUE PODERIA SER GERADA COM A COMBUSTÃO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE PLANTIOS FLORESTAIS NO BRASIL.....	129
TABELA 36	- ENERGIA QUE PODERIA SER GERADA COM A COMBUSTÃO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE <i>Eucalyptus sp.</i> E <i>Pinus sp.</i> NO PARANÁ.....	130
TABELA 37	- ENERGIA TOTAL QUE PODERIA SER GERADA COM A COMBUSTÃO DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DE PLANTIOS FLORESTAIS NO PARANÁ.....	130
TABELA 38	- QUANTIFICAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE <i>Pinus sp.</i> PARA SERRARIAS, EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA.....	131
TABELA 39	- QUANTIFICAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE <i>Pinus sp.</i> PARA LAMINAÇÃO, EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA.....	132
TABELA 40	- QUANTIFICAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE <i>Pinus sp.</i> PARA CELULOSE E PAPEL, EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA.....	133

TABELA 41	- QUANTIFICAÇÃO TOTAL DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE <i>Pinus sp.</i> PARA SERRARIA, LAMINAÇÃO E CELULOSE E PAPEL, EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA.....	133
TABELA 42	- QUANTIFICAÇÃO DA GERAÇÃO ANUAL DE RESÍDUOS DE PODA NOS LOGRADOUROS PÚBLICOS DE PATO BRANCO.....	134
TABELA 43	- TEMPERATURAS MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS ATINGIDAS NA PRIMEIRA CORRIDA (°C).....	138
TABELA 44	- TEMPERATURAS MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS ATINGIDAS NA SEGUNDA CORRIDA (°C).....	140
TABELA 45	TEMPERATURAS MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS ATINGIDAS NA TERCEIRA CORRIDA (°C).....	141
TABELA 46	- VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE TEMPERATURAS E GASES NA PRIMEIRA CORRIDA, COM O CAVACO A 25 kg/h.....	143
TABELA 47	- VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE TEMPERATURAS E GASES NA SEGUNDA CORRIDA, COM O CAVACO A 25 kg/h.....	145
TABELA 48	- VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE TEMPERATURAS E GASES NA SEGUNDA CORRIDA PARA FOLHAS A 9 kg/h.....	147
TABELA 49	- VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE TEMPERATURAS E GASES NA TERCEIRA CORRIDA PARA O CAVACO.....	148
TABELA 50	- CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS DE CO, O ₂ , CO ₂ , SO ₂ , NO ₂ , NO, C _x H _x , H ₂ S, NO _x , ATINGIDAS NA PRIMEIRA CORRIDA.....	151
TABELA 51	- CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS DE CO, O ₂ , CO ₂ , SO ₂ , NO ₂ , NO, C _x H _x , H ₂ S, NO _x , ATINGIDAS NA SEGUNDA CORRIDA.....	154

TABELA 52	- CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS DE CO, O ₂ , CO ₂ , SO ₂ , NO ₂ , NO, C _x H _x , H ₂ S, NO _x , ATINGIDAS NA TERCEIRA CORRIDA.....	157
TABELA 53	- BALANÇO DE MASSA E RENDIMENTO DA FORNALHA.....	158
TABELA 54	- DADOS QUANTITATIVOS E DE CUSTOS PARA A INSTALAÇÃO DO TRITURADOR.....	159
TABELA 55	- DADOS DE QUANTITATIVOS PARA A INSTALAÇÃO DA FORNALHA COCORRENTE E GERADOR DE VAPOR.....	161
TABELA 56	- DADOS QUANTITATIVOS PARA A INSTALAÇÃO DA TURBINA A VAPOR.....	161
TABELA 57	- RESULTADOS DO ESTUDO DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE INDÚSTRIA COM TRITURAÇÃO DE RESÍDUOS E GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA..	162
TABELA 58	- AVALIAÇÃO DE RETORNO, RISCOS E LIMITES DE ELASTICIDADE PARA OS ORÇAMENTOS 1, 2 E 3.....	163
TABELA 59	- VALORES LIMITE ENTRE OS ORÇAMENTOS 1, 2 E 3 PARA DIVERSOS INDICADORES.....	164
TABELA 60	- RESULTADOS DO ESTUDO DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE INDÚSTRIA COM TRITURAÇÃO DE RESÍDUOS E GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E TERMELÉTRICA.....	173
TABELA 61	- AVALIAÇÃO DE RETORNO, RISCOS E LIMITES DE ELASTICIDADE PARA O ORÇAMENTO 2.....	174
TABELA 62	- VALORES LIMITE ENTRE OS ORÇAMENTOS PARA DIVERSOS INDICADORES.....	174
TABELA A1	- FICHA DE CAMPO PARA QUANTIFICAR OS RESÍDUOS DE PODA URBANA.....	187
TABELA A2	- FICHA DE CAMPO COM DETALHAMENTO DE CADA INDIVÍDUO PARA QUANTIFICAR OS RESÍDUOS DE PODA URBANA.....	187
TABELA A3	- ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA MASSA SECA DE BIOMASSA EM t/ha.....	191
TABELA A4	- CÁLCULO ESTEQUIOMÉTRICO DOS GASES DA COMBUSTÃO.	206

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1	- CARACTERÍSTICAS DE TECNOLOGIAS PARA PIRÓLISE DA BIOMASSA.....	59
QUADRO 2	- INDÚSTRIAS NORTEAMERICANAS QUE UTILIZAM CALOR EM SEUS PROCESSOS INDUSTRIAIS À TEMPERATURAS ENTRE 260 A 1.100 °C.....	62
QUADRO 3	- DIFERENCIAÇÃO ENTRE COGERAÇÃO TRADICIONAL E COGERAÇÃO MODERNA.....	70
QUADRO 4	- EQUAÇÕES DA UMIDADE MÉDIA.....	84
QUADRO 5	- EQUAÇÕES DO PODER CALORÍFICO.....	85
QUADRO 6	- EQUAÇÕES DO TEOR DE VOLÁTEIS, CINZAS DE CARBONO FIXO.....	87
QUADRO 7	- EQUAÇÕES DA COMBUSTÃO.....	102
QUADRO 8	- EQUAÇÕES DO BALANÇO DE MASSA.....	103
QUADRO 9	- EQUAÇÕES DA ENERGIA NA COMBUSTÃO.....	103
QUADRO 10	- EQUAÇÕES DE ENERGIA, VAZÕES MÁSSICAS E ENTALPIAS..	104
QUADRO 11	- DADOS RELEVANTES PARA A INSTALAÇÃO DA FORNALHA COCORRENTE E DO GERADOR DE VAPOR.....	109
QUADRO 12	- DADOS RELEVANTES PARA INSTALAÇÃO DE TURBINA A VAPOR.....	110
QUADRO 13	- MOTIVOS QUE OCORRERAM OS PICOS DE TEMPERATURA NO ENSAIO.....	143
QUADRO 14	- DADOS DE CUSTOS PARA A INSTALAÇÃO DO TRITURADOR..	160
QUADRO 15	- CUSTOS DE CADA ORÇAMENTO PARA O TRITURADOR.....	166
QUADRO 16	- CUSTOS PARA OPERAÇÃO DO GERADOR DE VAPOR.....	167
QUADRO 17	- CUSTOS PARA OPERAÇÃO DA TURBINA SEM CONSIDERAR O GASTO COM CAVACO.....	168
QUADRO 18	- CUSTOS PARA OPERAÇÃO DA TURBINA CONSIDERANDO A COMPRA DE CAVACO.....	169
QUADRO 19	- CUSTOS PARA OPERAÇÃO DO TRITURADOR, GERADOR DE VAPOR E TURBINA.....	170

QUADRO A1 - DADOS DAS TAXAS DE DECRÉSCIMO DA UMIDADE NAS AMOSTRAS DE <i>Ligustrum lucidum</i> (LIGUSTRO).....	188
QUADRO A2 - DADOS DAS TAXAS DE DECRÉSCIMO DA UMIDADE NAS AMOSTRAS ENFARDADAS DE GALHOS COM CASCA, FOLHAS E SEMENTES DE <i>Ligustrum lucidum</i> (LIGUSTRO).....	188
QUADRO A3 - DADOS DAS TAXAS DE DECRÉSCIMO DA UMIDADE NAS AMOSTRAS DE <i>Schinus molle</i> (AROEIRA PERIQUITA).....	189
QUADRO A4 - DADOS DAS TAXAS DE DECRÉSCIMO DA UMIDADE NAS AMOSTRAS DE <i>Eucalyptus sp.</i> (EUCALIPTO).....	189
QUADRO A5 - DADOS DAS TAXAS DE DECRÉSCIMO DA UMIDADE NAS AMOSTRAS DE <i>Pinus sp.</i> (PINUS).....	190
QUADRO A6 - DADOS DAS TAXAS DE DECRÉSCIMO DA UMIDADE NAS AMOSTRAS DO FARDO DE <i>Cupressus sempervirens</i> (CIPRESTE).	191
QUADRO A7 - RESULTADOS DOS CÁLCULOS DA ESTIMATIVA FUTURA DE BIOMASSA.....	192
QUADRO A8 - VARIAÇÃO DE ENTALPIA DOS GASES DE COMBUSTÃO.....	216
QUADRO A9 - PADRÕES PARA FONTES <u>NOVAS</u> DE COMBUSTÃO EXTERNA.	233
QUADRO A10 - PADRÕES PARA FONTES <u>EXISTENTES</u> DE COMBUSTÃO EXTERNA.....	233
QUADRO A11 - PADRÕES PARA FONTES NOVAS E EXISTENTES DE COMBUSTÃO <u>NÃO EXTERNA</u>	234

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRAF	-	Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas
ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
atm	-	atmosfera
bs	-	base seca
bu	-	base úmida
C	-	carbono
°C	-	grau Celsius
CHP	-	<i>Combined Heat and Power</i>
cm	-	centímetro
CO	-	monóxido de carbono
CO ₂	-	dióxido de carbono
COFINS	-	Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social
COPEL	-	Companhia Paranaense de Energia Elétrica
CSLL	-	Contribuição Social sobre o Lucro Líquido
DAP	-	Diâmetro na Altura do Peito
dm ³	-	decímetro cúbico
D _{OA}	-	Distância do Observador à Árvore
ΔE	-	variação de energia interna
EJ	-	exajoule
EPE	-	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	-	Estados Unidos da América
FC	-	Fluxo de Caixa
g	-	grama
GV's	-	Geradores de Vapor
H	-	hidrogênio
H ₂ S	-	ácido sulfídrico
ha	-	hectare
IBC	-	Índice Benefício-Custo
IPP	-	<i>Independent Power Producer</i>
IR	-	Imposto de Renda
ISS	-	Imposto Sobre Serviços

J	-	Joule
kcal	-	quilocaloria
kg	-	quilograma
kJ	-	quilojoule
kpa	-	quilopascal
LEIS	-	Laboratório de Eficiência Exergética na Indústria da Soja
m	-	metro
m	-	massa
m/s	-	metro por segundo
m ²	-	metro quadrado
m ³	-	metro cúbico
MJ	-	megajoule
mm	-	milímetro
mm/h	-	milímetro por hora (precipitação)
MME	-	Ministério de Minas e Energia
Mpa	-	megapascal
MW	-	megawatt
N	-	nitrogênio
Nm	-	newton metro
NO	-	óxido nítrico
NO ₂	-	dióxido de nitrogênio
NUG	-	<i>Non-Utility Generator</i>
O	-	oxigênio
PCI	-	Poder Calorífico Inferior
PCI _{Pcte}	-	Poder Calorífico Inferior em Pressão Constante
PCS _{Pcte}	-	Poder Calorífico Superior em Pressão Constante
PCS _s	-	Poder Calorífico Superior em Base Seca (KJ/kg)
PCS _u	-	Poder Calorífico Superior em Base Úmida (KJ/kg)
PCS _{Vcte}	-	Poder Calorífico Superior em Volume Constante
PCU	-	Poder Calorífico Útil
PIS	-	Programas de Integração Social
PJ	-	petajoule
ppm	-	parte por milhão

PSF	-	Ponto de Saturação das Fibras
ROIA	-	Retorno sobre o Investimento Adicionado
rpm	-	rotações por minuto
S	-	enxofre
SEMA	-	Secretaria de Estado do Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Paraná
SO ₂	-	dióxido de enxofre
t	-	tonelada
T _c	-	teor de cinzas
T _{cf}	-	teor de carbono fixo
TIR	-	Taxa Interna de Retorno
TJ	-	terajoule
TMA	-	Taxa Mínima de Atratividade
T _v	-	teor de voláteis
TWh	-	tera watt-hora
UFPR	-	Universidade Federal do Paraná
UTFPR	-	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
VAL	-	Valor Anual Líquido
VPL	-	Valor Presente Líquido
VPLA	-	Valor Presente Líquido Anualizado
w _o	-	conteúdo de umidade da biomassa (kg água/kg de biomassa)
\bar{W}_s	-	umidade média em base seca
\bar{W}_u	-	umidade média em base úmida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	31
1.1	JUSTIFICATIVA.....	33
1.2	HIPÓTESES.....	35
1.3	OBJETIVOS.....	35
1.3.1	Objetivo Geral.....	35
1.3.2	Objetivos Específicos.....	35
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	37
2.1	PODA DE ÁRVORES E COLETA DOS RESÍDUOS.....	37
2.2	BIOMASSA E SUAS PROPRIEDADES.....	40
2.3	DENDROMETRIA.....	47
2.3.1	Atributos qualitativos das árvores.....	47
2.4	PANORAMA MUNDIAL SOBRE O GERENCIAMENTO E UTILIZAÇÃO DE BIOMASSA RESIDUAL PROVENIENTE DE PLANTIOS FLORESTAIS E DA PODA.....	49
2.5	PANORAMA BRASILEIRO SOBRE A DISPONIBILIDADE DE BIOMASSA GERADO PELA INDÚSTRIA MADEIREIRA.....	51
2.6	A BIOMASSA COMO FONTE DE GERAÇÃO DE ENERGIA E USOS DIVERSOS.....	56
2.6.1	Reações químicas na biomassa.....	57
2.6.2	Transformação da biomassa em energia.....	60
2.7	FORNALHAS, GERADORES DE VAPOR E TURBINAS TÉRMICAS.....	62
2.8	ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA GERAÇÃO TERMELÉTRICA.....	67
2.8.1	Disponibilidade de energia.....	68
2.8.2	Energia distribuída para produtores independentes.....	69
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	72
3.1	QUANTIFICAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE BIOMASSA.....	75
3.1.1	Quantificação dos resíduos de plantios florestais de <i>Pinus sp.</i> e <i>Eucalyptus sp.</i>	75
3.1.2	Quantificação e qualificação dos resíduos da poda urbana gerados na cidade de Pato Branco.....	78
3.2	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA BIOMASSA.....	83

3.2.1	Determinação das propriedades físicas da biomassa.....	83
3.2.2	Determinação das propriedades químicas da biomassa.....	86
3.2.3	Determinação das propriedades mecânicas: cisalhamento da madeira.....	87
3.3	MONITORAMENTO DA SECAGEM NATURAL DA BIOMASSA.....	88
3.3.1	Preparação das amostras de galhos para monitorar sua secagem.....	89
3.3.2	Monitoramento da secagem de cavacos.....	91
3.4	AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA COMBUSTÃO EM FORNALHA DE FLUXO COCORRENTE.....	94
3.5	TESTES DE QUEIMA (CORRIDAS).....	96
3.5.1	Rotina de corrida.....	96
3.5.2	Corrida experimental.....	97
3.5.3	Corridas definitivas.....	98
3.5.4	Matriz de planejamento.....	98
3.5.5	Preparo do combustível para as cinco corridas.....	99
3.5.6	Instrumentação para as corridas.....	100
3.5.7	Parâmetros que foram calculados nas corridas.....	102
3.5.8	Equações do balanço de energia.....	103
3.5.9	Condições de validação das corridas em ensaios/testes.....	105
3.6	ESTUDO DE VIABILIDADE PARA INSTALAÇÃO DE INDÚSTRIA PARA TRITURAR RESÍDUOS, PARA GERAÇÃO DE VAPOR E ENERGIA TERMELÉTRICA.....	106
4	RESULTADOS.....	111
4.1	PANORAMA DE DISPONIBILIDADE DE BIOMASSA PARA O ESTUDO.....	111
4.2	MONITORAMENTO DA SECAGEM NATURAL DA BIOMASSA.....	115
4.2.1	Resultados das taxas de variação da umidade de amostras de galhos em fardos.....	115
4.2.2	Resultados das avaliações das taxas de umidade na parte superficial e no interior da leira depositada no pátio.....	124
4.3	DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA BIOMASSA.....	125
4.3.1	Características qualitativas da biomassa.....	125
4.3.2	Quantificação dos resíduos de plantios florestais e da energia gerada com a queima.....	129
4.3.3	Quantificação dos resíduos de poda urbana e da energia a ser gerada com a queima.....	133

4.4	RESULTADOS DAS CORRIDAS NA FORNALHA.....	137
4.4.1	Temperaturas.....	138
4.4.2	Resultados nas emissões dos gases.....	143
4.4.3	Balanço de massa.....	158
4.5	RESULTADOS DO ESTUDO DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE INDÚSTRIA COM TRITURAÇÃO DE RESÍDUOS E GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ENERGIA TERMELÉTRICA.....	158
4.5.1	Estudo hipotético de caso para viabilizar a instalação de indústria com trituração de resíduos e geração de energia térmica e elétrica para o orçamento 2.....	170
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	175
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	179
	APÊNDICE 1.....	187
	APÊNDICE 2.....	193
	APÊNDICE 3.....	204
	ANEXO 1.....	205
	ANEXO 2.....	233

1 INTRODUÇÃO

A biomassa silvícola contracenava até há pouco tempo, em nível mundial, como um dos principais produtos para o suprimento de lenha para a indústria de modo geral. Mas, com o desmatamento descontrolado de áreas nativas, se tornou cada vez mais difícil explorar estes recursos em conformidade com as leis ambientais e exigências de sustentabilidade. Acentua Figueiredo (1995) que a eminente carência desses combustíveis e as indagações sobre a destruição do meio ambiente, fizeram com que as características da crise energética, se confundissem com as da crise ambiental.

Evidencia Blanco-Canqui (2012) que se no mundo houvessem incentivos ao plantio de árvores para fins energéticos, poderia haver o suprimento de grande parte da energia necessária às indústrias e, conforme relatos de Hoogwijk (2003), em variadas regiões do mundo se têm uma demanda de energia que poderia ser suprida pela biomassa, principalmente em regiões equatoriais e tropicais, onde a incidência solar é maior, como por exemplo, no Brasil. Conforme a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2015), esse panorama tende a crescer devido ao crescimento da parcela brasileira de utilização da biomassa de extração vegetal (lenha e bagaço de cana) para o setor industrial. Assim, se torna importante incentivar o plantio de florestas ou culturas energéticas nessas regiões e em terras inadequadas para as atividades agrícolas, onde, complementam Strandman, Kellomäki e Strandman (2012), também recuperaria grandes quantidades de CO₂ na atmosfera.

Rosillo-Calle, Bajay e Rothman (2008) dizem que há boas perspectivas de que, em muitos países do mundo, os derivados da biomassa possam ser produzidos para competir e substituir os combustíveis fósseis, pois, aborda Martin (1992) que o petróleo poderia acabar em no máximo 40 anos se não fossem encontradas novas jazidas, mesmo que, desde a década de 1970, se buscasse substituí-lo principalmente por alternativas energéticas provenientes de fontes renováveis.

Segundo Bermann (2001), no ano de 1999, o consumo total de biomassa no Brasil foi superior a 1,7 EJ (exajoules). De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2015), no ano de 2012 só em lenha foi utilizado aproximadamente 1,1 EJ para a produção de energia primária, correspondendo a 9,1% da oferta interna de energia. Para comparar, o consumo mundial de energia primária, de acordo com Fowler et al. (2009), gira em torno de 451 EJ/ano, correspondendo a seis vezes menos do que a energia que é armazenada em biomassa. De acordo com Kasmoui e Ceulemans (2013), em 2008 a biomassa forneceu cerca de 50 EJ, o que representou mais de 10% do consumo anual de energia primária global.

Por outro lado, Ataiades (2005) e CREA-PR (2004), preveem no Brasil o que chamam de “apagão florestal”, tendo em vista uma possível falta de madeira energética para os próximos 20 anos. No estado do Paraná, alguns autores como Gabrielli (2005), dizem que poderá faltar madeira por falta de árvores plantadas, apesar de que, para suprir esta demanda, Neto (2006) diz que para o ano de 2007 estavam previstos investimentos para aumentar a produção de biomassa. No entanto, enfatiza que estes recursos ainda eram insuficientes, mesmo que, em 2011 nesse Estado, de acordo com levantamentos da ABRAF (2013), a distribuição da área de plantio de eucalipto e pinus representou 13,0% em relação ao cenário nacional e foi responsável pela exportação brasileira de 54,8% do volume total de madeira serrada (163,3 mil m³), liderando o ranking de áreas plantadas de pinus com 40,1% do total, seguido por Santa Catarina, com 32,8%.

Mesmo assim, Sánchez (2010) afirma que esse panorama deverá estacionar enquanto não surgirem novas tecnologias e investimentos para modificar o contexto. Soares et al. (2003) propõem uma alternativa de melhorar a valorização e remuneração da madeira plantada, para o que chamam de otimização de povoamentos florestais em multiprodutos, onde há a divisão em madeira para serraria, madeira para celulose e madeira para energia.

Citam Meira (2010), Trink et al. (2010) e Tahvanainen e Anttila (2011) que a valorização dos resíduos da biomassa é considerada para algumas indústrias como uma alternativa econômica, social e ambientalmente adequada, sendo parte integrante do gerenciamento apropriado desses materiais, primeiramente por reduzir os impactos devido à extração da matéria-prima para as atividades produtivas, por destinar menos áreas ao plantio de florestas energéticas e também por destinar mais adequadamente seus resíduos. Estes procedimentos fazem com que diminuam os volumes e massas destinadas a aterros, além de propiciar novos postos de trabalho e melhorar a imagem das empresas com relação à sua responsabilidade socioambiental. Esses resíduos também poderiam ser utilizados para gerar energia térmica e termelétrica e abastecer grande parte do parque fabril, diminuindo assim, a procura por lenha convencional que, em certas circunstâncias, são retiradas de matas não certificadas, com pouco controle dos danos ambientais que eventualmente a extração poderá causar.

Muito embora seja notório que poderiam servir de matéria-prima para geração de energia térmica, os resíduos de plantios florestais gerados pela indústria madeireira, frequentemente eram deixados no campo para decomposição e os de poda de árvores urbanas, até então, grande maioria era levada aos lixões ou aterros, contrastando com a busca por alternativas energéticas que foi uma das discussões pautadas no contexto ambiental. No Brasil,

de acordo com cálculos a partir de dados fornecidos pela Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF (2013), são gerados anualmente mais de 50 milhões de metros cúbicos de resíduos no desbaste dos *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.*, provenientes de árvores destinadas a madeireiras, fábricas de compensado, de aglomerado, fábricas de papel e celulose e artefatos de madeira. Detzel et al. (1998), Leal (2007) e Meira (2010) constataram que a poda de árvores no meio urbano não pode ser desprezada, pois gera uma grande quantidade de resíduos, principalmente pelo corte anual realizado pelos órgãos municipais.

1.1 JUSTIFICATIVA

Atualmente, devido à iminente escassez de lenha para abastecer o mercado industrial, conforme indicam estimativas realizadas por Gonçalves et al. (2012), foi preciso estabelecer critérios mais adequados à utilização de biomassa que se têm disponíveis, o que, segundo Searcy et al. (2007), sua falta tem levado ao distanciamento cada vez maior dos pontos de produção aos centros de consumo, os quais chegam até a ultrapassar distâncias de mais de mil quilômetros, o que encarecia ainda mais o produto final. Assim, para suprir o fornecimento de energia térmica para grande parte do parque fabril, os combustíveis hoje empregados, ou tem custos elevados ou causam impactos indesejáveis ao meio ambiente ou são cada vez mais escassos. Bejan, Vadász e Kröger (1999) complementam que a utilização de diferentes opções de concepção e análise, com o emprego de métodos e critérios, principalmente no contexto das otimizações termodinâmicas e tecnicoeconômicas, podem alterar de forma significativa os processos de combustão e o custo final do energético. Martin et al. (2006) recomendam estudos e testes efetivos para avaliação da eficiência, operação e durabilidade do sistema e alternativas para queima destes combustíveis que hoje são pouco exploradas.

Conforme Brito e Barichello (1979), no Brasil, na década de 1970, havia carência de dados sobre volume e condições do uso da madeira para gerar energia. Nesta época, faltavam pesquisas e levantamentos sobre o uso da madeira como combustível para fins domésticos e industriais. Esse fato dificultava a execução de planos específicos para a utilização dessas fontes de energia, bem como o emprego de tecnologias mais adequadas para transformar resíduos de plantios florestais e de poda urbana em energia. Rodrigues (1983) menciona um estudo do Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF), que, no Paraná e em Santa Catarina no início da década de 1980, apenas 30 a 35% da madeira destinada para serraria era transformada em matéria-prima. Descreve Graça (1992), que em torno de 65 a 70% do volume eram perdidos na forma de costaneiras, serragem, casca, ramos e folhas. Dos resíduos ali

gerados, em torno de 41%, eram passíveis de serem aproveitados energeticamente pelas indústrias madeireiras da época, correspondendo a 37% das necessidades próprias de combustíveis. Ainda na mesma década, de acordo com Menezes e Schneider (1988), as perdas totais no corte do fuste para o *Eucalyptus grandis*, chegavam a mais de 36% e as perdas de ponta a quase 35%. No primeiro lustro da década de 1990, essa perda variava entre 40 e 60%, complementa Ipiranga (1996). Não obstante, passados mais de trinta anos, a situação continua parecida, pois, de acordo com Dercan et al. (2012), ainda existe ineficiência nos processos de desdobro da madeira, chegando a no máximo 38% de aproveitamento.

Na região Oeste do estado do Paraná, grande parte dos municípios geram resíduos de poda urbana e biomassa residual gerada pela extração dos plantios florestais na indústria madeireira, mas por outro lado, nesta região desde o início da década de 2010, está sendo discutido o déficit de lenha para o setor industrial e para a secagem de grãos.

No município de Pato Branco - PR, onde foi realizado o estudo piloto, com população de mais de 77.000 habitantes (IBGE, 2015) e 16,22 km² de área urbana, resultados obtidos pelo estudo revelou que são gerados no período dos seis meses mais intensos de poda, mais de duas mil toneladas de biomassa residual provenientes da poda de mais de oito mil árvores que estão situadas em vias públicas.

Em cidades circunvizinhas, utilizando o pinus e o eucalipto, existe uma grande quantidade de madeireiras, fábricas de compensado, de aglomerado, pasta de celulose e artefatos diversos de madeira que geram grandes quantidades de biomassa residual.

Foi evidenciado neste trabalho da possibilidade em aproveitar estes resíduos, com a minimização de impactos ambientais devido à queima mais eficiente em fornalha de fluxo cocorrente e redução de volumes para sua disponibilização em aterros. Evidenciou-se também a possibilidade em agregar mais valor aos produtos se o calor da combustão fosse direcionado para a geração de vapor e energia termelétrica para a indústria. Ou então, com o envolvimento da própria indústria, de cooperativas, de associações ou outras organizações sociais, fomentar pequenas iniciativas para cogeração ou geração descentralizada de energia. A partir de estudos de viabilidade econômica e resultados de investimentos, VPL (valor presente líquido), TIR (taxa interna de retorno) e retorno do investimento (*payback*), foram verificadas as possibilidades mais atrativas para o empreendimento.

1.2 HIPÓTESES

Esta Tese de Doutorado foi baseada nas seguintes hipóteses:

- i) foi possível criar metodologia para aproveitamento da biomassa residual de plantios florestais e da poda urbana, considerando os aspectos econômicos, energéticos e ambientalmente eficientes;
- ii) a utilização da fornalha de fluxo cocorrente foi a alternativa técnica, econômica e ambiental, para viabilizar a transformação desses resíduos em energia;
- iii) foi possível estabelecer métodos e ferramentas para identificar barreiras e encaminhar soluções de gerenciamento dessa biomassa residual.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver método para viabilizar solução técnica, econômica e ambiental na conversão de resíduos de plantios florestais e de poda urbana em energia térmica, a partir de um estudo teórico e experimental em laboratório e planta piloto, com levantamento qualitativo e quantitativo desses resíduos, bem como o estudo de sua combustão em fornalha de fluxo cocorrente.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) realizar levantamento e mapeamento espacial dos resíduos de plantios florestais no estado do Paraná e da poda urbana na cidade de Pato Branco, indicando fontes de fornecimento desta biomassa, abrangência e enquadramento no espaço temporal da sua disponibilidade, enumerando fatores limitantes e de sustentabilidade, quais sejam, técnicos, ambientais, operacionais, econômicos, legislativos e sociais;
- b) aprimorar técnicas de recolhimento, disposição, secagem, transporte e logística de manuseio dos resíduos, deixando-os apropriados para serem utilizados em fornalhas como substituto à lenha convencional;
- c) avaliar os potenciais energéticos da combustão a partir do poder calorífico das amostras dos compartimentos das espécies das árvores estudadas, (folhas, ramos, troncos, casca e, quando houver, sementes e flores);

- d) avaliar o comportamento e desempenho da fornalha de fluxo cocorrente, perante padrões da Resolução SEMA 16/2014, quanto às emissões de gases como o CO, CO₂, NO_x, H₂S, com o emprego de plano de experimentos, perante diferentes condições de alimentação e relações estequiométricas da biomassa, densidade aparente, compactação, granulometria, taxas de umidade, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e relação folhas/galhos;
- e) realizar estudo de viabilidade técnica e econômica de pequenas indústrias para triturar e comercializar estes resíduos e para instalar usina termelétrica com o aproveitamento do calor gerado na combustão da biomassa residual.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Brasil, de acordo com Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2015), pelo menos 2/3, de um total de 1,1 EJ da matéria-prima usada na obtenção de lenha, tem origem de matas nativas e áreas de cerrado. Complementa a Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF (2013), que para alimentar suas fornalhas e caldeiras para gerar calor ou vapor, as indústrias ainda queimam lenha proveniente de fornecedores clandestinos ou de partes não utilizáveis da madeira e de fragmentos que são gerados nas falhas de fabricação na indústria madeireira. Para minimizar este impacto, desde o final da década de 1980, Brito (1990) já se preocupava em investir em tecnologias mais racionais de manejo e exploração vegetal, bem como em técnicas mais avançadas para seu processamento e utilização, minimizando desta forma a emissão de poluentes e otimizando os recursos que dali eram extraídos.

2.1 PODA DE ÁRVORES E COLETA DOS RESÍDUOS

Podar uma árvore é, segundo Ferreira, (2013), desbastar ou aparar ramos de plantas; cortar as ramas inúteis das árvores. Nos logradouros municipais ela era realizada geralmente com objetivos de embelezamento e para minimizar a altura dos galhos, evitando que se encostassem aos fios, veículos ou transeuntes. Na região Sul do Brasil era realizada anualmente, geralmente nas estações frias, aproveitando a dormência das plantas causada pelo frio.

De acordo com Meira (2010), na arborização, a poda é realizada basicamente com quatro finalidades:

- a) de formação: ainda nos viveiros onde os ramos laterais são retirados até uma altura recomendada de 1,80 m;
- b) de limpeza ou embelezamento: eliminam-se os ramos antigos, danificados, em excesso, mortos, doentes ou com pragas;
- c) de contenção: realizada com a finalidade de adequar a copa da árvore ao espaço físico disponível, em função de um plantio inadequado, visando não prejudicar o trânsito de pedestres e veículos sob a copa;
- d) emergencial: se remove as partes da árvore que ameaçam a segurança da população, das edificações, redes aéreas de transmissão de energia elétrica e telefônica e outras instalações.

Observa-se que nas operações de poda e remoção da arborização urbana se gera uma grande quantidade de resíduos na forma de galhos, ramos, folhas, sementes, frutos, fustes e raízes. Na maioria dos municípios brasileiros, são destinados a aterros ou lixões que, além de comprometer o espaço disponível e reduzir sua vida útil, causam problemas ambientais devido a efluentes formados no processo de decomposição. Na cidade de Pato Branco, onde se focou parte do estudo, não era diferente. De modo geral, a maior parte também era destinada ao aterro, onde, conforme a FIGURA 1, observa-se particularidades dos resíduos ali depositados.

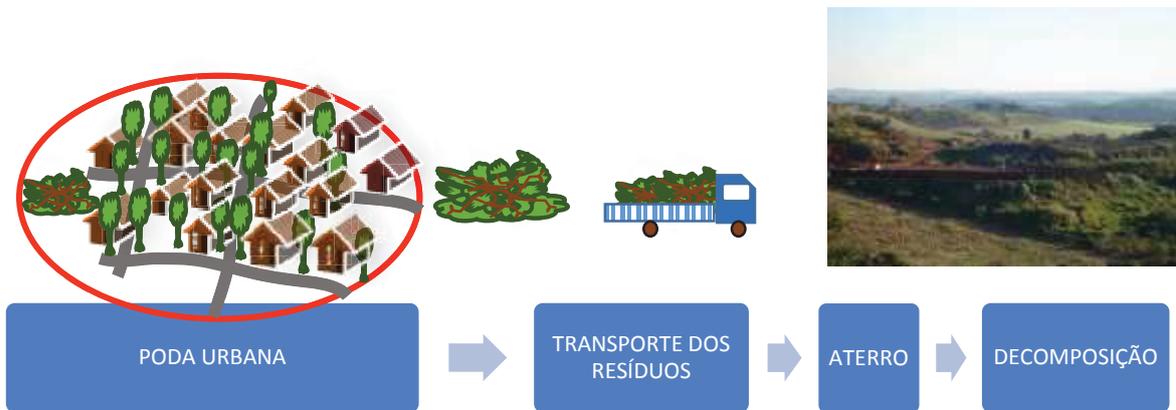
FIGURA 1 – ATERRO PARA DEPÓSITO DOS RESÍDUOS DE PODA URBANA NA CIDADE DE PATO BRANCO



FONTE: O autor (2011).

Nessa cidade, a poda era realizada de forma parcialmente mecanizada, com motosserras. Após o corte, separavam-se os galhos grossos, com diâmetros superiores a 100 milímetros, dos finos com diâmetros inferiores a 100 milímetros. Os galhos grossos eram deixados para secagem e posterior queima em fornalhas para aquecimento de água em uma piscina pública. Dos galhos finos, parte ia para o aterro e, em certas circunstâncias, como informa Palhano (2009), eram triturados e amontoados em leiras para compostagem e posterior utilização como adubo no plantio de mudas de árvores. A FIGURA 2 apresenta as etapas mais usuais de procedimentos realizados pela prefeitura municipal de Pato Branco para os resíduos da poda urbana até seu destino final.

FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTOS ENTRE A COLETA E O DESTINO FINAL DA PODA URBANA NA CIDADE DE PATO BRANCO



FONTE: O autor (2016).

Detzel et al. (1998) mencionam, conforme a TABELA 1, que numa cidade paranaense de 240 mil habitantes possui aproximadamente 63 mil árvores de rua, responsáveis por 13,6 m² de área verde por habitante, geralmente composta por espécies exóticas, complementam Biondi, Leal e Cobalchini (2007). Meira (2010) constatou em seu estudo que na cidade de Piracicaba, com 365 mil habitantes, em média são gerados mensalmente 181,35 toneladas de resíduos referente à poda de 1.250 árvores.

TABELA 1 – DETALHES SOBRE RESÍDUOS DE PODA URBANA EM ALGUMAS CIDADES BRASILEIRAS

Cidade	Resíduos de poda gerados por ano (t/ano)	Quantidade de árvores (considerada)	Número de habitantes (mil)	Custo do aterro (R\$/t)	Área verde por habitante (m ² /hab)	Custo dos serviços de poda, supressão e destoca
Brasília ¹	15.300		2.481			
Paulínia ¹	7.420		97	68,00		
Piracicaba ¹	2180	1.250	365	67,15		R\$ 1,5 milhões (7,6% do custo total do aterro)
São Paulo ¹	29.730		11.320			
Eletropaulo 24 municípios ¹	Julho a dezembro 13.700	130 mil				
Maringá ²		63 mil	240		13,6	
Curitiba ³		500 mil				R\$183,50/árvore podada/ano

FONTES: ¹ MEIRA (2010)

² DETZEL ET AL. (1998)

³ LEAL (2007)

Estudos de Leal (2007) mencionam que os custos médios das operações de poda realizadas pela Prefeitura Municipal de Curitiba, para árvores de pequeno, médio e grande portes foram de US\$ 15,82, US\$ 48,13 e US\$ 84,64 respectivamente. Mas, além destes custos,

deve-se considerar outros indiretos, como por exemplo o custo do aterro para depositar os resíduos da poda, que de acordo com Meira (2010), chegam a R\$ 68,00 por tonelada. Com a soma, complementa a autora, os custos acumulados de cada árvore, poderá variar em média de US\$ 200,00 para as de um ano e de US\$ 32.000,00 para as de 50 anos.

Quanto ao corte de árvores destinadas às indústrias madeireiras, o desbaste dos troncos era realizado na própria mata, local de onde se retiravam os fustes que seriam beneficiados industrialmente. Entre uma indústria e outra, existem muitas diferenças de processos para o desbaste, geralmente realizado manualmente, com motosserras e machados, apesar de já existirem equipamentos apropriados que retiram os galhos de forma mecanizada.

Estimativas realizadas pelo autor indicam que o Brasil tem potencial para gerar anualmente mais de 30 milhões de toneladas de resíduos de poda de árvores urbanas, sem contar com os resíduos de plantios florestais de pinus e eucaliptos gerados pelas madeireiras, fábricas de compensado, de aglomerado, de pasta de celulose e artefatos diversos de madeira. Para comparação, Oliveira et al. (2013) levantaram que no Brasil, cerca de 11,4 milhões de toneladas de resíduos de café e eucalipto são gerados por ano. Complementam os autores que, se fossem utilizados para a conversão energética, teriam potencial para gerar um total de 201,3 PJ. Em ordem de grandeza, os resíduos de poda, na estimativa da produção anual brasileira, gerariam quase três vezes mais energia, em torno de 600 PJ.

2.2 BIOMASSA E SUAS PROPRIEDADES

A biomassa é, segundo Loo e Koppejan (2010), todo tipo de material que direta ou indiretamente é derivado de reações de fotossíntese, como matéria vegetal e seus derivados. Em se tratando de árvores, de acordo com Batista, Couto e Silva (2014), o conceito de biomassa deve ser entendido como a massa seca da planta, classificando-a em aéreas e subterrâneas. Os autores dividem-na em biomassa lenhosa, biomassa de ramos (finos) e biomassa foliar. A biomassa lenhosa, se refere à massa de conteúdo de madeira na árvore, que diz respeito à massa seca do lenho. As demais, dizem respeito aos ramos e às folhas, respectivamente.

Para fins energéticos, de acordo com Eichler et al. (2016), é de fundamental importância para os processos de transformação ou conversão da biomassa, que se faça sua caracterização com a determinação das propriedades físicas (densidade, granulometria, massa específica, teor de umidade e poder calorífico), das propriedades químicas, (análise imediata - teor de umidade, voláteis, cinzas, carbono fixo e a análise elementar - elementos químicos presentes na biomassa, análise somativa - teor de lignina, celulose e hemicelulose) e das

propriedades mecânicas (resistência à tração, compressão, torção, cisalhamento), como detalhado a seguir:

a) densidade

Conforme Nogueira, Oliveira e Fiedler (2007), é uma das principais características da biomassa, pois define a logística a ser utilizada para o transporte e o armazenamento. Define-se densidade como a razão entre a massa específica da biomassa pela massa específica da água na condição padrão (1.000 kg/m³ a 25°C e 100 kPa).

Os sólidos com densidade menores que 500 kg/m³, como por exemplo, a serragem, a turfa, o coque e o cavaco, são classificados como leves.

b) granulometria

Para Sánchez (2010), a granulometria é importante para dimensionar a alimentação no processo de combustão, em que materiais particulados influenciam significativamente nestas propriedades, além de que, o tamanho e formato de partícula é um pré-requisito fundamental para muitas operações de produção e processamento de cavaco.

Para partículas com formato irregular, como por exemplo o cavaco, se emprega o conceito de tamanho equivalente, determinado por uma propriedade que depende do tamanho da partícula, relacionando-a com uma dimensão linear. A forma de uma partícula pode ser expressa pela esfericidade, que mede o afastamento da forma esférica, conforme a equação (1.1), ou seja:

$$\phi = \frac{\text{área superficial da esfera de igual volume que a partícula } (S_e)}{\text{área superficial da partícula } (S_p)} = \frac{\pi d_p^2}{S_p} \quad (1.1)$$

A esfericidade varia de zero a um. Por exemplo, uma partícula esférica tem esfericidade igual a um e uma partícula cilíndrica com diâmetro igual à altura, é igual a 0,778. Se $H = 5 d$, a esfericidade é igual a 0,621. Segundo a Norma NBR 7402 de julho de 1982, as partículas menores, que variam de um micra até 0,5 milímetros, são chamadas de pós, de 0,5 a 10 milímetros, sólidos granulares, blocos pequenos de um a cinco centímetros, blocos médios de cinco a 15 centímetros e blocos grandes, maiores que 15 centímetros.

c) poder calorífico

O poder calorífico de acordo com Kuo (2005) é a quantidade de energia por unidade de massa ou de volume, para os gases, liberada na oxidação de um determinado combustível. Considera-se o poder calorífico superior (P.C.S.) e poder calorífico inferior (P.C.I.). O poder calorífico superior é a variação de energia interna E , com sinal oposto, por unidade de massa

do combustível, ou seja, é a quantidade de calor produzida pela queima completa da unidade de massa de um combustível sólido ou líquido em volume constante, determinada dentro de uma bomba calorimétrica contendo oxigênio nas seguintes condições: pressão inicial do oxigênio de 20 a 40 atm, temperatura final de 20 a 35 °C, produtos na forma de cinzas, umidade presente no combustível e água condensada resultante da combustão, SO₂, CO₂ e N₂ gasosos.

d) teor de umidade

A madeira é um material higroscópico e mantém relações dinâmicas com a umidade do ambiente. Em função da sua umidade e da umidade relativa do ar, ela pode ceder ou reter água ao meio. De acordo com Mellado (2007), o processo de secagem está diretamente envolvido com a movimentação de umidade na madeira.

Na árvore, por sua vez, segundo Oliveira, Hellmeister e Tomazello (2005), ocorrem processos de crescimento e desenvolvimento que estão relacionados ao movimento de água transportada das raízes às folhas e à energia produzida pela fotossíntese.

Existem três tipos de água na madeira: a água livre ou de capilaridade, a água de adesão ou de impregnação e a água de constituição [*e.g.*, Aguilar, Song e Shifley (2011)]. A maior parte da água livre, de acordo com Chen et al. (2012), é perdida após o abatimento da árvore por evaporação. Em seguida, mais lentamente, a água de adesão será eliminada até que a madeira atinja o equilíbrio entre a sua umidade e as condições externas de umidade relativa do ar, temperatura e convecção do ar. Este ponto, em que a madeira não perde nem retém água do ambiente, é denominado umidade de equilíbrio da madeira.

A água livre ou de capilaridade, de acordo com Fowler et al. (2009), é a que ocupa as cavidades das células e espaços intercelulares, incluindo também vasos e canais resiníferos, retida por fracas ligações capilares. O movimento que ali ocorre é o da umidade acima do ponto de saturação das fibras, PSF, sob a ação de forças capilares, baseado na lei de Hagen-Poiseuille, onde, conforme Dercan et al. (2012), move-se no estado líquido através das cavidades celulares presentes na madeira do interior para a superfície. A saber, o PSF refere-se a um ponto de umidade que normalmente varia de 25% a 35% e a água se aloja nas paredes das fibras.

Segundo Santos, Jankowsky e Andrade (2003), o deslocamento da umidade ocorre geralmente de zonas de alta concentração de água para as de baixa concentração, tanto no sentido longitudinal, quanto transversal das fibras, sempre buscando o menor caminho para sair e variando com a existência de gradientes de umidade e condições externas de temperatura, umidade relativa e circulação do ar. Como a umidade externa geralmente é menor que a interna, isto proporciona que se desloque da parte interior do lenho para a parte exterior, criando uma atração capilar da água livre nas cavidades celulares. É o processo de secagem, propriamente

dito que é o balanço dinâmico entre a transferência de calor do ar para a superfície da madeira e a transferência de umidade da superfície da madeira para a corrente de ar. Os autores dividem a secagem da madeira em três estágios distintos, caracterizados pela variação em sua taxa.

Para Rosillo-Calle, Bajay e Rothman (2008), a secagem da biomassa é afetada por fatores internos, como espécie da planta, componentes anatômicos da madeira, proporção de cerne e alborno, densidade, permeabilidade, umidade inicial, tamanho de peças ou cavacos. Quanto aos fatores externos, são relacionados ao ambiente de secagem, como temperatura ambiente, umidade relativa do ar, velocidade e direção dos ventos predominantes, velocidade de circulação do ar, precipitações, localização do pátio de secagem, superfície exposta, modo de empilhamento da madeira, distância entre o solo e a madeira, inclinação do terreno, presença de vegetação ou barreiras e drenagem do local. Segundo Mellado, (2007) a movimentação da umidade longitudinal é de 10 a 15 vezes mais rápida do que a transversal.

Klitzke (2007) afirma que, de acordo com a temperatura, a secagem pode ser realizada das seguintes formas: secagem natural ou ao ar livre que ocorre à temperatura ambiente; secagem a baixas temperaturas em câmaras com variação de temperatura entre 30 a 50 °C; secagem convencional, que ocorre na faixa de 50 a 100 °C e; secagem a altas temperaturas, que ocorre de 100 a 180 °C.

De modo geral, a importância da secagem da biomassa resume-se a alguns pontos, citados por Jäppinen, Korpinene e Ranta (2012), e complementados por Gracia, Velázquez-Martí e Estornellc (2014), como:

- promove a redução do peso, reduzindo os custos de transporte e mão-de-obra com o seu manuseio, laboração, beneficiamento, entre outros;
- a menor umidade da biomassa reflete em aumento do poder calorífico para utilização em fornalhas, com redução do tempo de combustão e de perdas de rendimento gravimétrico, conseqüentemente, quantidades menores de lenha a ser consumida;
- o teor de umidade interfere na energia consumida pelas máquinas para realizar a laboração como o corte e processamento da madeira.

Complementam Yoshioka et al. (2006), que a umidade também interfere na densidade, onde não está por si só associada à qualidade energética para uso em fornalhas, mas também à quantidade de água livre presente em seu interior que, não precisaria ser transportada desnecessariamente por longas distâncias ou ao longo do percurso. Além da umidade, Sánchez (2010) indica outros fatores a serem considerados, que interferem na secagem e no poder calorífico, como por exemplo, a estrutura anatômica, composição química e higroscopia.

e) análise química imediata

A determinação da análise química imediata quantifica os teores de umidade, voláteis e carbono fixo e teor de cinzas presentes na biomassa. Segundo Nogueira e Rendeiro (2008), o Brasil ainda não possuía normas para a realização desta análise em biomassa vegetal.

Segundo McKendry (2002) o teor de voláteis é a parte da biomassa que evapora como por aquecimento. É quantificado medindo a fração de massa da biomassa que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra padronizada e previamente seca, em atmosfera inerte, até temperaturas de aproximadamente 850 °C. Ainda para Klautau (2008), o material volátil interfere na ignição, pois quanto maior o teor de voláteis maior será a reatividade e consequentemente a ignição.

O teor de carbono fixo representa a massa restante após a liberação de compostos voláteis, excluindo as cinzas e teores de umidade [e. g. MCKENDRY, (2002)].

As cinzas, que são formadas a partir da combustão da biomassa, são elementos metálicos já presentes no combustível, de argila, areia e sais que possam estar na biomassa e ainda por solos misturados à biomassa durante sua colheita ou manuseio. A quantidade de cinzas está diretamente relacionada com a quantidade e qualidade de minerais presentes na biomassa como, por exemplo, o silício, potássio, sódio, enxofre, cálcio, fósforo, magnésio e ferro. Quando em alta concentração podem diminuir o poder calorífico e causar perda de energia. Provoca a redução nos teores de carbono fixado no carvão vegetal e afeta também na transferência de calor, sendo, portanto, recomendável sua remoção (e.g. KLAUTAU, 2008).

f) Análise elementar

Para realizar o balanço de energia e de massa da biomassa para fins energéticos, de acordo com Cuiping et al. (2004) é necessário realizar o levantamento de sua composição elementar que corresponde ao teor percentual em massa dos principais elementos que a constituem. Expressa principalmente os teores de carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O) e nitrogênio (N). Como exemplo, a TABELA 2 apresenta a composição elementar de diversas fontes de biomassa para energia.

TABELA 2 - ANÁLISE ELEMENTAR PARA DIVERSAS FONTES ENERGÉTICAS DE BIOMASSA

Biomassa	C (%)	O (%)	H (%)	N (%)	S (%)
Eucalipto (folhas)	50,15	39,64	7,45	0,5	0,02
Salgueiro (árvore)	46,79	40,60	7,10	0,77	0,30
Álamo (árvore)	47,46	44,50	6,74	0,17	0,10
Pinus (árvore)	49,41	42,19	7,67	0,10	0,05

FONTE: Adaptado de CUIPING ET AL. (2004).

Eloy (2015) elaborou estudo sobre o *Eucalyptus grandis*, a *M. scabrella* (bracatinga) e a *A. mearnsii* (acácia negra), chegando aos seguintes resultados médios, conforme TABELA 3:

TABELA 3 - ANÁLISE ELEMENTAR PARA O *Eucalyptus grandis*, *M. Scabrella* E *A. Mearnsii*

Componente químico Biomassa	C		H		N		O		S	
	Média	Desvio padrão								
Madeira	44,78	0,14	5,7	0,06	0,66	0,15	48,82	0,23	0,05	0,02
Casca	43,51	5,24	5,04	0,62	1,65	0,64	49,73	6,39	0,07	0,06
Galho	45,77	1,85	5,61	0,25	1,52	0,45	47,05	2,53	0,05	0,03
Folha	47,79	1,63	6	0,25	3	0,41	43,05	1,8	0,16	0,08

FONTE: Adaptado de ELOY (2015).

Em complemento, a TABELA 4 apresenta a média das propriedades da biomassa florestal de *Eucalyptus urophylla* e *Eucalyptus grandis* publicado por Eufrade (2015).

TABELA 4 - PROPRIEDADES DO *Eucalyptus urophylla* E *Eucalyptus grandis*

Propriedades	Compartimentos		
	Madeira com casca	Galhos	Folhas
Carbono (%)	44,3	44,7	49,1
Hidrogênio (%)	7,4	7,5	8,2
Oxigênio (%)	46,7	45,8	37,5
Nitrogênio (%)	0,4	0,4	2,0
Enxofre (%)	0,1	0,1	0,1
Umidade após colheita (%)	64,0	49,2	58,0
Cinzas (%)	1,1	1,5	3,1
Carbono fixo (%)	14,4	17,3	18,4
Material volátil (%)	84,5	81,2	78,5
Holocelulose (%)	81,5	68,4	34,9
Lignina Klason insolúvel (%)	21,6	20,7	20,2
Extrativos totais (%)	2,0	12,	37,9

FONTE: Adaptado de EUFRADE (2015).

Quanto à composição química estrutural da biomassa, que consiste principalmente na determinação dos teores de celulose, hemicelulose, lignina, extrativos e cinzas, Pereira (2012) indica que a biomassa em sua natureza tem grande complexidade química, com características lignocelulósicas. A celulose é composta por unidades de D-glicopiranoose, interligadas por ligações glicosídicas β 1-4 formando longas cadeias. As hemiceluloses são polímeros de várias unidades de açúcares diferentes que originam cadeias ramificadas. As ligninas são moléculas amorfas e complexas, formadas principalmente por unidades aromáticas de fenilpropano.

A energia da combustão varia consideravelmente com o conteúdo químico, onde ocorre significativa correlação entre o poder calorífico superior e os teores de extrativos e lignina na madeira.

Pereira (2012) exemplifica na TABELA 5 as diferenças da composição química estrutural dos componentes da biomassa de uma mesma árvore.

TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA ESTRUTURAL PERCENTUAL PARA AS FRAÇÕES DA BIOMASSA DE UMA ÁRVORE

	Celulose	Hemicelulose	Lignina	Extrativos	Cinzas
Madeira	40-60	15-30	20-35	1-10	> 1
Casca	20-40	20-30	20-30	5-30	2-15
Folhas	15-35	10-15	10-15	15-50	2-7

FONTE: Adaptado de PEREIRA (2012).

Apesar de que alguns dados se mostraram diferenciados em relação à TABELA 5, Demirbas (2001) cita na TABELA 6 que existem diferenças estruturais de diferentes materiais lignocelulósicos e apresenta os teores de celulose, hemicelulose e lignina para biomassa de madeira folhosa e de coníferas.

TABELA 6 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA ESTRUTURAL PERCENTUAL DE BIOMASSAS PARA ENERGIA

Biomassa	Celulose	Hemicelulose	Lignina total
Madeira de folhosas	32,3	45,9	21,9
Madeira de coníferas	24,8	42,7	32,5

FONTE: DEMIRBAS (2001).

g) propriedades mecânicas da madeira

A determinação das propriedades mecânicas da madeira tem importância na escolha de espécies de árvores que resistam a certas condições a que estarão submetidas, como por exemplo, esforços de tração, flexão, corte, colagem, entre outros.

As principais propriedades, cujos ensaios seguem a Norma da ABNT MB26/53 (NBR 6230/85), de acordo com Moraes et al. (2009) são:

- flexão estática (módulo de elasticidade);
- flexão estática (módulo de ruptura);
- cisalhamento paralelo às fibras;
- cisalhamento perpendicular às fibras;
- compressão paralela às fibras;

- compressão perpendicular às fibras.

Moraes (2009) e Calil et al. (2014), estudaram algumas espécies de pinus, eucalipto e outras madeiras e chegaram aos seguintes resultados, conforme as TABELAS 7 e 8.

TABELA 7 - RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO DE MADEIRAS (Mpa)

Espécie	Umidade	Resistência (Mpa)	
		12%	Saturada
Teca		3,7	2,3
Pinus		6,15;	3,8
Eucalipto		6,45	4,55

FONTE: CALIL ET AL. (2014).

TABELA 8 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA DE CINCO PROCEDÊNCIAS DE *Pinus caribaea* DE 23 ANOS DE IDADE (Mpa)

Flexão estática (módulo de elasticidade)		Flexão estática (módulo de ruptura)		Cisalhamento paralelo às fibras		Compressão paralela às fibras		Compressão perpendicular às fibras	
UMIDADE		UMIDADE		UMIDADE		UMIDADE		UMIDADE	
12%	SATURADA	12%	SATURADA	12%	SATURADA	12%	SATURADA	12%	SATURADA
7558	6861	68	45	9,5	4,9	32	16,5	5,5	2,9

FONTE: Adaptado de MORAES ET AL. (2009).

2. 3 DENDROMETRIA

A dendrometria, de acordo com Silva e Paula (1979), é um ramo das Ciências Florestais que determina ou estima quantitativamente os recursos florestais, indicando o volume, incremento e a produção de um determinado recurso florestal, realizando por fim, um inventário da biomassa. O termo é de origem grega, onde dendro significa árvore e metria, medida.

De acordo com Batista, Couto e Silva (2014), o inventário da biomassa não é tarefa trivial. Compreende dois tipos de amostragem: a destrutiva e a não destrutiva. Os autores citam alguns conceitos que foram utilizados no presente estudo:

2.3.1 Atributos qualitativos das árvores

De acordo com Batista, Couto e Silva (2014), o elemento que caracteriza as árvores é a formação de um ou mais caules eretos.

Considerando as medições como arborimetria não destrutiva, ou seja sem precisar abater a árvore, recomenda-se realizar as medições com métodos rápidos e operacionalmente práticos, quais sejam:

a) diâmetro na altura do peito (DAP)

Representa a dimensão do diâmetro a 1,3 metros da base da árvore. É o que determina o diâmetro da árvore. O diâmetro do tronco tem forte ligação com o tamanho da árvore como um todo, envolvendo ramos, folhas e até mesmo o sistema radicular. A medição pode ser realizada diretamente com suta ou compasso florestal ou indiretamente com fita métrica ou fita dendrométrica.

b) altura da árvore (h)

A altura da árvore é dividida em altura comercial, altura da base da copa e comprimento da copa.

A altura comercial em árvores excurrentes, é a altura até onde a árvore atinge o diâmetro mínimo para utilização comercial. Para árvores decurrentes, é a distância do solo até a base da primeira bifurcação.

A altura da base da copa (h_{cb}) é a medida da base da copa até o ápice, variando de nula para árvores que crescem sem competição, até alguns metros, para árvores nativas ou plantadas, onde a base é considerada até o primeiro ramo vivo.

O comprimento da copa é uma boa indicação do volume e da biomassa armazenada nos ramos. Representa a diferença entre a altura total e a altura da base da copa.

A altura pode ser medida de forma direta ou indireta. A direta consiste em utilizar réguas ou vara graduada em que permite medições de até 15 metros. A indireta é realizada com instrumentos que permitem a visada do topo e base da árvore e assim, realizar os procedimentos de cálculos necessários. Os instrumentos utilizados, genericamente são chamados de hipsômetros, dentre eles, a prancheta hipsométrica, o hipsômetro de Weise e os clinômetros.

c) copa da árvore

O comprimento da copa (l_c) representa a diferença entre a altura total (h) e a altura da base da copa da árvore (h_{cb}), ($l_c = h - h_{cb}$). É uma medida importante na determinação do volume e quantidade de biomassa. De acordo com Batista, Couto e Silva (2014) esse atributo é uma boa indicação silvicultural da árvore. De modo geral, o volume de madeira para a maioria das espécies, apresentam escala logarítmica com o comprimento da copa. Por exemplo, uma árvore com 10 metros de copa, fornece 280 dm³ de biomassa. Para 15 metros, 600 dm³.

d) diâmetro e área de projeção da copa

Geralmente, *ibid.*, existe uma relação quase que linear entre o DAP e o diâmetro da árvore, onde, para o DAP igual a 10 centímetros, o diâmetro da copa é igual a 2,5 metros. Para DAP igual a 15 centímetros, diâmetro igual a 3,5 metros e DAP de 20 centímetros, diâmetro igual a 4 metros.

e) volume e superfície da copa

O volume da copa é uma medida relacionada à estrutura lenhosa necessária para sustentar a superfície foliar. Com base no comprimento e diâmetro da copa, é possível determinar o volume e superfície da copa, segundo equações (2.7) e (2.8):

$$V_c = \left(\frac{1}{2r+1}\right) \left(\frac{\pi}{4}\right) d_c^2 l_c \quad (2.7)$$

$$S_c = \left(\frac{1}{r+1}\right) \left(\frac{\pi}{4}\right) d_c l_c \quad (2.8)$$

Onde:

- d_c : diâmetro da copa;
- l_c : comprimento da copa;
- r : variável que depende do sólido geométrico assumido.

f) relação hipsométrica

É a relação entre o DAP e a altura total. Alguns autores como Batista, Couto e Silva (2014) e Dorini (2015), encontraram relação do DAP com a altura total de algumas espécies de eucalipto e pinus de aproximadamente 1/100, ou seja, para cada um centímetro de DAP, equivale à 100 centímetros de altura da árvore. Segundo os autores, é um método de predição de quantidade de biomassa em árvores.

2.4 PANORAMA MUNDIAL SOBRE O GERENCIAMENTO E UTILIZAÇÃO DE BIOMASSA RESIDUAL PROVENIENTE DE PLANTIOS FLORESTAIS E DA PODA

Conforme dados levantados pelo estudo, o gerenciamento e utilização da biomassa residual é preocupação que envolve diversas regiões do mundo, principalmente aquelas onde a energia é mais escassa ou em vias de escassez ou também, onde a demanda de energia é muito elevada.

Citando alguns exemplos do emprego de biomassa para fins energéticos em nível mundial, começando pelos países asiáticos, de acordo com Chen et al. (2012), na China estão sendo realizadas avaliações quantitativas e análise de potencial de recursos de biomassa primária para a utilização da energia térmica. Yanli et al. (2010) estudam a produção de energia secundária a partir da biomassa. Na província de Hunan na China, Chen et al. (2012), estudam a estrutura de utilização de energia térmica de biomassa em residências rurais. No Paquistão, segundo Bhutto, Bazmi e Zahedi (2011), este enfoque ainda tem problemas, o que é encarado como um desafio a ser melhorado. Na Turquia, Kaygusuz e Tu (2002) também traçam um panorama do potencial de energia que poderá ser obtido a partir da biomassa e Yanik et al. (2013), fazem estudos da pirólise com microalgas marinhas para posterior aproveitamento energético. Já Gokcol (2009) consideram a biomassa como alternativa a outras fontes, com a geração regional de energia utilizando resíduos municipais e outros resíduos. Na Tailândia Wilaipon (2007) e Wilaipon (2009) fez estudos respectivamente com espiga de milho e casca de banana para briquetagem. No Japão, Oyama et al. (2009) estudaram a utilização de resíduos de indústrias madeireiras, poda de árvores e restos de construção na gaseificação em leito fluidizado para a geração de energia em pequena escala, até 100 kW, em turbinas a gás. Complementam os autores que estas fontes não são utilizadas de forma eficaz.

No sudeste Asiático, Carlos e Ba Khang (2008) realizaram projetos de caracterizações com biomassa para geração de energia e, sobre isso, Mekhilef et al. (2011) fez otimização de modelos futuros na Malásia.

Na Europa, Cosic, Stanic e Duic (2011) fazem, na Croácia, um estudo de caso com a distribuição geográfica do potencial econômico da biomassa residual agrícola e florestal para o uso de energia. Na Sérvia, Dodic (2010) aborda uma visão geral do emprego de energia da biomassa. Na Bélgica, Kasmoui e Ceulemans (2013) enumeram empecilhos e oportunidades para a utilização da bioenergia. Fazem ainda uma análise financeira do cultivo de culturas de curta rotação. Na Noruega, Strandman, Kellomäki e Strandman (2012) estudam os efeitos do manejo florestal na produção de biomassa total e as emissões de CO₂ provenientes da utilização da biomassa como energia. Na Hungria, Tyagi et al. (2012), avaliam o desempenho de modelos de fogões com base na energia e análise exérgica. No Reino Unido, Keirstead et al. (2012) avaliam estratégias de utilização da energia da biomassa para uma cidade eco sustentável. Na Eslováquia e na República Checa, Kanianska et al. (2011) fazem uso da contabilidade do fluxo de material para avaliação da economia de energia. Em Portugal e na Áustria, respectivamente, Fernandes e Costa (2010) e Trink et al. (2010), avaliam o potencial de resíduos de biomassa para produção de energia. Em Bohemia, na Alemanha, Brant et al. (2011) estudaram a produção

de energia de culturas em áreas com deficiência de precipitação durante o período de verão. Na Itália, Caresana et al. (2010) realizaram estudo técnico e econômico para a cogeração em micro turbinas a gás utilizando a biomassa.

Nos EUA, Aguilar, Song e Shifley (2011) consideram as tendências de consumo de biomassa lenhosa como matéria-prima energética. Para tanto, sugerem a inserção de políticas públicas para promover seu gerenciamento e obtenção.

Maccarini, Andrade e Hernández (2009) relatam que existem outros destinos aos resíduos de poda e para eles, propõem como exemplo, o modelo indicado na FIGURA 3, em que pode haver maior ou menor agregação de valor ao resíduo. Também enfatizam que, devido às questões ambientais e energéticas, se forem destinados a lixões, ocorre a desvalorização do produto, ou seja, causa maiores impactos do que benefícios.

FIGURA 3 - AGREGAÇÃO DE VALORES QUANTO À DESTINAÇÃO DOS RESÍDUOS DE PODA



FONTE: Adaptado de MACCARINI, ANDRADE e HERNÁNDEZ (2009).

2.5 PANORAMA BRASILEIRO SOBRE A DISPONIBILIDADE DE BIOMASSA GERADO PELA INDÚSTRIA MADEIREIRA

Com a análise e comparação dos levantamentos estimados por Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF (2013), TABELA 9, a indústria madeireira brasileira consome quase 110 milhões de metros cúbicos de toras entre os segmentos de celulose e papel, painéis e chapas de madeira industrializada (madeira laminada), madeira tratada e outras indústrias madeireiras e, mais de 179 milhões de metros cúbicos, incluindo carvão

vegetal (equivalente de madeira em tora), lenha e madeira em tora para energia, oriundas somente de plantios florestais. Entre as espécies de árvores mais plantadas, estão o eucalipto 59,8% e o pinus 40,0%.

TABELA 9 - CONSUMO BRASILEIRO DE MADEIRA EM TORAS PARA USO INDUSTRIAL EM 2011 (m³)

Segmento \ Espécie	Espécie			Total
	<i>Eucalyptus</i>	<i>Pinus</i>	Outros	
Papel e celulose	53.239.020	8.102.946	5.000	61.346.966
Painéis e chapas	4.658.345	7.751.980	108.250	12.518.575
Indústria madeireira	7.034.650	27.573.556	21.162	34.629.368
Subtotal	64.932.015	43.428.482	134.412	108.494.909
	59,8%	40,0%	0,2%	100%

FONTE: ABRAF (2013).

No estado do Paraná, a madeira derrubada durante os anos de 2008 e 2009 foi direcionada principalmente para as serrarias e para lenha, somando 69% do total, conforme a TABELA 10. Com a média ponderada, foi quantificada a biomassa residual da indústria madeireira (serraria, laminação e de papel e celulose) a partir de avaliações de sortimento estudados por Szymczak (2015) para o pinus e por Dorini (2015) para o *Eucalyptus sp.*, conforme a mesma TABELA.

TABELA 10 - CONSUMO PARANAENSE DE PRODUTOS FLORESTAIS PARA USO INDUSTRIAL EM 2012

Produto	Consumo (1.000 m ³)	Resíduos gerados (1.000 m ³)	Energia devido à combustão (TJ/ano)
Toras para serraria	11.148	2.064	16.366
Toras para laminação (chapas e painéis)	3.093	589	4.985
Toras para papel e celulose	5.746	1.293	14.745
Lenha industrial	1.437		

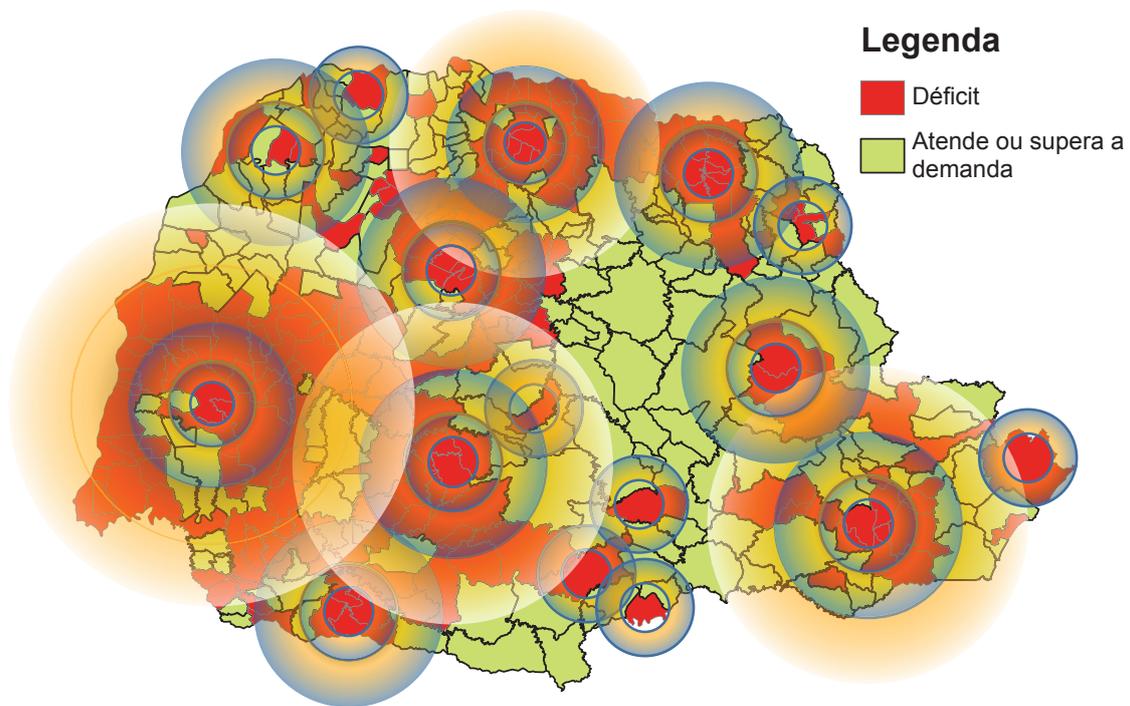
FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2012).

O estado do Paraná, apesar de se destacar no Brasil com maior representatividade do setor silvícola, enfrentava sérias dificuldades, em algumas regiões, no suprimento de biomassa principalmente para a secagem de grãos. A FIGURA 4 indica que mais da metade dos municípios paranaenses – 218 dos 399, apresentavam risco potencial de déficit ou indisponibilidade de biomassa para lenha, a qual se utiliza principalmente para secagem de grãos, em fábricas de cimento, indústrias de alimentos, panificadoras e indústrias em geral. Na FIGURA, as circunferências representam a abrangência média do déficit em até 60 quilômetros

de raio. Enfatizam Gonçalves et al. (2012) que as regiões Centro-Oeste e Norte do estado, grandes produtoras de grãos, são as que tinham o maior risco de apresentar falta de lenha.

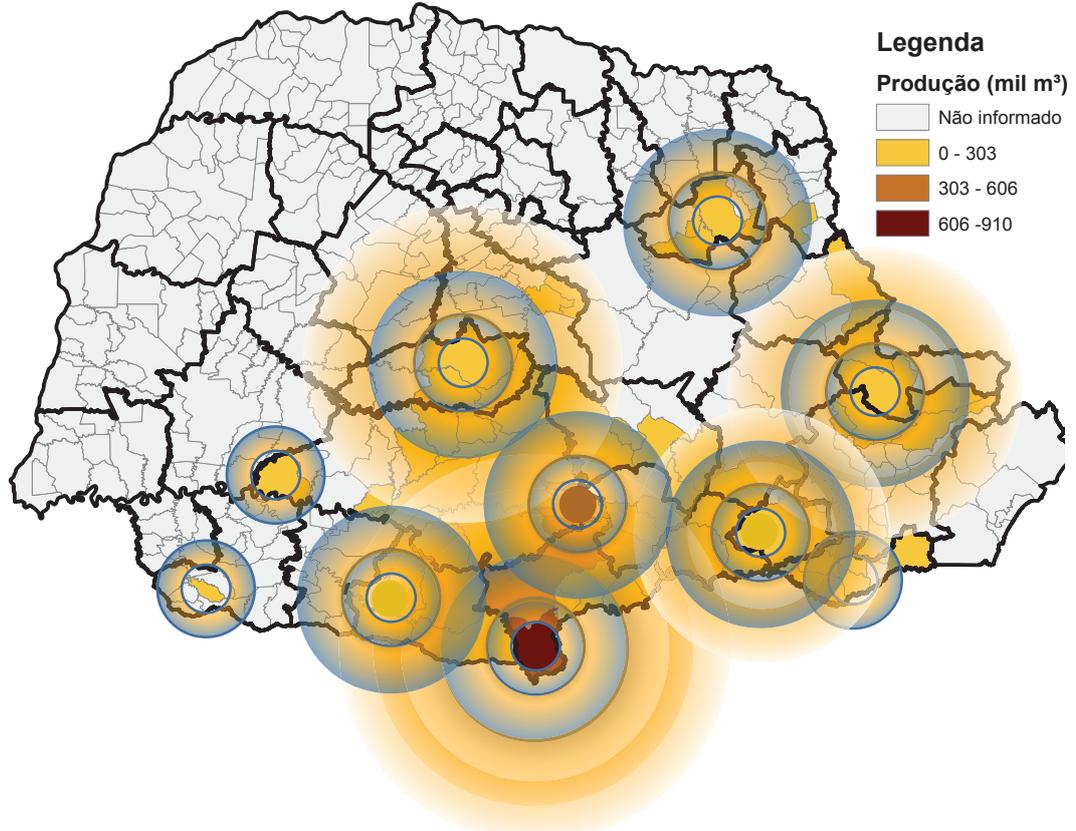
A partir da FIGURA 4, com estimativas de déficit ou disponibilidade de área de plantio de *Eucalyptus sp.* para ser utilizado como lenha no estado do Paraná, foram comparadas entre elas outras quatro situações do panorama atual de produção e consumo de madeira no estado, representadas pelas FIGURA 5, 6, 7 e 8, que indicam a quantidade de madeira destinadas para serrarias, laminação, celulose e papel e para lenha. A partir dali, foram mapeadas as regiões que têm risco de faltar lenha e com a sobreposição das regiões que poderão suprir com os resíduos de plantios florestais.

FIGURA 4 - ESTIMATIVA DO POTENCIAL DE DÉFICIT OU DISPONIBILIDADE DE ÁREA DE PLANTIO DE *Eucalyptus sp.* PARA LENHA NO ESTADO DO PARANÁ



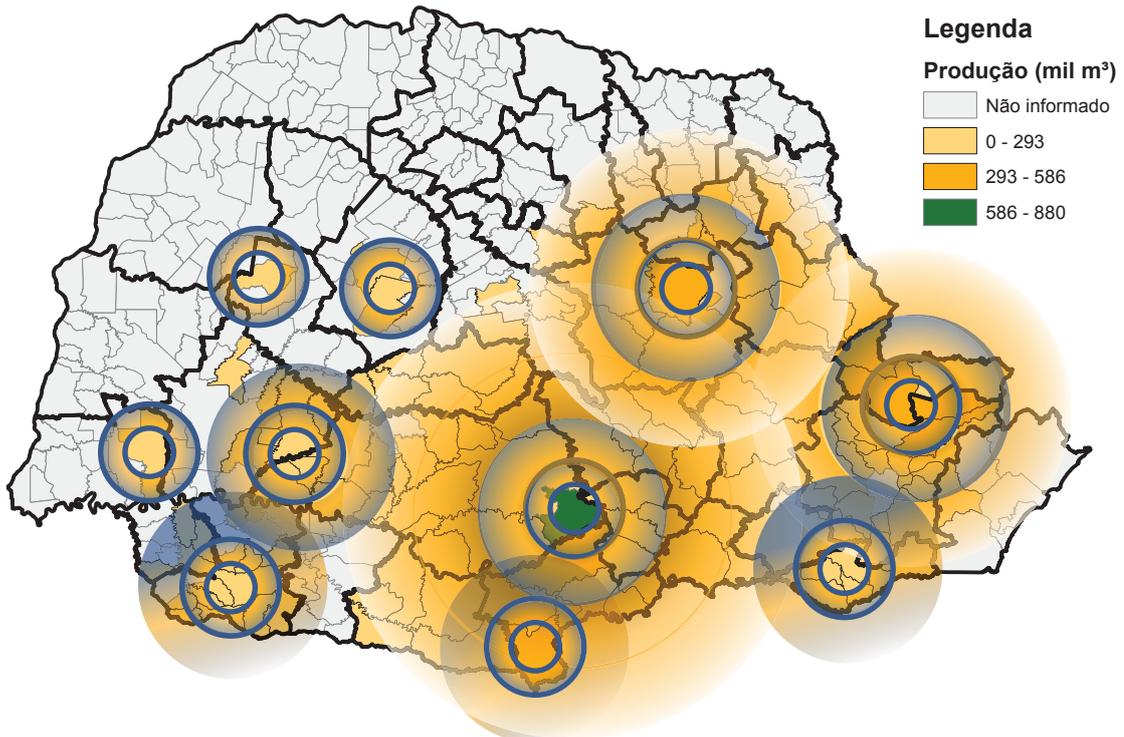
FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2012).

FIGURA 5 - LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS PONTOS DE PRODUÇÃO DE TORAS DE PINUS PARA SERRARIA (SAFRA 2009)



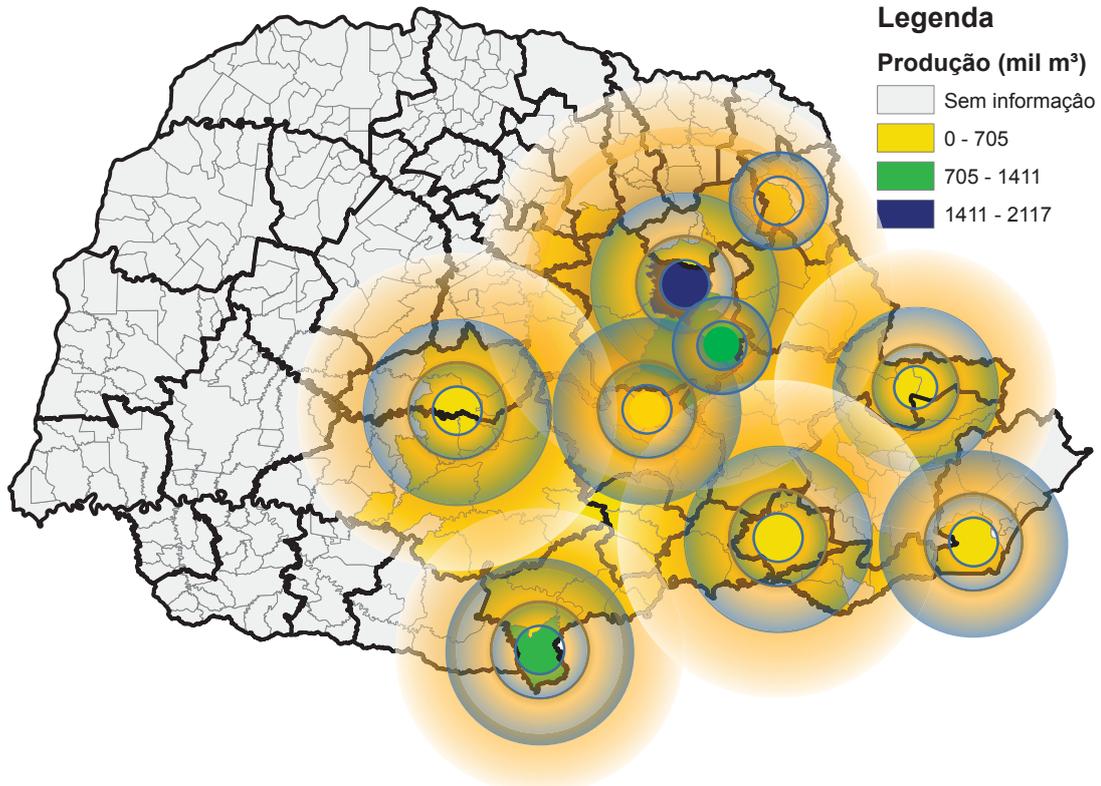
FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2011).

FIGURA 6 - LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS PONTOS DE PRODUÇÃO DE TORAS DE PINUS PARA LAMINAÇÃO (SAFRA 2009)



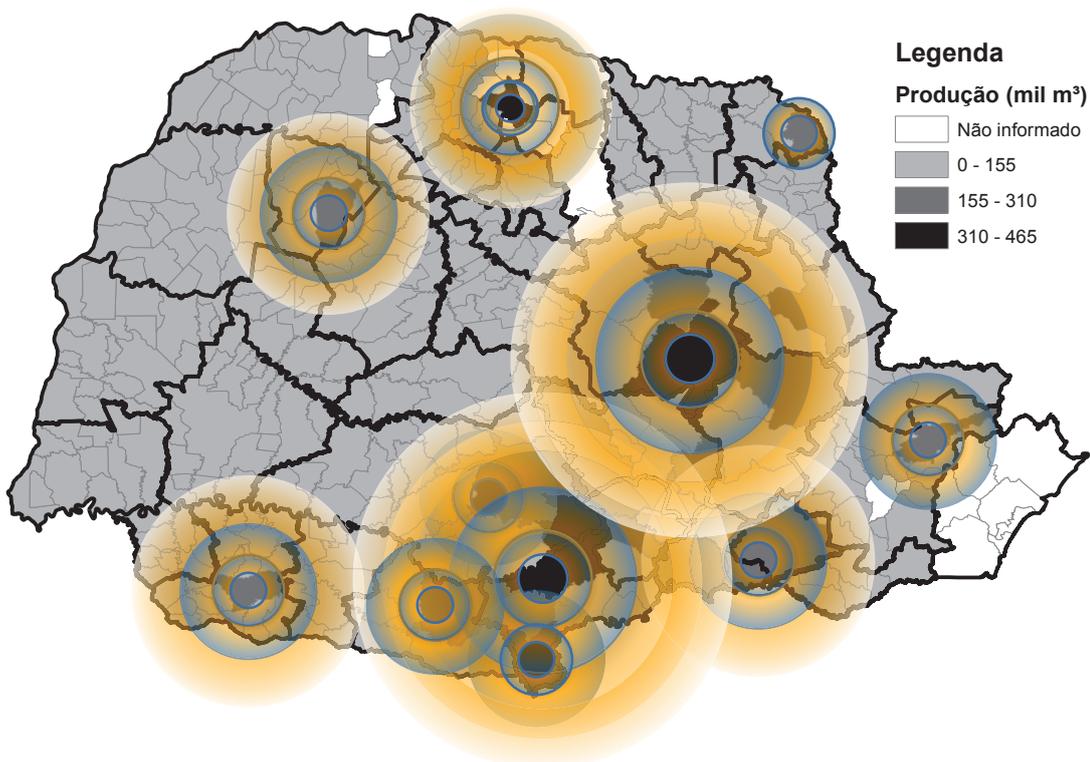
FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2011).

FIGURA 7 - LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS PONTOS DE PRODUÇÃO DE TORAS PARA CELULOSE E PAPEL (SAFRA 2009)



FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2011).

FIGURA 8 - LOCALIZAÇÃO DOS PRINCIPAIS PONTOS DE PRODUÇÃO DE TORAS PARA LENHA (SAFRA 2009)



FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2011).

2.6 A BIOMASSA COMO FONTE DE GERAÇÃO DE ENERGIA E USOS DIVERSOS

A energia que deverá suprir as necessidades futuras do mundo, segundo Blanco-Canqui (2012), será a biomassa, não apenas a florestal, mas também outras fontes, como propõem Scurlock, Hall e House (1993), a escolha da diversa gama de vegetais, como a cana e sorgo, citado por Moreira (2004), o colmo, o sabugo e a palha do milho, a cama de aviários, dejetos de bovinos e equinos, gramíneas perenes, bagaço da cana, macaúba, palma-de-óleo (dendê) e resíduos florestais de eucalipto e pinus, citado por UDOP (2012), sementes de tucumã, (LIRA, 2012), casca de café, (SILVA, 2012). Lucke (2013) propõem incinerar o lixo doméstico. Apesar do que indica a Resolução 237/97 do Conama, artigo 2º, ANEXO 1, onde classifica a silvicultura como atividade potencialmente causadora de significativa degradação do meio, recomendam Wisniewski e Sampson (1993), que é importante incentivar o plantio de florestas ou culturas energéticas em regiões tropicais e equatoriais e em terras inadequadas para as atividades agrícolas, que, além de fornecer lenha para produção de carvão e energia, a madeira poderá ser a matéria-prima para a produção de uma série de subprodutos que dali se poderá extrair, além de resgatar grandes quantidades de CO₂ na atmosfera.

Dercan et al. (2012) citam que apenas 38% do total de madeira destinada para serraria é transformada em matéria-prima para a indústria madeireira, ficando uma parcela no próprio campo, de onde é retirado o seu fuste e outra parcela perdida nos processos industriais. Estudos realizados por Aguilar, Song e Shifley (2011) indicam que esta perda pode ser diminuída significativamente com técnicas adequadas, sendo que, para Hoogwijk (2004), reduz-se para 33% o volume da madeira em toras extraídas das florestas que são perdidos. Szymczak (2015) estudou os resíduos de *Pinus taeda* e obteve índice de 18,23% entre os galhos vivos (12,11%), acículas (2,57%) e ponteiros (3,55%). Os resíduos de casca foram de 5,53%. Dorini (2015) estudou diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus sp.* e obteve índices médios de 18,18% considerando ramos (5,81%) e folhas (12,37%) e de 11,54% de resíduos de casca, totalizando 29,72% de biomassa residual.

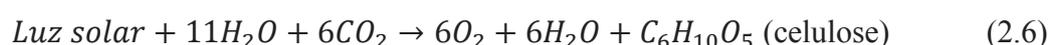
Sobre o que fazer com os resíduos, Jäppinen, Korpinen e Ranta (2012) com estudo sobre o aproveitamento de resíduos de indústrias madeireiras, recomendam utilizar os compartimentos das árvores como folhas, casca e galhos finos (espessura menor que oito centímetros) para a queima e geração de energia. Yoshioka et al. (2006) sugerem, para facilitar o manuseio e a combustão destes resíduos, que sejam transformados localmente em forma de cavacos. Conforme Alfonso (2009), o uso de cavaco em relação às toras inteiras na secagem de grãos, provoca uniformidade de secagem, redução de 15% dos tempos, 60% do custo de

mão de obra e de 40% do consumo de biomassa. Há também a redução dos afastamentos e acidentes de trabalho e menos riscos de incêndio.

Conforme Searcy *et. al.* (2007), o processamento dos resíduos no local ou próximos aos pontos de consumo, tem a vantagem de possibilitar a descentralização das unidades e evitar o transporte dos produtos a longas distâncias. Com relação à geração de energia termelétrica, a distância também é um fator determinante, já que interfere na distribuição das redes de transmissão. Jäppinen; Korpinen e Ranta (2012) constataram que o transporte de cavaco a distâncias acima de 60 quilômetros, não se tornam competitivos. A distâncias menores, tem-se a possibilidade de fortalecer o parque fabril local de pequenas e médias indústrias para geração de energia própria. O conjunto de uma maior quantidade desse tipo de empreendimento poderá fortalecer regionalmente e ampliar a abrangência de indústrias de fornalhas, caldeiras e turbinas a vapor.

2.6.1 Reações químicas na biomassa

Toda a biomassa, segundo Loo e Koppejan (2010), provém da fotossíntese e por conseguinte, a partir de um processo físico-químico, em nível celular, realizado pelos seres vivos clorofilados, que utilizam dióxido de carbono e água e, com a interferência da luz solar, entre outros, há a formação da lignina, $C_9H_{10}(OCH_3)_{0,9-1,7}$, da hemicelulose, $C_5H_8O_4$ e da celulose $C_6H_{10}O_5$, que ocorre de acordo com a equação (2.6):



Assim, a partir de qualquer manejo florestal rotativo e periódico em processo de crescimento, de acordo com Lora (2002), o carbono disperso no ar poderá ser recuperado e reacumulado, considerando como se fosse um reservatório de carbono. Cita Rodrigues (1983) que o inverso disso se chama de oxidação ou combustão ou também queima. Na própria combustão ou biodegradação, o oxigênio do ar é consumido, liberando água, gás carbônico e calor. O calor liberado é relacionado à energia do sol que foi acumulada pelas reações químicas na fotossíntese.

A relação estequiométrica de ar para a combustão completa de biomassa seca com composição típica da celulose é de aproximadamente seis quilogramas de ar por quilograma de biomassa. Para a gaseificação - queima não completa, existe uma quantidade ideal de ar que produz somente CO e H₂, que é de aproximadamente 20% da estequiométrica, ou seja, 1,2 kg

de ar por quilograma de biomassa. Contudo, essa reação é endotérmica, sendo necessária uma fonte externa de calor para completar a reação. Tipicamente, utiliza-se uma quantidade maior de ar, que fornece calor ao queimar-se com a biomassa de acordo com o tipo de reação. As principais reações químicas que são desenvolvidas em cada etapa, são apresentadas nas equações (2.7), (2.8), (2.9) e (2.10), TABELA 11.

TABELA 11 - ENTALPIA DE COMBUSTÃO (ΔH) A 25 °C DE ALGUMAS SUBSTÂNCIAS ENCONTRADAS NA BIOMASSA

Componentes	Entalpia de combustão (ΔH)		Número
	kcal/mol	kJ/mol	
$C + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO$	- 26,39	-110,469	(2.7)
$CO + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow CO_2$	- 67,59	-282,932	(2.8)
$C + O_2 \rightarrow CO_2$	- 93,87	-392,94	(2.9)
$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2 O_{(v)}$	-57,76	-241,783	(2.10)

FONTE: BORSATO, GALÃO e MOREIRA (2009).

Vários experimentos e modelos matemáticos têm conseguido prever quais reações irão ocorrer e controlar o processo, porém, na realidade não se conhece exatamente o que acontece no interior da fornalha. Contudo, alguns modelos vêm sendo desenvolvidos (*ibid.*):

- modelo de equilíbrio, a composição do gás é calculada com uma temperatura de reação constante, utilizando-se reações de equilíbrio homogêneo ou heterogêneo;
- modelos não-cinéticos, o reator é subdividido em diferentes zonas: secagem, pirólise, oxidação e redução;
- modelo de regime permanente, o reator é dividido em elementos diferenciais no comprimento (fatias), e um modelo não cinético para a zona de redução onde ocorrem os mecanismos preferenciais nas reações de gaseificação.

Estudos de Nogueira e Rendeiro (2008) indicam que no início do processo de combustão da biomassa, a temperatura chega a mais de 300 °C, onde ocorre a pirólise e são emitidos alguns voláteis que reagem com o oxigênio, dando início às reações de combustão. Para ilustrar, Gómez et al. (2003) indicam no QUADRO 1 as características no processo de combustão de biomassa em relação ao aumento da temperatura:

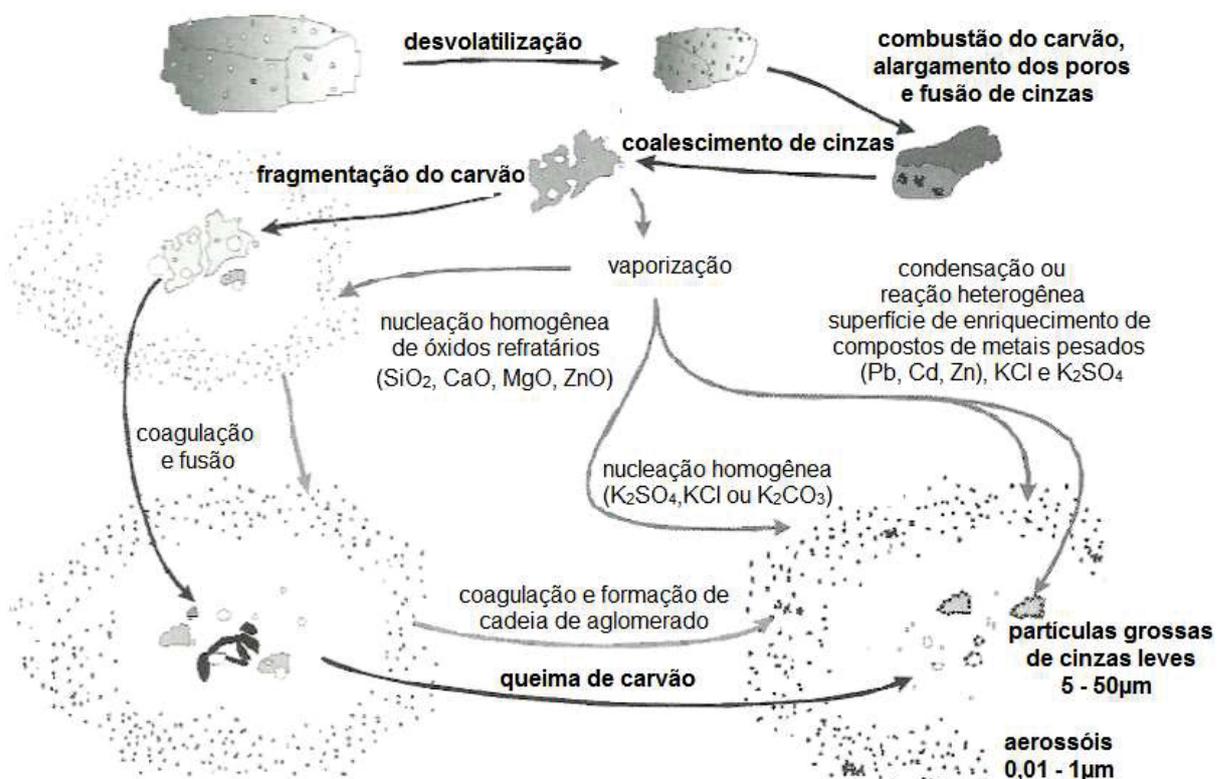
QUADRO 1 - CARACTERÍSTICAS DE TECNOLOGIAS PARA PIRÓLISE DA BIOMASSA

Temperatura	Características da tecnologia
Até 200 °C	Ocorre a secagem do material
Entre 200 °C e 300 °C	Os produtos envolvidos na fase anterior, água, ácido fórmico, ácido acético e traços de CO ₂ , se encontram em quantidades maiores e parte da biomassa é convertida em carvão.
De 300 °C a 500 °C	Na faixa o terceiro fenômeno corresponde à degradação térmica da celulose, ocorrendo reações exotérmicas e produzindo elevadas quantidades de CO ₂ , H ₂ e CH ₄ , etanol, ácido acético, ácido fórmico, formaldeídos e alcatrão (voláteis e licor pirolenhoso).
Acima de 500 °C	Ocorrem reações dos produtos gasosos já formados com o resíduo sólido, produzindo produtos altamente combustíveis, sendo que a água e o CO ₂ podem reagir com o carvão residual para produzir CO e H ₂ .

FONTE: GÓMEZ ET AL. (2003).

Loo e Koppejan (2010), FIGURA 9, perceberam em seus estudos que o processo de combustão passa por fases distintas, formando reações químicas diversas em cada fase:

FIGURA 9 - MECANISMOS DA COMBUSTÃO DA BIOMASSA, ENVOLVENDO A FORMAÇÃO DE CINZAS

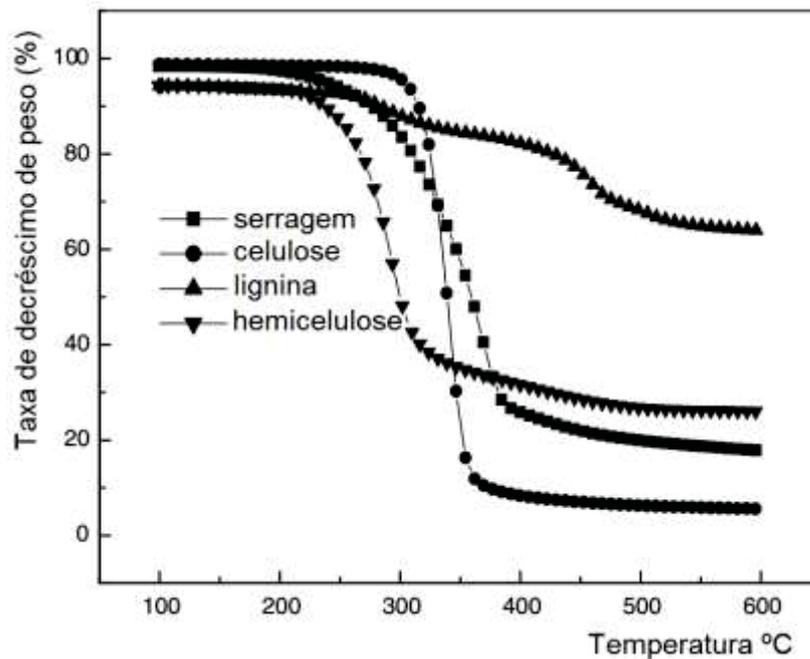


FONTE: Adaptado de LOO e KOPPEJAN (2010).

Em complemento, Wang et al. (2007) que estudaram a pirólise da serragem, chegaram às curvas descritas na FIGURA 10. Percebe-se na FIGURA que as taxas de decréscimo de massa da hemicelulose decaem acentuadamente a partir dos 250 °C, a celulose, a partir dos 320 °C e a

lignina, decai de forma menos acentuada desde o início do ensaio, dos 100 até os 600 °C. No final do ensaio, 600 °C, restou aproximadamente 60% da lignina, 25% de hemicelulose e 5% de celulose.

FIGURA 10 - PERFIS TERMOGRAVIMÉTRICOS DA SERRAGEM E SEUS TRÊS COMPONENTES NA TAXA DE AQUECIMENTO DE 15 °C/min



FONTE: WANG ET AL. (2007).

2.6.2 Transformação da biomassa em energia

A combustão da biomassa desprende calor que poderá ser aproveitado entre as diversas finalidades industriais e residenciais, na secagem de grãos e na transformação da energia térmica em vapor e posteriormente em energia termelétrica com o emprego de turbinas.

Conforme dados levantados por Hoogwijk (2004), a utilização e gerenciamento destes resíduos é uma preocupação que envolve diversas regiões do mundo, principalmente aquelas onde a energia é mais escassa ou em vias de escassez ou também, onde a demanda de energia é muito elevada, como é o caso de países como a França, Itália, Alemanha, China e EUA. Enfatiza U.S. Energy Information Administration (2011), nesses países praticamente já foram esgotados os recursos hídricos para a exploração de energia hidrelétrica. Alguns utilizam de forma intensiva a energia proveniente do carvão mineral - que não é renovável e outros da energia nuclear - rodeada de conflitos e problemas gerenciais. Mandelli (1991) frisa que, na década de 1970 alguns países europeus já utilizavam o lixo como energia.

Conforme Hoogwijk (2003), mesmo apesar de alguns países estarem localizados em regiões subtropicais ou próximas aos polos, onde o crescimento das plantas é menor devido à baixa incidência solar, ainda assim, a energia da biomassa é uma alternativa. Scurlock, Hall e House (1993) citam como exemplo que o sequestro do CO₂ na Europa Ocidental, EUA e Japão assumindo um peso seco de produtividade de 12 t/ha/ano, nos EUA poderiam teoricamente sequestrar todas as emissões de CO₂ ao reflorestar 25% de suas terras. Para a Europa Ocidental exigiria 42% de suas terras e o Japão 129%. Como exemplo, cita Moreira (2004) que, a quantidade atual de terra que está sendo usada para as principais culturas em nível mundial, ocupa em torno de 230 Mha para o trigo, 180 Mha para o arroz e 160 Mha para o milho.

Antes de relatar sobre a importância da biomassa na matriz energética como um todo, é importante esclarecer sobre sua representatividade na matriz brasileira. A biomassa representou no ano de 2014, segundo EPE (2016), 27,4% da oferta interna de energia total consumida no Brasil. Desde 2005, aumentou de 59514 10³ tep (tonelada equivalente de petróleo, equivalendo a 11,63 MWh) para 73960 10³ tep em 2015, sendo que o consumo no setor industrial foi de 23931 10³ tep e o setor agropecuário consumiu 2682 10³ tep. Quanto à oferta interna de energia elétrica em 2015 foram produzidos 47.394 GWh, correspondendo a 8% do total, onde os combustíveis utilizados foram lenha, bagaço de cana, lixo e outras fontes primárias. A participação em relação a outras fontes na geração termelétrica em 2015, representou 24,5%

Alfonso et al. (2009) citam que nos EUA a quantidade anual de resíduos de madeira chega a aproximadamente 62% da demanda interna de produtos de madeira. No Brasil, se copas e folhas de cana, que muitas vezes ainda são queimadas antes da colheita, também fossem coletadas, conforme Moreira (2004), poderia produzir 1750 Mt/ano de biomassa em 21 Mha de cana plantada, em comparação com 2400 Mt/ano de biomassa a partir de todos os cereais que cobrem mais de 700 Mha de terras.

Entre outras iniciativas brasileiras, de acordo com UDOP (2012) a Usina de Piratini no Rio Grande do Sul, produz 10 megawatts de energia elétrica, utilizando resíduos provenientes de madeiras da região, com consumo de aproximadamente 160 mil toneladas anuais. A Embrapa também já trabalha nas pesquisas com florestas energéticas. Felfli et al. (2011) e Silveira (2008) estudaram respectivamente a casca de café e a casca de coco para a fabricação de briquetes.

A partir de levantamento realizado por Brown, Hamel e Hedman (1996), mapeou-se algumas indústrias com respectivo ramo de atividade, que utilizam em seus processos energia térmica entre 230 e 1.100 °C. Dentre as utilizações, conforme o QUADRO 2, se destacam as

indústrias que empregam a energia térmica no pré-aquecimento de produtos, na secagem, em caldeiras, geradores de vapor e energia elétrica, entre outros.

QUADRO 2 - INDÚSTRIAS NORTEAMERICANAS QUE UTILIZAM CALOR EM SEUS PROCESSOS INDUSTRIAIS À TEMPERATURAS ENTRE 260 A 1100 °C

Ramo industrial	Ramo industrial
Aço forjado, altos-fornos e usinas de aço	Leiteira
Azubos	Máquinas de construção
Álcalis e cloro	Metais não-ferrosos, alumínio primário, cobre primário
Bebidas	Moagem de milho
Cimento	Óleo de soja
Eletro metalurgia	Pão, bolo e produtos afins
Enlatados de frutas e legumes	Papel, celulose, cartão e caixas de fibras sólidas
Equipamentos eletrônicos	Preparações químicas e farmacêuticas
Equipamentos técnico agrícola	Produtos da borracha pneus e câmaras de ar
Fábricas de gesso	Produtos plásticos e resinas plásticas
Ferro fundido	Química orgânica e inorgânica
Fibras celulósicas sintéticas ou artificiais	Refinamento de petróleo
Fibras orgânicas, não celulósico	Tecelagens, fibra sintética
Folha de alumínio	Tijolos e telhas
Indústria do açúcar da cana e beterraba	Veículos automotores e carrocerias
Indústria madeireira	Vidro soprado e laminado
Lã mineral	

FONTE: BROWN, HAMEL e HEDMAN (1996).

2.7 FORNALHAS, GERADORES DE VAPOR E TURBINAS TÉRMICAS

A seguir os equipamentos de transformação da biomassa em energia aqui estudados: a fornalha cocorrente, trocadores de calor para a geração do vapor e as turbinas para transformar o vapor em energia mecânica e conversão final em energia elétrica.

De acordo com Klautau (2008), enquanto as fornalhas convencionais apresentam o fluxo contracorrente, ou seja, o combustível e os gases fluem em sentidos opostos, na fornalha de fluxo cocorrente, FIGURA 11, é assim denominada porque o combustível e os gases fluem no mesmo sentido. Nesta fornalha, o combustível é depositado na parte superior da grelha. O processo de combustão se inicia junto à zona de pirólise onde a biomassa desprende gases, umidade e voláteis. Na câmara de combustão ocorrem as principais reações químicas gerando a maior parcela de calor. Após este processo, os gases são exalados pela chaminé. Próximo à câmara de combustão poderá ser instalado um trocador de calor para gerar vapor. Os gases expelidos pela chaminé poderão ser utilizados para a secagem de grãos ou outras finalidades.

FIGURA 11 – FORNALHA DE FLUXO COCORRENTE INSTALADA NO LEIS



FONTE: O autor (2014).

Um conceito novo que está sendo cada vez mais popularizado, conforme Helesch (2013), é a planta CHP (*combined heat and power*), que é o nome dado para uma planta de cogeração, ou seja, geração simultânea de eletricidade e aquecimento útil a partir da queima de um combustível. Nestas condições, segundo Rios, Rochadelli e Oliveira (2016), os níveis mais elevados de temperatura são direcionados para a geração de vapor e geração de termoeletricidade. O calor residual do processo, abaixo de 150 °C, pode ser empregado em processos que requerem baixas temperaturas, como por exemplo, na secagem de grãos ou para outros fins industriais. A seguir, a especificação de equipamentos e processos onde existe a possibilidade em se utilizar a energia térmica concomitantemente com outros processos.

a) secadores de grãos

Os secadores de grãos, segundo Weber (1995), são equipamentos utilizados para diminuir artificialmente o teor de umidade dos grãos até o limite adequado, sem comprometer as propriedades naturais dos grãos. Após a secagem, são armazenados em silos que oferecem condições técnicas de conservação do produto estocado para a posterior comercialização, transporte e beneficiamento ou exportação.

O processo de secagem de grãos é, conforme Silva (2008), uma das fases mais importantes e críticas em toda cadeia da produção agrícola. Pode ser realizada em baixa ou em alta temperatura. A secagem em baixa temperatura, permite que o grão seque até 10°C acima da temperatura ambiente onde se emprega ar natural ou levemente aquecido. É um o processo mais lento.

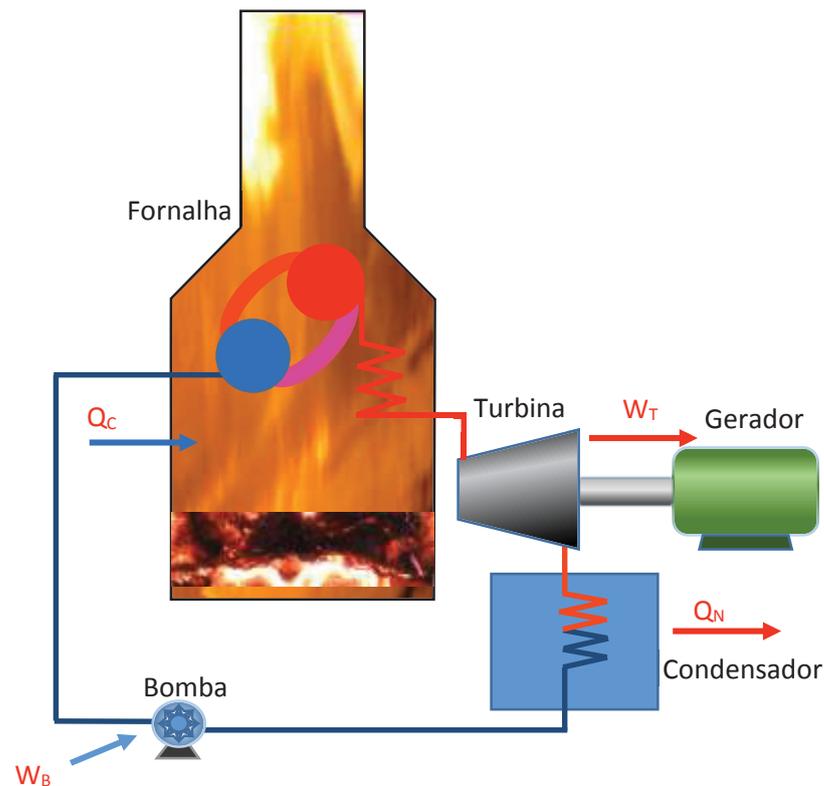
A secagem em alta temperatura conforme Elias et al. (2015), segue o princípio em que ao aumentar a temperatura do ar úmido, a umidade relativa diminui e conseqüentemente,

a capacidade do ar em absorver umidade aumenta. Pode utilizar temperaturas do ar de 70 a 130 °C na entrada de secador, desde que os grãos não contenham muitas impurezas e/ou materiais estranhos, e que seja feita inspeção diária e remoção de poeiras, para evitar incêndio. No caso de sementes, a temperatura do ar não deve exceder a 70 °C e dos grãos não deve ultrapassar 40 °C. Elias et al. (2015) recomendam, para a temperatura ambiente, umidade final do grão não superior a 14% evitando assim, a proliferação de insetos, ácaros, fungos, bactérias e a germinação indesejada do grão.

b) geradores de vapor (GV's)

Geradores de vapor (GV's) conforme representação esquemática na FIGURA 12, podem ser considerados como sendo trocadores de calor complexos que produzem vapor de água sob pressões superiores a atmosférica a partir da energia de um combustível e de um elemento comburente (ar).

FIGURA 12 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE TROCADOR DE CALOR COM GERAÇÃO TERMELÉTRICA



FONTE: O autor (2016).

Estes equipamentos, conhecidos popularmente como caldeiras de vapor, são recipientes pressurizados no qual a água é introduzida e, pela aplicação contínua de energia é evaporada. O vapor de água é usado como meio de geração, transporte e utilização de energia.

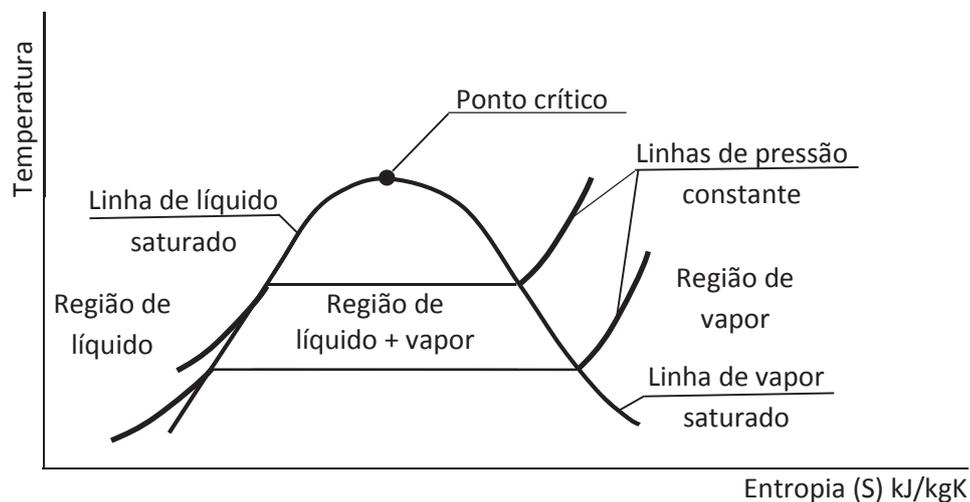
São constituídos por dispositivos interligados que permitem a obtenção do maior rendimento térmico possível.

Conforme Brown, Hamel e Hedman (1996), o vapor saturado ali formado é utilizado na grande maioria das indústrias e processos industriais, pois tem a grande vantagem em manter temperatura constante durante a condensação à pressão constante. A temperatura pode variar entre 130 °C a 350 °C. Porém, à temperaturas até 170 °C com 8 kgf/cm², corresponde à grande maioria de pequenos e médios consumidores de vapor.

O vapor superaquecido é utilizado em grandes complexos industriais e na geração de energia elétrica ou mecânica em ciclos termodinâmicos. Possui temperatura mais elevada, acima do ponto crítico da água, e geralmente se utiliza na faixa de 400 °C a 560 °C quando ultrapassa temperaturas de saturação de uma determinada pressão. Para obtê-lo, é necessário aquecer o vapor saturado, mantendo inalterada a sua pressão. O vapor superaquecido é isento de umidade e comporta-se nas tubulações como gás.

Para ilustrar, a FIGURA 13 indica o diagrama de temperatura–entropia para o vapor da água.

FIGURA 13 – DIAGRAMA DE TEMPERATURA–ENTROPIA PARA O VAPOR DA ÁGUA



FONTE: WYLEN, SONNTAG e BORGNAKKE (2013).

c) turbina a vapor

Utilizada na geração de energia elétrica, onde as turbinas a vapor utilizam vapor de água como fluido de trabalho em ciclos termodinâmicos, transformando a energia química de combustíveis em energia mecânica e, em seguida, energia elétrica.

Assim, as turbinas a vapor são máquinas de combustão externa onde os gases resultantes da queima do combustível não entram em contato com o fluido de trabalho que escoar no interior da máquina e realiza os processos de conversão da energia do combustível em energia mecânica. A utilização do vapor saturado seco pode diminuir os custos de investimento, no entanto, para potências mais elevadas se utiliza o vapor superaquecido.

A TABELA 12 ilustra, entre algumas potências usuais, as temperaturas, pressões utilizadas em turbinas a vapor.

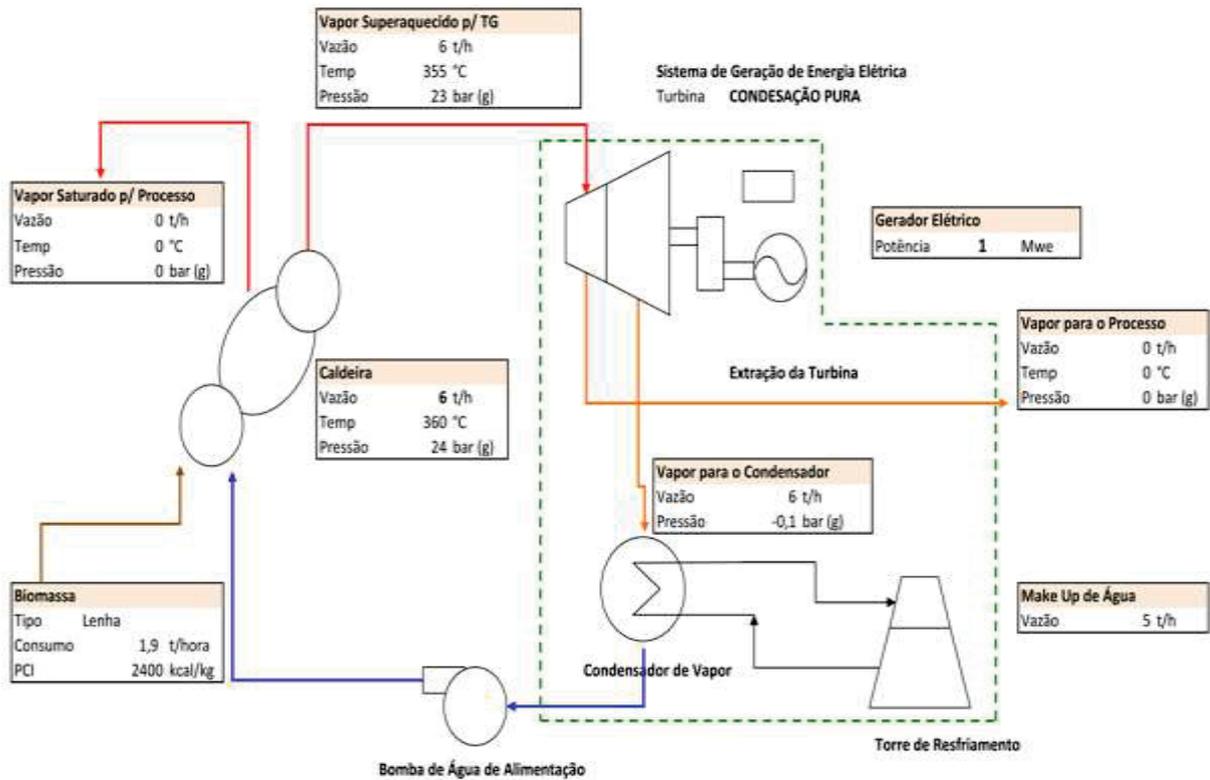
TABELA 12 - RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA, TEMPERATURA E PRESSÃO NAS TURBINAS A VAPOR

Potência	Temperatura de entrada do vapor	Pressão de entrada de vapor
5.0 MW	377°C	37 bar
13.0 MW	385°C	39 bar
9.4 MW	380°C	45 bar
40.8 MW	438°C	50 bar
11.4 MW	490°C	70 bar

FONTE: UTTA, GOEPFERT e FREY (2016).

A FIGURA 14, mostra a planta de uma usina construída por Solidda (2013), indicando os detalhes das instalações, vapor utilizado, vazões, temperaturas e pressões em cada processo para a geração de energia térmica.

FIGURA 14 – DETALHES DA INSTALAÇÃO DE UMA TURBINA A VAPOR



FONTE: SOLIDDA (2013).

2.8 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA PARA GERAÇÃO TERMELÉTRICA

Para realizar a análise de viabilidade econômica e decisões sobre investimentos com alternativas de cogeração, micro e minigeração distribuída ou de diferentes empreendimentos de plantas para geração de vapor e de energia elétrica, é importante utilizar parâmetros econômicos para permitir analisar qual é a melhor atratividade do investimento.

Dentre os parâmetros econômicos a serem utilizados como ferramenta de decisão do empreendimento, de acordo com Nogueira, Nogueira e Rocha (2005), podem-se destacar o valor presente líquido (ou benefício líquido), o valor anual uniforme, a taxa interna de retorno e o tempo de retorno de capital.

O método do valor presente líquido VPL é um método matemático-financeiro capaz de determinar o valor presente de pagamentos futuros descontados a uma taxa de juros apropriada, menos o custo do investimento inicial. Basicamente, é o cálculo de quanto os futuros pagamentos somados ao custo inicial estariam valendo atualmente. A alternativa que oferecer o maior valor presente líquido será, por este critério, a mais atraente.

O método do valor anual líquido (VAL) também é indicado para comparar alternativas mutuamente excludentes. A grande vantagem deste método é que permite analisar alternativas com vidas úteis diferentes lançando-se mão do conceito de reposição contínua. Ou seja, passada a vida útil do equipamento, ele será repostado por outro idêntico, sendo que isto irá ocorrer até que os períodos totais das alternativas se igualem. Este critério trabalha com a distribuição de custos e de investimentos que estejam concentrados em determinado instante do tempo pelo fator de recuperação de capital. A alternativa que apresentar o valor uniforme mais atraente será a alternativa escolhida.

O método da taxa interna de retorno (TIR) é a taxa de juros que torna equivalente o investimento inicial ao fluxo de caixa subsequente, ou seja, é a taxa que torna nulo o valor presente líquido do projeto em um período de tempo estipulado.

O critério do tempo de retorno de capital, ou *payback*, refere-se ao custo da implantação do empreendimento pelo benefício auferido, indicando quanto tempo é necessário para que os benefícios se igualem ao investimento.

Entre todos estes critérios, é importante que as taxas de juros sejam inseridas nas avaliações de investimentos, onde o conceito da taxa de juros representa o valor do dinheiro no tempo presente, ou seja, correspondem ao valor obtido com a aplicação de um valor presente (P) durante um certo número de períodos (n), a uma taxa de juros (i). Se dividem em juros simples e compostos. Os juros simples são aqueles que incidem apenas sobre o capital inicial. Os juros compostos são aqueles que incidem sobre o capital próprio e sobre os juros do período anterior. Portanto, apenas no primeiro período eles são iguais aos juros simples. Ao final de n períodos, o valor futuro é calculado pela equação (2.10):

$$F = P(1 + i)^n \quad (2.10)$$

Sendo:

F - o valor futuro;

P - valor presente;

n - número de períodos.

2.8.1 Disponibilidade de energia

A quantidade de energia elétrica que pode ser produzida nas usinas depende da quantidade de biomassa disponível no período de suprimento e do coeficiente de conversão de

cada máquina. Para estas usinas a disponibilidade de energia para o sistema é definida pelo empreendedor, devendo informar os valores mensais em MWmédios.

A metodologia de cálculo da garantia física para empreendimentos à biomassa está descrita de acordo com Ministério de Minas e Energia (2016) na Portaria MME nº 101, de 22 de março de 2016, quando couber. Para estas usinas a disponibilidade de energia para o sistema é definida pelo empreendedor, devendo este informar os valores mensais em MWmédios.

Para fins de cálculos sobre a disponibilidade média mensal de uma usina termelétrica, conforme Ministério de Minas e Energia (2013) é dada pela equação (2.11):

$$\text{Disp} = \text{Pot} \text{FC}_{\text{max}} (1 - \text{TIF})(1 - \text{IP}) \quad (2.11)$$

Onde:

- Pot: é a potência instalada da usina em MW;
- FC_{max} : é o percentual da potência instalada que a usina consegue gerar continuamente;
- TIF: corresponde à taxa média de indisponibilidade forçada;
- IP: corresponde à taxa de indisponibilidade programada.

2.8.2 Energia distribuída para produtores independentes

A Resolução Normativa nº. 687/2015 da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2015) delibera as seguintes possibilidades:

- I - microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada;
- II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 3 MW para fontes hídricas ou menor ou igual a 5 MW para cogeração qualificada, para as demais fontes renováveis de energia elétrica, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;
- III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa;
- IV - melhoria: instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalações de distribuição existentes, ou a adequação destas instalações, visando manter a prestação de serviço adequado de energia elétrica;
- V - reforço: instalação, substituição ou reforma de equipamentos em instalações de distribuição existentes, ou a adequação destas instalações, para aumento de capacidade de distribuição, de confiabilidade do sistema de distribuição, de vida útil ou para conexão de usuários;
- VI - empreendimento com múltiplas unidades consumidoras: caracterizado pela utilização da energia elétrica de forma independente, no qual cada fração com uso individualizado constitua uma unidade consumidora e as instalações para atendimento

das áreas de uso com um constituam uma unidade consumidora distinta, de responsabilidade do condomínio, da administração ou do proprietário do empreendimento, com microgeração ou minigeração distribuída, e desde que as unidades consumidoras estejam localizadas em uma mesma propriedade ou em propriedades contíguas, sendo vedada a utilização de vias públicas, de passagem aérea ou subterrânea e de propriedades de terceiros não integrantes do empreendimento;

VII - geração compartilhada: caracterizada pela reunião de consumidores, dentro da mesma área de concessão ou permissão, por meio de consórcio ou cooperativa, composta por pessoa física ou jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada;

VIII - autoconsumo remoto: caracterizado por unidades consumidoras de titularidade de uma mesma Pessoa Jurídica, incluídas matriz e filial, ou Pessoa Física que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras, dentro da mesma área de concessão ou permissão, nas quais a energia excedente será compensada.

Quanto à avaliação de investimentos e retorno, é importante considerar todos os parâmetros que envolvem recursos financeiros de desembolso levando em consideração a produtividade e venda dos produtos finais, que no caso deste estudo, foram o combustível (cavaco), o vapor e a energia elétrica.

Para propiciar adequadamente o gerenciamento e destino final dos resíduos da poda urbana e de plantios florestais e levando em consideração a descentralização na distribuição de energia, com a vantagem de se utilizar a biomassa à distâncias próximas aos centros de consumo, evidenciam-se as plantas de Energia Distribuída para Produtores Independentes também chamadas de IPP, (*Independent Power Producer*), ou também chamadas de Gerador Não Utilitário - NUG (*non-utility generator*). Onde se instala uma planta para geração de energia termelétrica para o consumo próprio, para a venda aos serviços públicos ou usuários finais, sejam empresas, cooperativas ou outras iniciativas. O excesso de energia pode ser injetado e comercializado para o sistema.

Nogueira, Nogueira e Rocha (2005) fizeram uma comparação entre os conceitos tradicionais e os conceitos modernos no enfoque da cogeração de energia, conforme o QUADRO 3:

QUADRO 3 – DIFERENCIAÇÃO ENTRE COGERAÇÃO TRADICIONAL E COGERAÇÃO MODERNA

Aspecto	Cogeração	
	Moderna	Tradicional
Motivação básica	Autossuficiência de energia elétrica	Venda de excedentes e redução de emissões
Equipamento de geração predominante	Turbinas a vapor	Turbinas a gás e ciclos combinados
Combustíveis usuais	Residuais (bagaço, cascas)	Todos
Relação com a concessionária	Operação independente	Operação interligada

FONTE: NOGUEIRA, NOGUEIRA e ROCHA (2005).

Dentre outros benefícios desta proposta, podem ser destacados, conforme Utta, Goepfert e Frey (2016):

- incremento na confiabilidade do suprimento e independência de energia.
- possibilidade de gerar vapor superaquecido e utilizar o excedente do calor para outras finalidades industriais;
- poupança no consumo de energia primária, com fontes próprias, direcionando o calor dos processos exotérmicos para gerar eletricidade e fomentar a demanda própria da eletricidade e vapor de processo;
- com a possibilidade de se usar a biomassa do entorno, os custos de transporte e problemas logísticos são reduzidos, como usinas de energia em pequena escala conforme Araújo, Bandeira e Campos (2014);
- pelo fato de se gerar a energia próxima aos pontos de consumo, as perdas na transmissão e distribuição são reduzidas;
- pode-se propiciar a criação de pequenas indústrias para triturar e comercializar os resíduos e contribuir com a geração de novas frentes de trabalho, gerando renda e movimentando a economia local.
- as tarifas de energia ficam reduzidas e a eletricidade excedente pode ser vendida à rede.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho propôs o desenvolvimento de metodologia para o gerenciamento da biomassa residual proveniente de plantios florestais a partir de um estudo no estado do Paraná e, da poda de árvores urbanas, tendo como estudo de caso a cidade de Pato Branco, envolvendo procedimentos operacionais para utilizá-los como substitutos à lenha convencional em fornalhas.

O motivo de escolher o estado do Paraná para o estudo dos resíduos de plantios florestais, foi devido à elevada produção de derivados de madeira em relação ao panorama nacional, onde há maior concentração de empresas no sul e sudeste do país, sendo que o estado do Paraná foi o principal exportador de madeira serrada. O motivo de escolher a cidade de Pato Branco como referência para realizar o estudo de caso para os resíduos de poda urbana foi devido à facilidade de acesso a dados e estatísticas de sua geração.

Porém, devido a motivos logísticos, dentre eles, a disponibilidade de laboratórios para realizar os ensaios, com equipamentos apropriados que estavam instalados em distintos câmpus da UFPR em Curitiba e a fornalha cocorrente, que também estava instalada na UFPR, no LEIS, as amostras de compartimentos das espécies de árvores estudadas foram coletadas de indivíduos localizados no próprio Centro Politécnico da UFPR, que, após a poda, eram pesadas e direcionadas ao estudo. Em seguida, devido à similaridade entre as características das espécies estudadas, interpolou-se com informações de produção de biomassa residual dessas espécies no estado do Paraná e na cidade de Pato Branco.

Diante do exposto, se fez estudo entre a geração e o destino final dos resíduos originados do desbaste dos troncos de árvores para a indústria madeireira e dos resíduos de poda de árvores nas vias públicas, vinculado principalmente à energia que os mesmos poderão gerar a partir da combustão, com controle de temperaturas e emissão de gases em diferenciadas condições de alimentação, granulometria e entrada de ar.

Criou-se metodologia para o gerenciamento mais adequado destes resíduos, haja vista que, conforme Jardim et al. (2000), depositá-los em lixões ou aterros sanitários, além da poluição gerada a partir da degradação e dos custos de deposição - R\$ 68,00/t, conforme Meira (2010), comprometem o espaço dos mesmos, diminuindo seu tempo de vida útil.

Dentre os procedimentos para a conversão da biomassa residual aqui utilizada, foram avaliados os parâmetros técnicos, ambientais, regulatórios, logísticos e econômicos conforme recomenda a Fundação Getúlio Vargas (2008), representado detalhadamente na FIGURA 15.

FIGURA15 – DETALHAMENTO DOS PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA A CONVERSÃO DA BIOMASSA RESIDUAL



FONTE: O autor (2016)

Quanto aos procedimentos técnicos, se considerou:

- a) a qualificação da biomassa disponível, envolvendo a determinação de suas propriedades (densidade, granulometria, análise imediata; poder calorífico e teor de umidade);
- b) a quantificação da biomassa residual disponível, que foi realizada tanto dos plantios florestais quanto da poda urbana;
- c) a trituração e preparação das amostras para a fornalha que foi realizada para facilitar o manuseio e a combustão;
- d) a preparação da fornalha cocorrente para realizar os testes de combustão;
- e) avaliação, com estudo de viabilidade, nas condições de utilização e aplicação da biomassa para fins energéticos com controle dos níveis de temperatura e emissão de gases;
- f) monitoramento da secagem da biomassa in natura e na forma de cavacos.

Quanto aos procedimentos econômicos, se considerou:

- a) comercialização do cavaco envolvendo estudo de viabilidade para instalação de indústria de trituração;
- b) comercialização da energia elétrica a partir de estudo de viabilidade de instalação de usina termelétrica;
- c) escolha de procedimentos para minimização de massa e volume dos resíduos;

- d) quantificação de redução de espaço disponibilizado no aterro, a partir da redução de volume dos resíduos com a queima;

Quanto aos procedimentos ambientais se considerou:

- a) o controle na emissão de poluentes e gases de combustão onde teve que atender à resolução SEMA 16/2014;
- b) a implementação do processo de gestão de resíduos para que fossem realizadas a trituração, queima e geração de energia, com controles de emissões de poluentes.

Quanto aos procedimentos regulatórios e legais se considerou:

- a) nas simulações dos projetos de viabilidade econômica foram levados em consideração as leis trabalhistas;
- b) a Resolução Normativa 687/2015 da ANEEL foi utilizada para o estudo de viabilidade para instalar, como cogeração, de usina termelétrica e para utilizar ou comercializar a energia classificada como produtor independente;
- c) a Resolução SEMA 16/2014 determinou os padrões de emissão de gases e poluentes para a combustão de lenha e cavaco.

Quanto aos procedimentos logísticos se considerou:

- a) avaliar as condições de manuseio e transformação da biomassa em cavaco, com a finalidade de facilitar o transporte e manuseio e de reduzir o tamanho das partículas para melhorar os processos de combustão;
- b) as condições de transporte da biomassa logo após o corte e trituração para o suprimento de lenha em indústrias localizadas em um raio próximo da fonte;
- c) as propostas de primeiramente armazenar a biomassa na origem, junto ao corte, foram avaliadas como condição de perda inicial de umidade. Em seguida, o armazenamento próximo ao centro de consumo foi avaliado para diminuição final e mais acentuada da umidade;
- d) a disponibilidade e suprimento futuro de biomassa foi avaliada a partir de técnicas de quantificação e qualificação da própria biomassa provenientes dos pontos de geração.

Assim, o trabalho foi dividido em três eixos. O primeiro, aqui denominado de conversão primária, envolveu os procedimentos de coleta de dados para caracterizar e quantificar a disponibilidade de biomassa aérea, aquela que fica acima do solo (dendrometria, levantamento de dimensões das árvores, determinação de percentagem entre os compartimentos, poder calorífico), corte, levantamento das taxas de umidade após o corte e umidade de equilíbrio, transporte, trituração e armazenamento da biomassa.

O segundo, aqui denominado de conversão secundária, envolveu a queima da biomassa em fornalha de fluxo cocorrente, com monitoramento de temperaturas e análise dos gases CO, NO_x, SO₂ e H₂S, formados durante a combustão.

O terceiro eixo, aqui denominado de conversão terciária, envolveu o estudo de viabilidade para instalação de indústria para triturar resíduos e a utilização do calor gerado na combustão para gerar energia termelétrica, para secagem de grãos e outros fins. Yoshioka et al. (2006) sugerem transformar os resíduos em cavacos para facilitar a combustão e manuseio.

Neste último eixo, a partir do fluxograma de procedimentos, FIGURA 2 da Seção 2.1, e o mapa de procedimentos, detalhado mais adiante, foi estudada a viabilidade econômica entre:

- a) aquisição de triturador e equipamentos para instalação de indústria para transformar a biomassa em cavaco;
- b) aquisição e instalação, junto à fornalha, de trocador de calor para produzir vapor;
- c) aquisição e instalação de turbina para gerar energia termelétrica.

3.1 QUANTIFICAÇÃO DA DISPONIBILIDADE DE BIOMASSA

Para realizar a quantificação de biomassa residual florestal, levou-se em consideração os levantamentos da ABRAF (2013), que indicavam o estado do Paraná como o maior exportador brasileiro de madeira serrada em 2011, responsável por 54,8% do volume total (163,3 mil m³).

Para a quantificar os resíduos de poda urbana se considerou o que era produzido na cidade de Pato Branco, já que, como na maioria das cidades do estado do Paraná, as principais responsáveis pela geração eram as próprias prefeituras municipais, e elas que determinavam onde, quando e como realizar a poda das árvores. Algumas vezes a poda era realizada em parceria com a COPEL – Companhia Paranaense de Energia Elétrica ou empresas terceirizadas.

3.1.1 Quantificação dos resíduos de plantios florestais de *Pinus sp.* e *Eucalyptus sp.*

Para quantificar a biomassa residual gerada devido à exploração dos plantios florestais de *Eucalyptus sp.* e *Pinus sp.* no estado do Paraná, foram utilizados os dados de produção da indústria madeireira paranaense levantada pela Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas - ABRAF (2013) e do mapeamento realizado por Eisfeld e Nascimento (2015). Os dados foram interpolados com levantamentos de sortimento da madeira realizados

por Szymczak (2015) para o *Pinus sp.* e, por Dorini (2015) para o *Eucalyptus sp.*, que quantificaram os compartimentos dessas espécies.

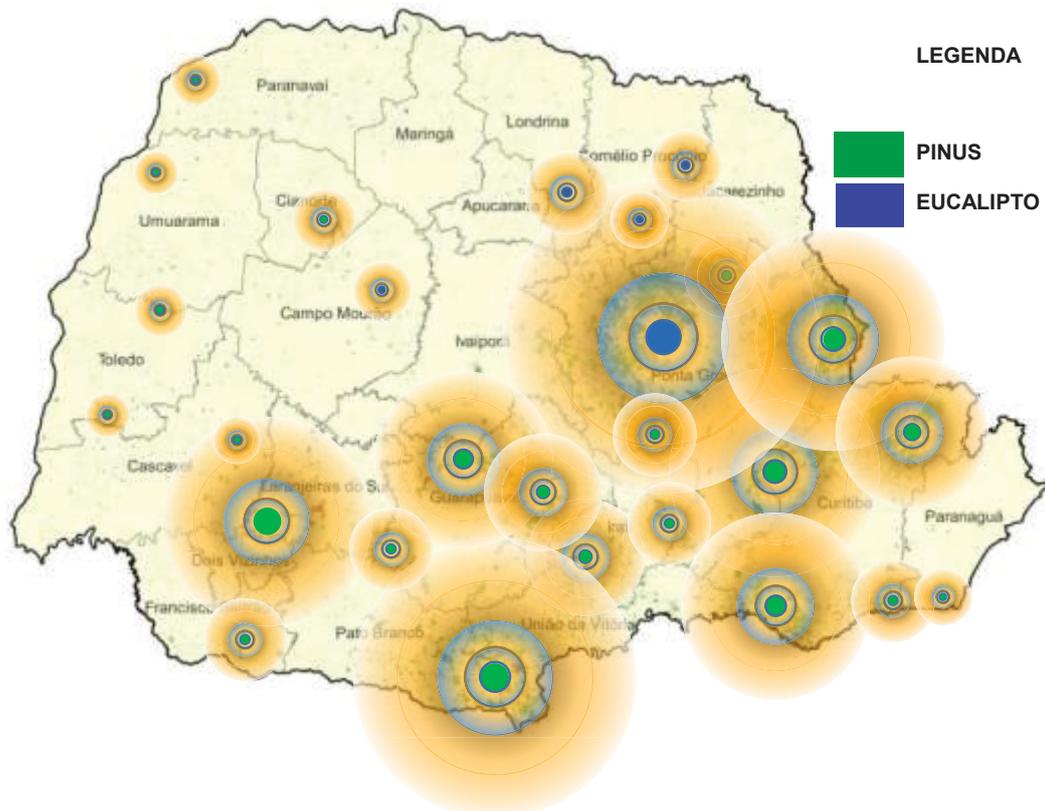
A área total de plantios florestais paranaenses de acordo com Eisfeld e Nascimento (2015), era de 1.066.479 hectares, a qual representava aproximadamente 5,4% da área do estado. O gênero *Pinus* se destacava como o de maior representatividade, com 61,3%. O gênero *Eucalyptus* abrangia 31,9%, conforme TABELA 13. A distribuição gráfica da área total plantada por gênero, ilustrada na FIGURA 16, indica a abrangência média de suprimento de biomassa residual para geração de energia, sendo que, o diâmetro das circunferências representam a abrangência regional.

TABELA 13 – ÁREA TOTAL DE PLANTIOS DE *Pinus sp.* E *Eucalyptus sp.* NO ESTADO DO PARANÁ NO ANO DE 2013

	Madeira de corte	<i>Eucalyptus sp.</i>	<i>Pinus sp.</i>	Total
Área total (ha)	72.598	340.315	653.566	1.066.479
%	6,8%	31,9%	61,3%	100,0%

FONTE: ABRAF (2013).

FIGURA 16 – MAPA DOS PLANTIOS FLORESTAIS NO PARANÁ

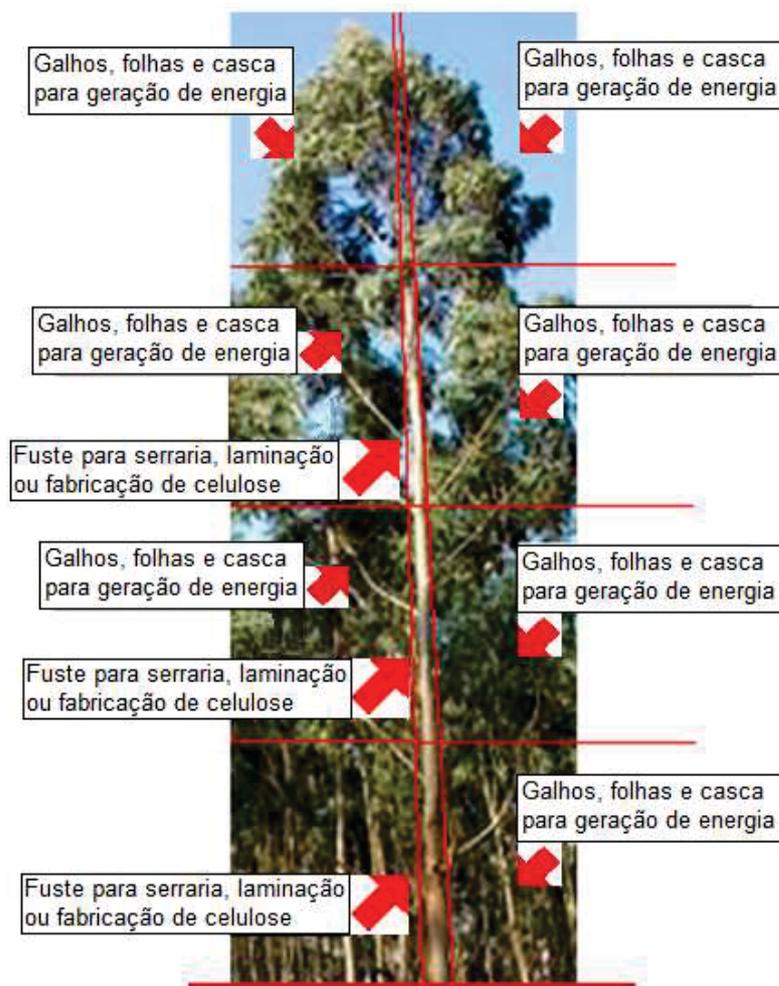


FONTE: Adaptado de EISFELD e NASCIMENTO (2015).

Segundo os mesmos autores anteriormente citados, a região Centro-Sul correspondia à maior área de plantios paranaenses (83,6%). Nesta região se localizavam as grandes empresas madeireiras, abrangendo as inúmeras indústrias que compunham o setor florestal do Estado como, por exemplo, serrarias, fábricas de painéis, celulose, papel, moveleira, energia, dentre outros.

Quanto ao corte de árvores destinadas às indústrias madeireiras, o desbaste dos troncos era realizado na própria floresta, local de onde se retiravam os fustes para beneficiamento industrial. Neste caso, entre uma indústria e outra, existiam muitas diferenças de processos para o desbaste dos fustes. Geralmente era realizada manualmente, com motosserras, machados e outros equipamentos mecanizados. Para fins ilustrativos a FIGURA 17 indica uma árvore de *Eucalyptus sp.*, seccionada em suas diversas partes para aproveitamento industrial, energético ou outro.

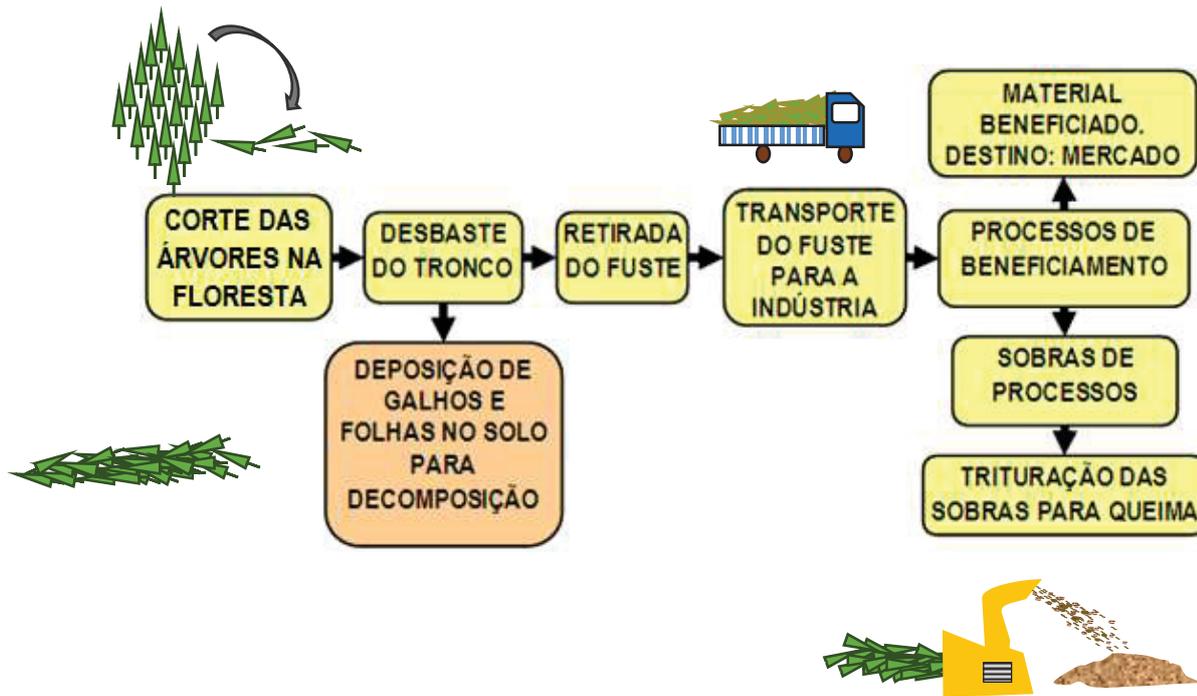
FIGURA 17 - IDENTIFICAÇÃO DO CORTE DE *Eucalyptus sp.* PARA A INDÚSTRIA DE CELULOSE, LAMINAÇÃO, SERRARIA OU GERAÇÃO DE ENERGIA



FONTE: O autor (2013).

A FIGURA 18 apresenta as etapas mais usuais de procedimentos em plantios florestais, desde o corte das árvores na floresta, limpeza e retirada dos fustes e destinação de árvores e resíduos.

FIGURA 18 - FLUXOGRAMA MAIS USUAL DE PROCEDIMENTOS NO DESBASTE DE ÁRVORES DESTINADAS À INDÚSTRIA



FONTE: O autor (2016).

3.1.2 Quantificação e qualificação dos resíduos da poda urbana gerados na cidade de Pato Branco

Para os procedimentos de quantificação e qualificação da poda urbana, se realizou levantamentos de geração de resíduos de poda com dados fornecidos pela Prefeitura Municipal e levantamentos dendrométricos e estatísticos com interpolações de dados que foram levantados *in loco* e dados fornecidos por Puhl et al. (2012).

No levantamento realizado pela Prefeitura Municipal durante os meses de poda, foi realizada a pesagem sistemática de quantidade significativa de caminhões que transportavam resíduos ainda verdes até o destino final. Suas capacidades eram de 6,5 m³ e tara média de 6.365 quilogramas. Somou-se também, a biomassa obtida pela concessionária de energia, a qual realizava a poda corretiva em árvores localizadas abaixo ou próximas à fiação urbana.

A Prefeitura Municipal também realizou a poda de adequação e conformação da copa de 17 árvores que estavam abaixo da fiação elétrica, sendo que 70,1% eram da espécie

Ligustrum sp., com o DAP entre 20 e 40 centímetros e porte considerado como médio, FIGURA 19. Oportunizou-se ali para quantificar e qualificar o que se gera de biomassa residual em cada indivíduo com essas características. A pesagem total foi obtida com uma balança instalada na entrada do aterro sanitário, quando o caminhão se dirigia para o descarte da poda.

FIGURA 19 - A PODA DE *Ligustrum lucidum* NA CIDADE DE PATO BRANCO

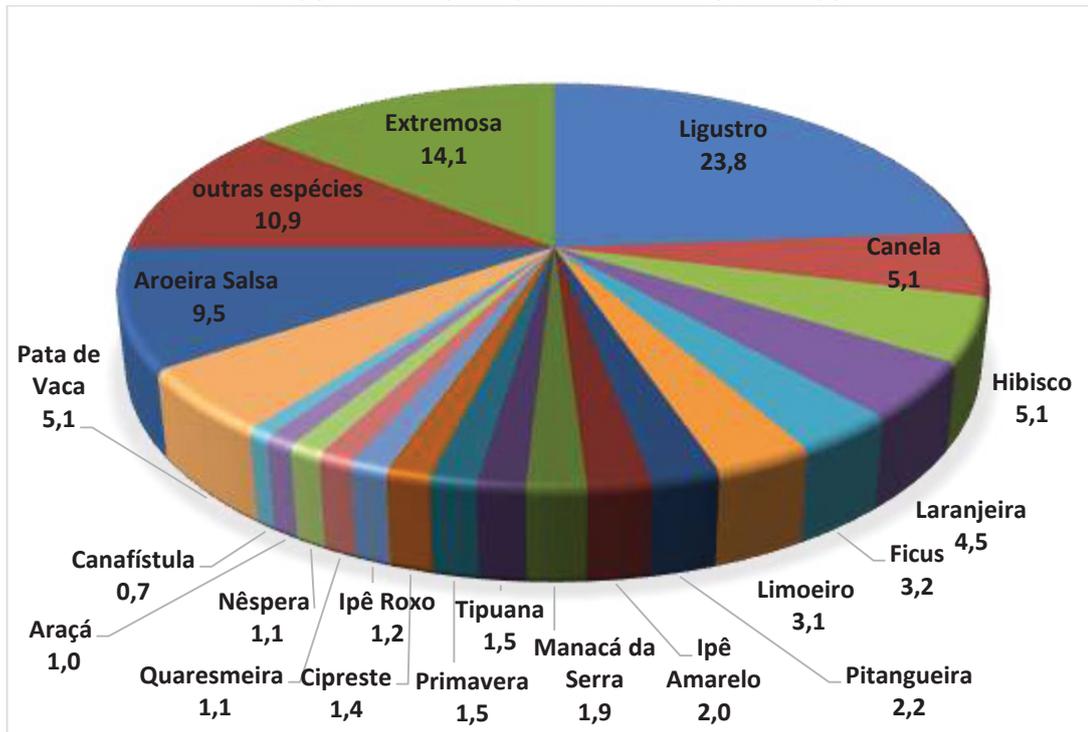


FONTE: O autor (2016).

Dentre as espécies de árvores mais encontradas nos logradouros públicos na cidade de Pato Branco, a FIGURA 20 apresenta, em nível percentual, as 20 mais encontradas. Dentre elas, de acordo com Puhl et al. (2012), 70,83% eram exóticas e 29,17% nativas.

Destas espécies, foram selecionadas aquelas que geravam a maior quantidade significativa de biomassa residual nesta cidade, e assim, algumas, apesar de terem maior quantidade de indivíduos que outras espécies estudadas, foram ignoradas por não gerarem quantitativamente resíduos para realizar o estudo. Como exemplo destas espécies estão: canela, hibisco, laranjeira, ficus, limoeiro, pitangueira, ipê amarelo e manacá da serra.

FIGURA 20 - RELAÇÃO PERCENTUAL DE 20 ESPÉCIES DE ÁRVORES URBANAS MAIS ENCONTRADAS NA CIDADE DE PATO BRANCO



FONTE: Adaptado de PUHL ET AL. (2012).

Para a estimativa quantitativa em peso e volume da disponibilidade de resíduos que a cidade poderia fornecer futuramente a cada ano, foram realizados levantamentos dendrométricos de amostragem significativa de indivíduos localizados nos logradouros públicos (89 árvores) e a utilização de procedimento de regressão linear múltipla, chamado de regressão *stepwise*, interpolando dados de quantificação das espécies que mais geravam resíduos no perímetro urbano de Pato Branco. No processo *backward* considerou-se todas como variáveis no modelo. Após isso, as não significativas foram retiradas uma a uma de acordo com o maior valor de “p”. Foram designadas como variáveis dependentes aquelas que se pretendia fazer estimativa de valores interpolados com o volume e a massa total e, como variáveis independentes, aquelas levantadas em campo, como altura, diâmetro e quantificações.

Após obter estas variáveis, interpolou-se com os levantamentos quantitativos e qualitativos realizados por Puhl et al. (2012), conforme a ficha de campo na TABELA A1 no APÊNDICE 1, dentre os 45.470 indivíduos localizados no perímetro urbano de Pato Branco. A partir dali, foram encontrados os resultados de peso e volume disponível, prevendo o abastecimento e suprimento futuro da biomassa.

O resultado indica os valores de ajustamento do modelo de regressão múltipla *stepwise*, para descrever a relação entre os diferentes parâmetros. Uma vez que a P-valor na tabela ANOVA for inferior a 0,05, mostra a existência de uma relação estatisticamente

significativa entre as variáveis no intervalo de 95,0% no nível de confiança. O erro padrão de estimativa mostra o desvio padrão dos resíduos. Este valor constrói limites de predição para novas observações selecionando a opção de relatório a partir do menu de texto. A média absoluta de erro (mae), indica o valor médio dos resíduos. O “dw”, estatística de durbin-watson, testa os resíduos para determinar se houve alguma correlação significativa com base na ordem em que ocorreram no arquivo de dados.

Dentre o estudo dendrométrico, utilizado como uma das ferramentas para estimar a disponibilidade futura de biomassa que poderia ser fornecida pelos logradouros públicos e plantios florestais e avaliar possibilidades futuras de expansão ou desenvolvimento de atividades relacionadas à coleta de biomassa, foram levados em consideração:

- a) Para os levantamentos de campo, foi utilizada uma ficha de campo conforme as TABELAS A1 e A2 no APÊNDICE 1 e aparelhos apropriados para cada medição, conforme recomendam Batista, Couto e Silva (2014);
- b) Para o diâmetro na altura do peito - DAP, foi utilizada suta, conforme a FIGURA A1 no APÊNDICE 2, com medições a 1,3 metros da base da árvore, determinado pela equação (2.4):

$$DAP = \frac{dM+dm}{2} \quad (2.4)$$

Sendo:

dM – diâmetro maior

dm – diâmetro menor

- c) Para o levantamento de altura da árvore, altura de copa e comprimento dos galhos verticais, foram utilizados trena de aço, conforme a FIGURA A2 no APÊNDICE 2 e clinômetro. A equação (2.5) foi utilizada para a determinação das alturas utilizando o clinômetro, FIGURA 21:

$$h = h_c + h_{bc} = D_{OA}(tg \alpha + tg\beta) \quad (2.5)$$

Sendo:

D_{OA} – distância do observador à árvore;

- h – altura total da árvore;

- h_c – altura da copa;

- h_{bc} – altura até a base da copa.

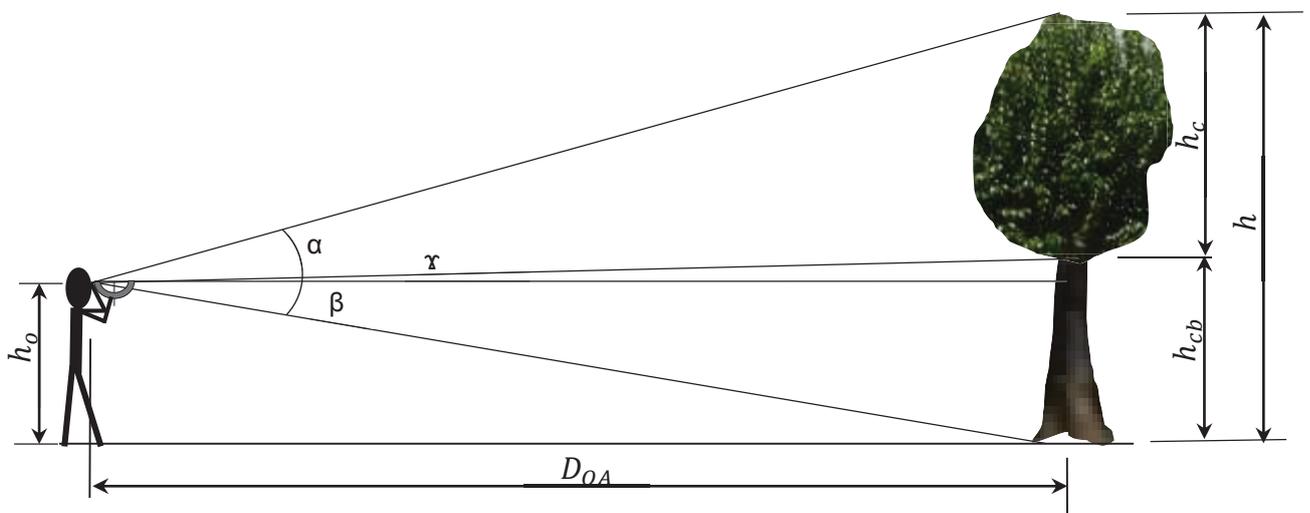
Eventualmente, diante da impossibilidade de se medir o D_{OA} , empregou-se a equação (2.6):

$$h = \frac{h_o(tg\alpha + tg\beta)}{tg\beta} \text{ e } D_{OA} = \frac{h_o}{tg\beta} \quad (2.6)$$

Onde:

- h_o – altura até o olho do observador.

FIGURA 21 – MEDIÇÃO DA ALTURA DE ÁRVORES COM A UTILIZAÇÃO DE CLINÔMETRO



FONTE: O autor (2016).

- d) Para o levantamento de diâmetro de copa foi utilizada a medição de projeção da sombra no solo, conforme a FIGURA A2 no APÊNDICE 2 e levantamento fotográfico com medição de escala em superfície plana, que consistia em medir a projeção em fotografias de papel ou na tela do computador;
- e) Para o comprimento dos galhos inclinados ou horizontais foi utilizado levantamento fotográfico com medição de escala em superfície plana;
- f) Para o diâmetro dos galhos finos, foi utilizado paquímetro e para o número de galhos, foram contados um a um;
- g) Para medir o diâmetro de galhos podados, foram utilizados paquímetro e trena de aço, conforme a FIGURA A2 no APÊNDICE 2;
- h) Para a pesagem, foi utilizada balança digital eletrônica com gancho, faixa de medição de cinco gramas a 45 quilogramas, conforme a FIGURA A3 no APÊNDICE 2.

3.2 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA BIOMASSA

O uso da biomassa residual para fins energéticos tem estrita dependência das características tecnológicas da madeira, fundamentadas em suas propriedades físicas, químicas e mecânicas.

As propriedades físicas consideradas neste estudo foram a granulometria, massa específica, densidade aparente e real, teor de umidade e poder calorífico. As químicas foram a análise imediata (determinação de voláteis, cinzas e carbono fixo) e análise elementar (determinação de elementos químicos presentes na biomassa, análise somativa - teor de lignina, celulose e hemicelulose) e as mecânicas, as tensões de cisalhamento.

3.2.1 Determinação das propriedades físicas da biomassa

a) densidade aparente

Para a determinação da densidade aparente de cavacos, foi utilizado o densímetro, que é um equipamento normatizado pela NBR 14984 de setembro de 2003, conforme FIGURA A4 no APÊNDICE 2. Quantidades significativas de amostras foram inseridas no densímetro e sujeitas ao impacto de uma massa controlada, onde se mediu a altura final para calcular o volume e posteriormente, a densidade.

b) granulometria

Para determinar a granulometria, foi empregada a norma NBR 7402 de julho de 1982, com o método de peneiras mesh utilizando a série Tyler. Para o cavaco, que é formado por partículas com formato irregular, se empregou o conceito de tamanho equivalente, determinado pela medida de uma propriedade que depende do tamanho da partícula, relacionando-a com uma dimensão linear.

Após a pesagem, foram acondicionadas na sequência de peneiras com aberturas de 22, oito, quatro e dois milímetros, sendo agitadas por cinco minutos e novamente pesados e quantificados.

c) teor de umidade

Para determinar o teor de umidade em base seca, três amostras de cada - folhas, galhos, casca, sementes e flores, após o corte e pesagem, foram inseridas na estufa marca NOVA ÉTICA modelo 400N, conforme a FIGURA A5 no APÊNDICE 2, a $103 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, até atingir peso constante, como determinado pela NBR 7190/97 pela equação (3.1). Em seguida, resfriados em dessecadores, triturados parcialmente e submetidos a uma nova pesagem, onde o

teor de umidade corresponde à relação entre a massa da água nela contida e a massa da biomassa seca.

As amostras de cavacos, coletadas nas leiras em campo também passaram por esse procedimento de pesagem e secagem.

A umidade média das amostras foi determinada a partir das equações (3.1) e (3.2) apresentadas no QUADRO 4:

QUADRO 4 – EQUAÇÕES DA UMIDADE MÉDIA

EQUAÇÃO	NÚMERO DA EQUAÇÃO
$\bar{W}_s = (M_u - M_s)/M_s$	(3.1)
$\bar{W}_u = (M_u - M_s)/M_u$	(3.2)

FONTE: BATISTA, COUTO e SILVA (2014).

Onde:

- M_u : massa da amostra úmida;
- M_s : massa da amostra seca;
- \bar{W}_u : umidade média em base úmida;
- \bar{W}_s : umidade média em base seca.

As balanças eletrônicas digitais utilizadas para a pesagem das amostras de cavaco foram:

- marca Powerpack, modelo Pw520, com prato. Precisão de 0,1 gramas e faixa de medição de até 1250 gramas;
- marca Balmak, modelo Actilife, com prato. Precisão de um grama e faixa de medição de até 5.000 gramas e;
- marca AzPR, modelo W45, com gancho. Precisão de cinco gramas e faixa de medição de até 45 quilogramas.

d) poder calorífico

As espécies analisadas para determinar o poder calorífico foram de *Ligustrum lucidum*, *Schinus molle*, *Schinus terebinthifolius*, *Cassia fistula*, *L.*, *Lagerstroemia indica* e *Tipuana tipu*. Para o *Eucalyptus sp.*, o *Pinus sp.* e as outras espécies, foram utilizados dados de autores diversos encontrados nas bibliografias. Para cada espécie analisada, foram coletadas três amostras e separadas em compartimentos entre galhos, aqui denominados de finíssimos (diâmetros menores que um milímetro), finos (diâmetros entre um e cinco milímetros), médios

(diâmetros entre cinco e 12 milímetros) e grossos (diâmetros entre 12 e 70 milímetros), folhas, casca, semente e flores. Estas duas últimas, quando eram encontradas nas árvores.

Para determinar o poder calorífico, foi realizado ensaio com calorímetro da marca IKA Werke modelo C-5000 (FIGURA A6 no APÊNDICE 2). Neste procedimento, antes de inserir no aparelho, as amostras foram previamente trituradas com moinho de faca da marca IKA modelo A-11 e secas em estufa. As normas para sua determinação foram da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT/NBR), que segue as normas da ASTM (American Society for Testing Materials) números D 407-44, D 271-58 e D 240-57 T.

Para os cálculos do potencial energético da biomassa, balanço de massa e rendimentos, foi utilizado o poder calorífico útil – PCU, obtido a partir do poder calorífico inferior – PCI, subtraindo o teor de umidade em base seca presente na biomassa, conforme a equação (3.1) no QUADRO 5.

O poder calorífico inferior foi calculado com base no teor de hidrogênio presente na biomassa, utilizando os dados a partir do PCS, poder calorífico superior. Para transformar o valor do PCS em PCI, considerou-se a vaporização da água que se formou e daquela que já se achava no combustível na forma de umidade. O calor de vaporização da água (a 20 °C e volume constante) é igual a 554 cal/g. Assim, para calcular o PCI, a pressão constante, conforme a equação (3.2) no QUADRO 5, foi subtraído 554 mH₂O do PCS, sendo mH₂O a massa de água formada ou já presente no combustível, em gramas, por unidade de massa de combustível:

Para obter os valores do poder calorífico superior da biomassa, além do ensaio de calorimetria, pode-se também utilizar a equação (3.3) no QUADRO 5, *e.g.* Wylen, Sonntag e Borgnakke (2013):

QUADRO 5 – EQUAÇÕES DO PODER CALORÍFICO

EQUAÇÃO	NÚMERO DA EQUAÇÃO
$PCU = PCI - (\bar{W}_s * 6) / (\bar{W}_s + 100) * 100$	(3.1)
$PCI_{Pcte} = PCS_{Pcte} - 554 \text{ mH}_2\text{O} = PCS_{Vcte} - 554\text{mH}_2\text{O} - \Delta nRT/m$	(3.2)
$PCS_{Vcte} = -\Delta E/m$	(3.3)
$PCS_s = PCS_u / (1 - w_o)$	(3.4)

FONTE: WYLEN, SONNTAG e BORGNAKKE (2013).

Onde:

- PCU - Poder calorífico útil;
- PCI - poder calorífico inferior;

- PCI_{Pcte} - poder calorífico inferior a pressão constante;
- PCS_{Pcte} - poder calorífico superior a pressão constante;
- PCS_{Vcte} - poder calorífico superior a volume constante;
- PCS_S - poder calorífico superior em base seca (kJ/kg);
- PCS_u - poder calorífico superior em base úmida (kJ/kg);
- ΔE - variação de energia interna;
- m - massa do combustível;
- \bar{W}_s - umidade média em base seca;
- w_o - conteúdo de umidade da biomassa (kg água/kg de biomassa).

3.2.2 Determinação das propriedades químicas da biomassa

a) análise química imediata

Para determinação da análise química imediata da biomassa, seguiu-se a metodologia das Normas NBR ASTM 8112 (Carvão Vegetal – Análise Imediata) e E 871, com a determinação do teor de voláteis, teor de cinzas e teor de carbono fixo.

Para a determinação do teor de voláteis, após a pesagem em balança de precisão, (FIGURA A7, APÊNDICE 2), e a secagem das amostras na estufa, foram acondicionadas em cadinho de porcelana e submetidas ao aquecimento de até 850° C por sete minutos, no forno mufla marca Marconi, modelo MA 385, (FIGURA A8, APÊNDICE 2), seguindo a metodologia da Norma NBR 8112 (Carvão Vegetal – Análise Imediata). Após este procedimento, a amostra foi colocada em um dessecador para resfriamento e pesagem. Os resíduos que resultaram após a extração dos voláteis, foram o carbono fixo, (FIGURA A9, APÊNDICE 2) e as cinzas (FIGURA A10, APÊNDICE 2). O teor de voláteis (T_v) foi determinado pela equação (3.3):

Para a determinação do teor de cinzas (T_c), de acordo com a Norma NBR 8112 (Carvão Vegetal – Análise Imediata) e D 1102 (NOGUEIRA, OLIVEIRA e FIEDLER, 2007), o material proveniente da etapa anterior, já sem umidade e voláteis, foi inserido na mufla (MA 385, marca Marconi) a uma temperatura de 710 °C, por um período de seis horas. Ao final, dentro do cadinho restaram somente cinzas, FIGURA A10 do APÊNDICE 2, resultantes da combustão dos componentes orgânicos e oxidação dos inorgânicos, determinado conforme a equação (3.4):

Após a determinação dos teores de umidade, de matéria volátil e de cinzas da amostra, o teor de carbono fixo (T_{cf}) foi determinado em porcentagem pela diferença entre os valores do teor de voláteis (T_v) e teor de cinzas (T_c), a partir da equação (3.5), QUADRO 6:

QUADRO 6 – EQUAÇÕES DO TEOR DE VOLÁTEIS, CINZAS DE CARBONO FIXO

EQUAÇÃO	NÚMERO DA EQUAÇÃO
$T_v = \left(\frac{m_2 - m_3}{m_3} \right) 100$	(3.3)
$T_c = \left(\frac{m_3 - m_4}{m_3} \right) 100$	(3.4)
$T_{cf} = 100 - (T_v + T_c)$	(3.5)

FONTE: NOGUEIRA, OLIVEIRA e FIEDLER (2007).

Onde:

- T_{cf} : teor de carbono fixo;
- T_v : teor de voláteis;
- T_c : teor de cinzas;
- m_2 : massa final do teor de umidade (gramas);
- m_3 : massa final depois da mufla (gramas);
- m_4 : massa final de cinzas (gramas).

b) análise elementar

Devido à falta de equipamentos para realizar a determinação dos componentes elementares da biomassa, foram utilizados dados de autores diversos em relação às espécies estudadas.

3.2.3 Determinação das propriedades mecânicas: cisalhamento da madeira

Testes exploratórios foram realizados com a finalidade de quantificar e comparar as diferenças médias de tempo e energia para o corte ou trituração de galhos verdes recém podados e para galhos secos de *Ligustrum lucidum* com umidade de equilíbrio de 13,8%. Assim, foi desenvolvido uma técnica para indicar esta diferença de tempos e dificuldades no corte entre esses galhos, onde amostras com 70 milímetros de diâmetros, três de secas e três de verdes, foram condicionadas ao corte transversal em eletrosserra, da marca Tekna conforme a FIGURA A11 no APÊNDICE 2, modelo ES 1850, potência de 1.800 W, sabre de 40 centímetros, corrente de aço rápido, rotação do motor de 7.600 rpm (rotações por minuto), 57 dentes, pinhão de 6 dentes, velocidade da corrente de 14 m/s e distância do eixo das amostras até o eixo de rotação da eletrosserra, com 16,5 centímetros.

Na eletrosserra, para manter a mesma força durante o corte, foi adaptado um torquímetro de estalo da marca Gedore, FIGURA A11, modelo Robust, com capacidade de 10 a 50 Nm (newton metro), resolução de 0,1 Nm, precisão de $\pm 3\%$, com indicador sonoro para quando o torque fosse atingido. O torque atingido durante os procedimentos foi de 19 Nm para todos os experimentos, considerando o momento fletor formado pela força aplicada em relação à distância do eixo das amostras até o eixo de rotação da eletrosserra.

Assim que a eletrosserra atingisse a rotação nominal, iniciava-se a operação de corte das amostras com a cronometragem do tempo.

Os diâmetros de 70 milímetros dos galhos foram escolhidos por serem as maiores médias de diâmetros encontradas entre os resíduos de poda estudados e também os que teriam maior dificuldade de transformá-los em cavaco. A escolha do modelo da eletrosserra e do torquímetro foi devido a esses equipamentos estarem disponíveis no laboratório para realizar os testes. A escolha do torque de 19 Nm foi devido às condições operacionais com maior controle para se efetuar o corte.

3.3 MONITORAMENTO DA SECAGEM NATURAL DA BIOMASSA

Gracia, Velázquez-Martí e Estornellec (2014) citam que, dependendo das taxas de umidade na biomassa, poderiam ser afetados significativamente o poder calorífico e os custos de transporte, manuseio, laboração, beneficiamento, entre outros. Complementam Yoshioka et al. (2006), que a umidade também interfere na densidade, onde não está por si só associada à qualidade energética para uso em fornalhas, mas também à quantidade de água livre presente em seu interior que, não precisaria ser transportada desnecessariamente por longas distâncias ou ao longo do percurso.

Considerando essa realidade, por recomendação de Velázquez-Martí e Annevelink (2009), foram desenvolvidas técnicas que determinassem o armazenamento e disponibilização mais adequados para a secagem da biomassa *in natura* ou triturada. Para isto, foi preciso determinar as taxas de secagem das leiras formadas pelos resíduos das diferentes espécies de árvores após o corte e também levantar dados e determinar equações das curvas características da perda de umidade envolvendo cada tipo de resíduo estudado e as variáveis mais significativas que poderiam interferir em sua secagem, como por exemplo, formas de disposição, compactação, temperatura, umidade relativa do ar, condições climáticas e área superficial exposta.

Monitorou-se a secagem natural de diferentes fontes de biomassa residual, considerando a água livre ou de capilaridade, até atingir a umidade de equilíbrio em condições ambientais. Foi dado maior ênfase aos métodos de secagem natural ou ao ar livre à baixa temperatura, em que consistia em deixar a biomassa em ambiente protegido ou exposto à ação dos fatores climáticos de um determinado local, porque, segundo Kasmoui e Ceulemans (2013), é um método que exige um investimento relativamente baixo, porém longo tempo de secagem. Na prática, foi o mais indicado para secagem da biomassa para esses fins.

A biomassa utilizada, árvores das espécies de ligustro (*Ligustrum lucidum*), aroeira salsa (*Schinus molle*), aroeira mansa (*Schinus terebinthifolius*), tipuana (*Tipuana tipu*), extremosa (*Lagerstroemia indica*), canafístula (*Cassia fistula, L.*), cipreste (*Cupressus sempervirens*) e, em plantios florestais paranaenses, como o eucalipto (*Eucalyptus sp.*) e o pinus (*Pinus sp.*), foram assim escolhidas por serem as espécies mais comumente encontradas em plantios florestais paranaenses e em logradouros públicos na cidade de Pato Branco-PR.

Por condições logísticas e operacionais, as amostras foram coletadas dentro do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná - UFPR, em Curitiba. Logo após ao corte dos galhos das árvores, foram pesadas e disponibilizadas em duas condições: *in natura*, ou seja, ainda na forma de compartimentos, conforme as FIGURAS A12 e A13 no APÊNDICE 2 e triturada, na forma de cavaco, conforme a FIGURA A14. A prefeitura do Centro Politécnico dispunha de um espaço ao lado do estacionamento para depositar todos os resíduos de poda coletados dentro do próprio Câmpus, em terreno aberto, expostos ao sol, chuva e ventos conforme a FIGURA A15 no APÊNDICE 2. Outro espaço disponibilizado foi dentro do laboratório, na sombra, conforme a FIGURA A16 no APÊNDICE 2.

Os resultados levaram à determinação das curvas características que foram utilizadas na avaliação das taxas de secagem e da umidade residual monitoradas ao longo de dois anos e também nos cálculos de poder calorífico, na logística de manuseio e transporte da biomassa.

3.3.1 Preparação das amostras de galhos para monitorar sua secagem

Em um lote, amostras de *Ligustrum lucidum* e *Cupressus sempervirens* na forma de compartimentos (galhos finos, casca, folhas, sementes e flores), foram pesadas, enfardadas e armazenadas em terreno aberto, sujeito às intempéries, no Centro Politécnico.

O *Ligustrum lucidum* foi dividido em cinco fardos e o *Cupressus sempervirens*, em dois, FIGURA A12 e FIGURA A13 no APÊNDICE 2. Foram deixados amontoados em formato semi piramidal, com 107,8 quilogramas, 1,2 metros de altura, 1,8 metros de largura por 2,6

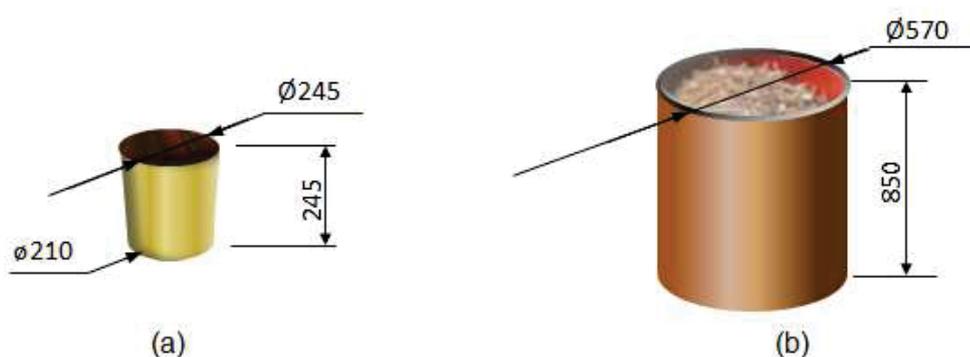
metros de comprimento para o *Ligustrum lucidum* e com 50,3 quilogramas, 0,5 metros de altura, 1,6 metros por 1,2 metros na base para o *Cupressus sempervirens*.

Para obter as taxas de secagem ao longo do tempo, inicialmente, nos primeiros 15 dias, as medições de massa foram diárias e em seguida, se tornou semanal. O monitoramento durou mais de um ano, mas pelo fato de se perceber que a perda de umidade havia se estabilizado, apenas foram utilizados os registros de até 125 dias, desde o dia 3 de junho (final de outono) até o dia 6 de outubro de 2014 (início de primavera), datas próximas ao início e final de temporada da poda urbana. Os dados foram inseridos em planilhas e em gráficos para facilitar a visualização do decréscimo da massa ao longo do tempo.

Em outro lote, após a pesagem, amostras de compartimentos de *Ligustrum lucidum*, *Schinus molle*, *Eucalyptus sp.* e de *Pinus sp.*, com diâmetros médios de até 70 milímetros e comprimentos de até três metros, foram levadas ao laboratório, na sombra. Estas dimensões foram assim escolhidas pela similaridade entre as características dos resíduos de plantios florestais e da poda urbana gerada pelos órgãos públicos.

Na sequência, foram separados seus compartimentos entre caule, cascas, folhas, sementes e flores e pesados novamente cada fração. Os galhos de cada espécie, aqui chamados de finíssimos, com menos de um milímetro de diâmetro, foram separados dos finos com diâmetro de 1 a 5 milímetros, dos médios, com 5 a 12 milímetros e dos grossos, com diâmetros de 12 a 70 milímetros. Após separados por categorias de diâmetros e espécies, foram pesados, deixados para secagem natural e monitorados por um período de mais de 180 dias. As folhas, cascas e sementes, separadas por espécies, ficaram depositadas em recipientes cilíndricos e tronco-cônicos com medidas variáveis, conforme Figura 22, também monitorados por um período de mais de 180 dias.

FIGURA 22 - RECIPIENTES PARA ACONDICIONAR AMOSTRAS PARA SECAGEM NO LABORATÓRIO: (a) BALDE E (b) TONEL



FONTE: O autor (2015).

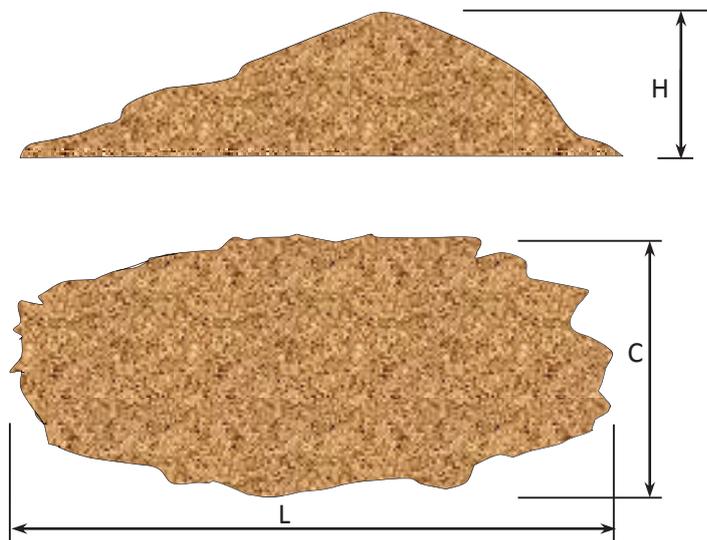
3.3.2 Monitoramento da secagem de cavacos

Para avaliar a influência das intempéries nas taxas de secagem do cavaco depositado em leiras em terreno aberto, expostas ao sol, chuva e ventos, um lote de biomassa formada por diferentes espécies recém coletadas de árvores aqui estudadas, foram pesadas, trituradas e deixadas em ambiente aberto no Centro Politécnico. A leira tinha formato similar a um cone com base semi elíptica, cujas dimensões médias estão representadas na FIGURA 23. Suas taxas de variação de umidade foi monitorada ao longo do período de dois anos, desde setembro de 2013 até setembro de 2015.

FIGURA 23 – DIMENSÕES DA LEIRA DE CAVACO DEPOSITADO NO PÁTIO DA UNIVERSIDADE

Onde:

- H = 1,6 m;
- L = 4,2 m;
- C = 3,0 m;



FONTE: O autor (2014).

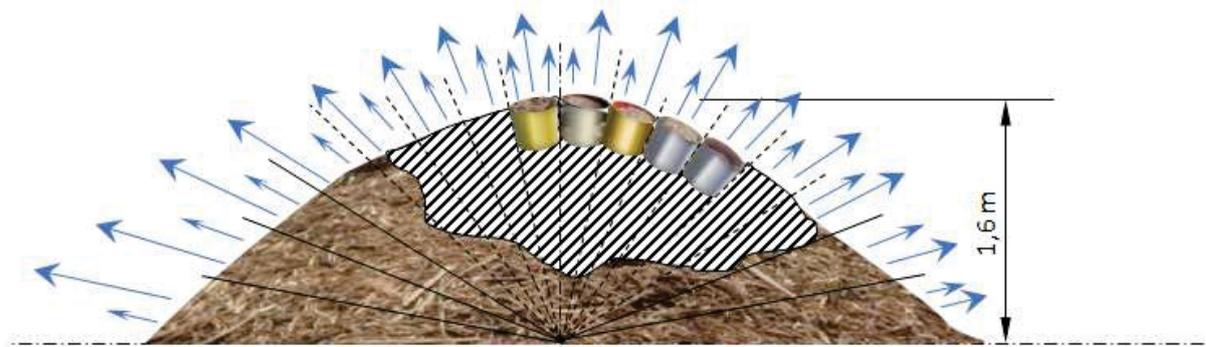
Com a finalidade de simular e monitorar a secagem da camada superficial de leiras em ambientes protegidos das intempéries e de como esta secagem se comportaria nesses ambientes, em diferentes profundidades e alturas, outro lote de amostras de cavaco de *Ligustrum lucidum*, retirado das leiras do pátio, com umidade de 37,9% em base úmida, FIGURA A17, foi pesado e depositado no LEIS, FIGURA A16, APÊNDICE 2, dentro de recipientes cilíndricos e recipientes tronco-cônicos, - tonéis e outros com dimensões menores, com diferentes diâmetros e alturas, abertos na parte superior, conforme FIGURA 22, anteriormente citada.

Esse ambiente era isolado, monitorado com termohigrômetro, sem incidência solar direta, protegida dos ventos e sem correntes convectivas forçadas. Registrou-se diariamente a variação de peso de cada amostra com balança de precisão de 0,1 gramas, durante um período de 13 meses, desde setembro de 2014 até outubro de 2015. As temperaturas variaram no período

de monitoramento, entre 18 e 27 °C e a umidade relativa do ar entre 44 a 95%, sendo que em 92% do período estudado, as temperaturas variaram entre 21 a 24 °C e 60,3% da umidade relativa do ar no mesmo período ocorreram na faixa dos 75 a 95%.

Os recipientes com formato tronco-cônico, com 0,245 metros e altura de vértice dos cones de 1,6 metros, foram utilizados para simular a parte superficial da leira, como se estivessem em leiras de 1,6 metros de altura, que era a altura das que estavam no pátio da universidade, conforme FIGURA 24.

FIGURA 24 - SIMULAÇÃO DA PERDA DE UMIDADE NA LEIRA, TENDO COMO MODELO OS RECIPIENTES DAS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2015).

Em outra simulação de secagem, amostras de cavaco foram submersas em água até o ponto de saturação das fibras da madeira, conforme recomendação de Jankowsky e Galina (2013). Após a retirada da submersão, deixou-se escorrer por 10 minutos e acondicionou-se em recipientes com diferentes alturas e diâmetros:

- um lote de três recipientes com altura de 200 milímetros e 80 milímetros de diâmetro e massa de 679,1 gramas;
- um lote de recipientes com altura de 100 milímetros e 80 milímetros de diâmetro e massa de 189,7 gramas;
- um lote de recipientes com altura de 200 milímetros e 200 milímetros de diâmetro e massa de 1891 gramas;
- um lote de recipientes com altura de 100 milímetros e 200 milímetros de diâmetro e massa de 719,0 gramas;

O teor de umidade foi determinado em base úmida, isto é, o teor de umidade da amostra correspondia à relação entre a massa inicial nela contida e a massa após a evaporação de água no intervalo de tempo entre cada medição, dada pela equação apresentada no item 3.1.1, propriedades físicas da biomassa.

Os dados foram inseridos em planilhas, de acordo com as QUADROS A1 a A6 do APÊNDICE 1 e em gráficos para facilitar a visualização das taxas de secagem ao longo do tempo.

Durante o período de coleta de amostras das leiras, chamou atenção que, a partir de aproximadamente 30 centímetros de profundidade, havia uma zona com cavacos mais secos ao toque e coloração mais clara que os cavacos da zona superficial das leiras, conforme a FIGURA 25 a seguir e as FIGURAS A17 e A18 no APÊNDICE 2. Estas FIGURAS evidenciam esta fronteira pela diferença de coloração no cavaco, onde a coloração mais clara ao fundo da escavação, representa o cavaco mais seco.

FIGURA 25 - COLETA DE AMOSTRAS DE CAVACO DE PODA NA LEIRA



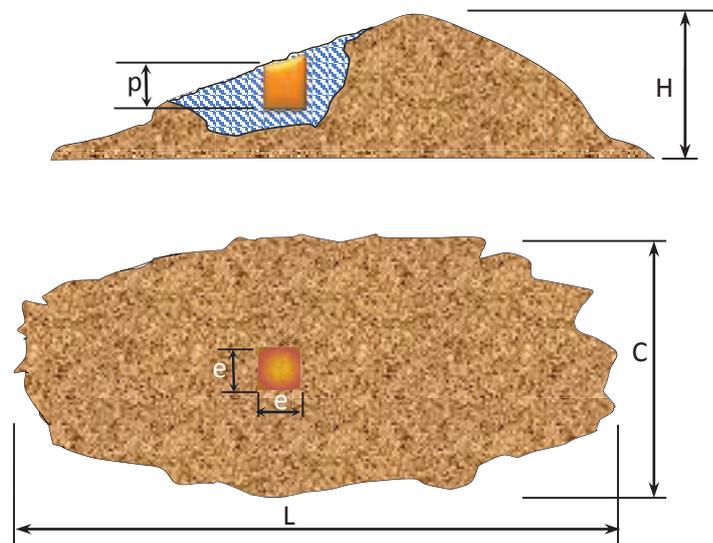
FONTE: O autor (2013).

Para comprovar e avaliar essa diferença de umidade entre a parte externa e a interna, após a formação da leira de cavaco no pátio, monitorou-se e inspecionou-se semestralmente, desde setembro de 2013 até setembro de 2015, para verificar se essa zona de variação de umidade se mantinha. Dali foram coletadas amostras realizando escavações com seções transversais quadradas de 35 por 35 centímetros e profundidade de até 45 centímetros, (FIGURAS 25 e 26). A cada coleta semestral, retirava-se seis amostras, duas dos 10 aos 20 centímetros de profundidade, duas dos 20 aos 30 centímetros e duas dos 30 até os 45 centímetros. Um lote de cada amostra, após pesado, foi deixado na estufa para a secagem e determinação das taxas de umidade. O lote de amostras coletadas entre os 10 e 20 centímetros da superfície, onde o cavaco aparentava estar úmido ao toque, totalizou 483,9 gramas. O lote de amostras coletadas em profundidade superior a 30 centímetros, onde o cavaco aparentava estar seco ao toque, 917,6 gramas.

FIGURA 26 – DIMENSÕES DAS CAVIDADES REALIZADAS NAS LEIRAS PARA RETIRADA DE AMOSTRAS

Onde:

- $H = 1,6$ m;
- $L = 4,2$ m;
- $C = 3,0$ m;
- $p = 45$ cm;
- $e = 35$ cm.



FONTE: O autor (2014).

Com o intuito de explorar este fenômeno e entender por que ocorre esta interface com diferença abrupta de umidade, foi realizado o seguinte experimento:

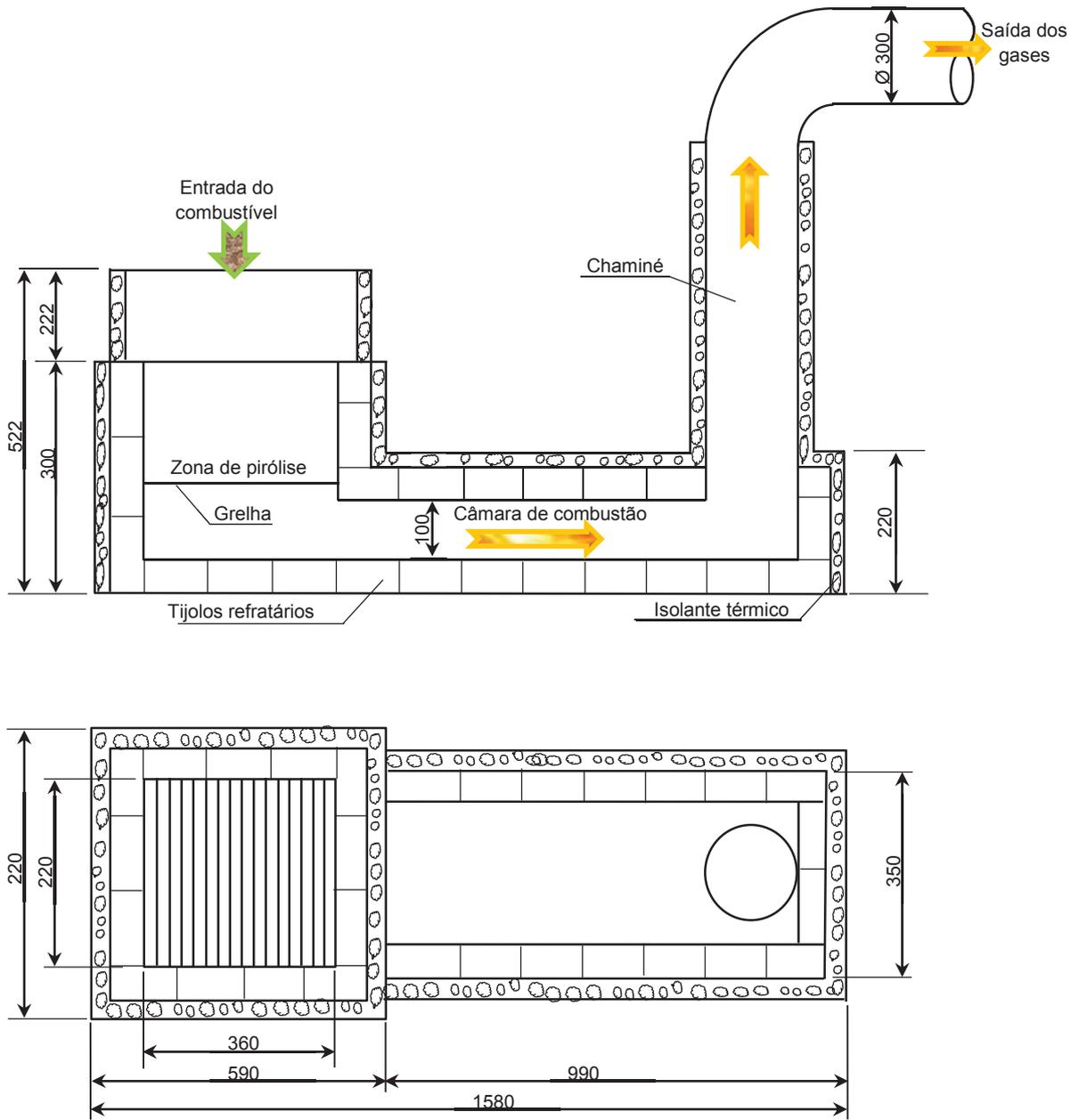
Em uma amostra de cavaco com umidade de 13,8% e área superficial de $0,13 \text{ m}^2$, espessura de 30 centímetros, com inclinação variável em 10, 20 e 30°, simulou-se pelo período de uma hora, chuva de 9,4 mm/h que, de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (2015), foram os níveis máximos de precipitação registrados na cidade de Curitiba, onde estava localizada a leira.

Nesta amostra, foram medidas as profundidades máximas que a água conseguiu percolar entre os interstícios do cavaco, a partir da sua superfície nas diferentes inclinações.

3.4 AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA COMBUSTÃO EM FORNALHA DE FLUXO COCORRENTE

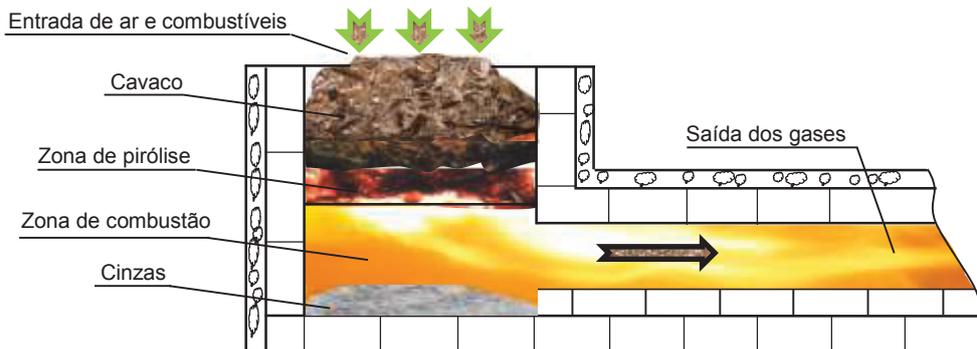
A fornalha de fluxo cocorrente que foi utilizada para realizar os estudos, conforme as FIGURA 11 da Seção 2.7, estava instalada no Laboratório de Eficiência Exergética na Indústria da Soja – LEIS, no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná e foi projetada para uma potência de 40 kW (contudo, durante os ensaios, chegou a mais de 140 kW térmicos). As FIGURAS 27 e 28 apresentam suas dimensões:

FIGURA 27 – DIMENSÕES DA FORNALHA – VISTAS LATERAL E SUPERIOR



FONTE: Adaptado de KLAUTAU (2008).

FIGURA 28 – DETALHAMENTO DAS FASES DE COMBUSTÃO DA BIOMASSA E ESCAPE DOS GASES NA FORNALHA



FONTE: O autor (2016).

3.5 TESTES DE QUEIMA (CORRIDAS)

A fornalha foi preparada para a realização dos testes de queima, as corridas, para obtenção de dados operacionais e as características dos gases e índices de temperaturas alcançadas. No total, foram realizadas cinco corridas, uma experimental e quatro definitivas, limitadas à disponibilidade de amostras para realizar os experimentos.

Para minimizar possíveis imprevistos, foi elaborada a seguinte rotina de corrida:

3.5.1 Rotina de corrida

PASSO 1 – PREPARAÇÃO

Procedimento 1 - segurança

- conferir material de segurança como:
- luva antitérmica;
- jaleco, avental ou macacão;
- óculos de proteção;
- extintor de incêndio e equipamentos antichama;
- ducha de emergência.

Procedimento 2 – preparação para a corrida

- registrar as taxas de umidade das amostras em relação à base seca;
- preparar os combustíveis para a corrida, tanto a lenha para aquecimento preliminar da fornalha, quanto as amostras de cavaco;
- registrar o peso das cargas de combustível.

Procedimento 3 - instrumentação

- verificar o posicionamento correto dos termopares;
- configurar arquivo do LabView;
- verificar se a sonda do analisador de gases estava posicionada corretamente na chaminé;
- configurar software do analisador de gases;
- verificar se os dados estavam sendo gravados e registrados.

PASSO 2: OPERAÇÃO

Procedimento 1 – partida da fornalha

- inserir a lenha na grelha para a combustão inicial de aquecimento da fornalha;

- dar a partida da fornalha com materiais combustíveis apropriados junto à lenha, como por exemplo, álcool e bastões inflamáveis;
- marcar o horário da partida;
- assim que a fornalha atingir a temperatura e condição de regime, inserir na grelha as amostras de cavaco para a queima;
- analisar e avaliar os resultados de temperatura e gases na combustão.

PASSO 3: ENCERRAMENTO

Procedimento 1 – desligamento dos equipamentos

- salvar os dados coletados;
- desligar todos os equipamentos como computador, cfp e analisador de gases;
- marcar a hora do encerramento.

Procedimento 2 – quantificação das sobras

- quantificar e qualificar a massa de cinzas e de carvão no cinzeiro;

Procedimento 3 – análise de resultados

- analisar todos os resultados das temperaturas e dos gases para preparar o relatório da corrida.

3.5.2 corrida experimental

A corrida experimental teve como principal finalidade a realização de um teste de procedimentos e simulação para os experimentos definitivos, proporcionando desta forma, a minimização de erros e contratempos nas corridas definitivas, já que, para realizá-las, a disponibilidade de matéria-prima era restrita. Sua função foi também importante para verificar as possíveis irregularidades na alimentação da fornalha, treinar seu manuseio e dos aparelhos a ela conectados e também para observar critérios organizacionais da área do experimento e possíveis riscos operacionais.

Nessa corrida, vários parâmetros foram testados, como por exemplo, o regime de alimentação do cavaco, as condições de entrada de ar, com excesso ou sem excesso, a variação na vazão mássica de combustível e os diferentes combustíveis a serem utilizados, como lenha, cavaco seco, cavaco úmido e cavaco com diferentes granulometrias. Devido à dificuldades enfrentadas nesta operação, em certos momentos a temperatura variava de forma descontrolada, não sendo possível, neste caso, manter seus níveis de forma homogênea.

3.5.3 corridas definitivas

Para definir as variáveis do planejamento experimental, nas sessões de corridas definitivas foram realizadas, com alimentação forçada ou natural de ar, a queima de diferentes variedades de biomassa, com variados regimes de alimentação, variadas quantidades no suprimento, variadas granulometrias e variadas taxas de umidade, conforme as TABELAS 14 e 15. As umidades a 14,2% e a 21,2% do cavaco foram atingidas a partir da secagem natural das amostras. A primeira, foi a umidade de equilíbrio das amostras e a segunda, a umidade que se encontrava o cavaco a partir de uma profundidade de 50 centímetros da superfície dos recipientes, toneis, onde foram deixados para secagem dentro do laboratório.

3.5.4 Matriz de planejamento

Para a organização dos experimentos foi elaborada uma matriz de planejamento, onde foram listadas todas as combinações realizadas entre as variáveis, juntamente com a resposta de interesse.

As TABELAS 14 e 15 apresentam a matriz de planejamento para os testes indicando as variáveis combustível, umidade, granulometria, alimentação e tiragem e seus correspondentes níveis para o presente trabalho. A TABELA 16 apresenta as variáveis resposta.

TABELA 14 – MATRIZ DE PLANEJAMENTO PARA OS TESTES, INDICANDO AS VARIÁVEIS E SEUS NÍVEIS

Variáveis	Níveis		
	-1	0	1
Combustível	-	Cavaco	Folhas
Umidade (% bs)	-	14,2	21,2
Granulometria	-	Grosseira	Fina
Alimentação (kg/h)	9	17	25
Tiragem	-	Induzida	Natural

FONTE: O autor (2016).

TABELA 15 – MATRIZ DE PLANEJAMENTO PARA OS TESTES, INDICANDO OS FATORES E NÍVEIS COM SUAS VARIÁVEIS

Número do teste	Fatores e níveis				
	Combustível	Umidade	Granulometria	Alimentação	Tiragem
1	0	0	0	1	0
2	0	1	0	1	0
3	0	1	0	0	0
4	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1
6	0	1	0	0	1
7	0	0	1	0	1
8	1	-	-	-1	0
9	1	-	-	-1	1
10	0	1	1	0	0
11	0	0	1	0	0
12	0	0	0	-1	1
13	0	0	0	-1	0
14	0	1	0	-1	1
15	0	1	0	-1	0
*	-	-	-	-	-

*Outras combinações não foram possíveis de serem efetuadas

FONTE: O autor (2016).

TABELA 16 – VARIÁVEIS RESPOSTA

Resposta de interesse	Símbolo	Unidade
Eficiência, cf. Eq. (3.7)	η	%
Temperatura de aproveitamento (T_2)	T_2	°C
Emissões de CO*	CO	ppm

FONTE: O autor (2016).

3.5.5 Preparo do combustível para as cinco corridas

A preparação do combustível para as corridas na fornalha seguiu os seguintes procedimentos: pesou-se previamente a lenha em toras e o cavaco que foram queimados. Utilizou-se primeiramente a lenha para o pré-aquecimento da fornalha que, mesmo não fazendo parte do estudo, foi determinado seu teor de umidade em base seca, pesada e separada em lotes de 1.000 ± 10 gramas.

Quanto aos lotes de cavaco que foram utilizados nas corridas, após pesagem e retirada de amostras para a quantificação da umidade, uma parcela foi acondicionada em recipientes plásticos (caçambas) pesando 1.000 ± 1 gramas, sem separação granulométrica, conforme a FIGURA A19 no APÊNDICE 2. Outra parcela foi peneirada em malhas de 20 milímetros e,

devido às diferenças de densidade e granulometria, foram separadas e armazenadas nas caçambas com as seguintes quantidades:

- cavacos com dimensões menores que 20 milímetros, em recipientes de 1500 ± 1 gramas;
- cavacos com dimensões maiores do que 20 milímetros, em recipientes de 1000 ± 1 gramas.

3.5.6 Instrumentação para as corridas

a) pesagem da lenha e do cavaco

As pesagens da lenha e do cavaco foram realizadas em três faixas de peso:

- para amostras de até 1.000 gramas, foi utilizada balança da marca Powerpack, com precisão de 0,1 gramas e faixa de medição de 0,5 a 1.200 gramas;
- para amostras de 100 a 5.000 gramas foi utilizada balança digital da marca Balmak, precisão de um grama e faixa de medição de cinco a 5.500 gramas;
- para amostras de 2.000 gramas a 45 quilogramas, balança da marca AzPR, digital, com gancho, precisão de cinco gramas e faixa de medição de 20 gramas a 50 quilogramas.

Klautau (2008) trabalhou com o monitoramento da pesagem da lenha ao mesmo tempo em que eram consumidos pela combustão, utilizando para isso, uma balança acoplada a um cesto suspenso por um suporte metálico acima do bocal de alimentação. Porém, por recomendações da autora, relatando problemas devido ao aquecimento da balança pelo calor irradiado pela chama e interferência na pesagem da lenha que estava sendo consumida, neste trabalho se optou por utilizar cargas de cavaco previamente mensuradas de 100 em 100 ± 1 gramas, com ritmos de alimentação pré-estabelecidos.

b) medição da temperatura

Para verificar o desempenho de cada etapa na combustão e assim, calcular a variação de energia interna no processo, as temperaturas foram monitoradas em sete pontos ao longo da fornalha e um na saída dos gases, conforme a FIGURA A20 no APÊNDICE 2. Para isto, se utilizou os seguintes termopares:

- tipo K para temperaturas até $1.260 \text{ }^\circ\text{C}$ e;
- tipo S para temperaturas até $1.600 \text{ }^\circ\text{C}$.

Desses termopares, somente o T2 foi considerado para efetuar os registros de temperaturas e elaboração dos gráficos, devido à sua localização na saída da câmara de

combustão, FIGURA A20, e também devido às temperaturas alcançadas. Quanto aos outros termopares, seus registros foram computados para fins de cálculo de eficiência e desempenho da fornalha.

c) Análise dos gases nas corridas

Para analisar os gases emitidos durante a combustão - O₂ (%), CO₂ (%), CO (ppm), NO_x (ppm) e C_xH_y (%), com precisão de 0,01% e 1 ppm, respectivamente, - foi utilizado um analisador de gases portátil da marca LAND, modelo Lancom III, FIGURA A21 no APÊNDICE 2. A sonda do analisador foi posicionada no topo da chaminé, FIGURA anterior, ao lado do termômetro 4. Esta localização, foi indicada devido às características do fluxo de gases e pelo fabricante.

Na TABELA 17 encontra-se a especificação e justificativa da localização de cada um dos termopares.

TABELA 17 – ESPECIFICAÇÃO E JUSTIFICATIVA DA LOCALIZAÇÃO DOS TERMOPARES

Canal do termopar	Tipo	Localização	Justificativa	Erro
0	K	Zona de pirólise	Indicar as temperaturas da pirólise da lenha	± 2,2 °C
1	S	Início da câmara de combustão	Indicar as temperaturas do início das reações de combustão	± 1,5 °C
2	S	Saída da câmara de combustão	Indicar as temperaturas média das reações de combustão	± 1,5 °C
3	K	Base da chaminé	Indicar as temperaturas dos produtos finais da combustão	± 2,2 °C
4	K	Topo da chaminé	Indicar as temperaturas dos gases entrando no secador	± 2,2 °C
5	K	Superfície da zona de pirólise	Identificar as perdas de calor pelas paredes da zona de pirólise	± 2,2 °C
6	K	Superfície do meio da câmara de combustão	Identificar as perdas de calor pelas paredes do meio da câmara de combustão	± 2,2 °C
7	K	Câmara de entrada no secador	Indicar as temperaturas dos gases para possível secagem de grãos	± 2,2 °C

FONTE: o fabricante (2004).

O software utilizado para coleta de dados foi o LABVIEW, Compact Fiel Point (cFP) da National Instruments.

A aquisição dos dados de temperatura foi feita pelo sistema de controle Compact Fiel Point (cFP) da National Instruments, com o software LABVIEW.

3.5.7 Parâmetros que foram calculados nas corridas

O excesso de ar (E), QUADRO 7, foi calculado pela equação (3.6) com base no valor de CO₂máx conhecido, dado pela composição adotada para o combustível e a concentração medida de CO₂ na combustão dos gases, de acordo com Wylen, Sonntag e Borgnakke (2013), onde 20,95% foi a concentração volumétrica de O₂ no ar ambiente durante a corrida.

A eficiência energética da fornalha (η), é uma média temporal, também chamada de eficiência da 1ª lei, equação (3.7) no QUADRO 7, é a lei de conservação de energia aplicada a processos térmicos, foi calculada pela relação entre a energia útil ($Q_{\text{útil}}$), liberada pelos gases de combustão, durante o período em regime e a energia nominal (Q_{nominal}), fornecida pelo combustível. O detalhamento das equações da eficiência encontra-se no ANEXO 1. A energia útil foi calculada pela equação (3.8), a vazão mássica média dos gases de combustão na saída da chaminé pela equação (3.9) e a razão de massa dos produtos da combustão foi calculada segundo a relação estequiométrica na equação (3.10), QUADRO 7.

QUADRO 7 – EQUAÇÕES DA COMBUSTÃO

EQUAÇÃO	NÚMERO DA EQUAÇÃO
$E \equiv \frac{20,95\%}{(20,95\% - O_2 \text{ medido}\%)}$	(3.6)
$\eta = \frac{\bar{Q}_{\text{útil}}}{Q_{\text{nominal}}}$	(3.7)
$\bar{Q}_{\text{útil}} = \bar{m}_{\text{gas comb}} \bar{\Delta h}_{\text{gas comb}}$	(3.8)
$\bar{m}_{\text{gas comb}} = m_{\text{gas comb}} \bar{m}_{\text{lenha}} \text{ (kg/s)}$	(3.9)
$m_{\text{gas comb}} = \frac{kg_{\text{gas comb}}}{kg_{\text{comb}}}$	(3.10)

FONTE: WYLEN, SONNTAG e BORGNAPKE (2013).

Onde:

- $\bar{m}_{\text{gas comb}}$: vazão mássica média dos gases de combustão na saída da chaminé (kg/s);
- $\bar{\Delta h}_{\text{gas comb}}$: variação de entalpia média dos gases de combustão à temperatura da saída da chaminé (kJ/kg);
- $m_{\text{gas comb}}$: razão de massa dos produtos da combustão ($kg_{\text{gas comb}}/kg_{\text{comb}}$);
- $kg_{\text{gas comb}}$: massa de gases da combustão (kg);
- kg_{comb} : massa dos combustíveis (kg).

3.5.8 Equações do balanço de energia

Para realizar o balanço de energia da fornalha, foi tomado como referência as citações de Wylen, Sonntag e Borgnakke (2013). Primeiramente, foi calculado o balanço de massa, considerando a fornalha em regime permanente e com saídas específicas.

A equação (3.11) apresenta o balanço de massa médio temporal e a equação (3.12) é a equação estendida do balanço de massa, QUADRO 8.

QUADRO 8 – EQUAÇÕES DO BALANÇO DE MASSA

EQUAÇÃO	NÚMERO DA EQUAÇÃO
$\bar{m} = \sum_{entrada} \bar{m}_e - \sum_{saída} \bar{m}_s$	(3.11)
$\bar{m}_{ar} + \bar{m}_{lenha} = \bar{m}_{gasComb} + \bar{m}_{cinzas} + \bar{m}_{carvão}$	(3.12)

FONTE: WYLEN, SONNTAG e BORGNAPKE (2013).

Onde:

- \bar{m}_{ar} : vazão mássica média de entrada de massa;
- $\bar{m}_{saída}$: vazão mássica média de saída de massa;
- \bar{m}_{ar} : vazão mássica média de ar primário (kg/s);
- \bar{m}_{lenha} : vazão mássica média de lenha (kg/s);
- $\bar{m}_{gasComb}$: vazão mássica média dos gases de combustão na saída da chaminé (kg/s);
- \bar{m}_{cinzas} : vazão mássica média de cinzas (kg/s);
- $\bar{m}_{carvão}$: vazão mássica média de carvão vegetal (kg/s).

A equação (3.13) representa o balanço de energia médio temporal da fornalha e a (3.14) é a equação estendida do balanço de energia, QUADRO 9.

QUADRO 9 – EQUAÇÕES DA ENERGIA NA COMBUSTÃO

EQUAÇÃO	NÚMERO DA EQUAÇÃO
$\dot{Q} = \sum_{entrada} \dot{Q}_e - \sum_{saída} \dot{Q}_s \text{ (kW)}$	(3.13)
$\dot{Q}_{ar\ primario} + \dot{Q}_{lenha} = \dot{Q}_{gasComb} + \dot{Q}_{cinzas} + \dot{Q}_{carvão} + \dot{Q}_{paredes} \text{ (kW)}$	(3.14)

FONTE: WYLEN, SONNTAG e BORGNAPKE (2013).

Onde:

- \dot{Q}_e : energia fornecida na entrada;
- \dot{Q}_s : energia cedida na saída;
- $\dot{Q}_{ar\ primario}$: energia fornecida pelo ar primário (kW);
- \dot{Q}_{lenha} : energia fornecida pela lenha (kW);
- $\dot{Q}_{gasComb}$: energia dos gases produtos da combustão (kW);
- \dot{Q}_{cinzas} : energia contida nas cinzas (kW);
- $\dot{Q}_{carvão}$: energia contida no carvão do cinzeiro (kW);
- $\dot{Q}_{paredes}$: energia perdida pelas paredes da fornalha (kW).

A energia fornecida pelo ar primário foi dada pela equação (3.15). O calor perdido pelas cinzas, equação (3.16) e a energia perdida pelo carvão que passou direto pela grelha (carbono não queimado), equação (3.17), foram desprezados pelos seus resultados não significativos. A vazão mássica média do ar real da combustão (kg/s), calculada pela equação (3.18), a vazão mássica média de cinzas (kg/s), foi calculada pela equação (3.19), a vazão mássica média de carvão (kg/s), dado pela equação (3.20). A entalpia das cinzas na temperatura de operação (kJ/kg), pela equação (3.21) e a entalpia do carvão na temperatura de operação (kJ/kg), pela equação (3.22). Essas equações estão no QUADRO 10:

QUADRO 10 - EQUAÇÕES DE ENERGIA, VAZÕES MÁSSICAS E ENTALPIAS

EQUAÇÃO	NÚMERO DA EQUAÇÃO
$\dot{Q}_{ar\ primario} = \bar{m}_{ar} \bar{h}_{ar}$ (kW)	(3.15)
$\dot{Q}_{cinzas} = \bar{m}_{cinzas} h_{cinzas}$ (kW)	(3.16)
$\dot{Q}_{carvao} = \bar{m}_{carvao} h_{carvao}$ (kW)	(3.17)
$\bar{m}_{ar} = \bar{m}_{ar,r} \dot{m}_{lenha}$ (kg/s)	(3.18)
$\bar{m}_{cinzas} = \frac{m_{cinzas\ total}}{tempo\ corrida}$ (kg/s)	(3.19)
$\bar{m}_{carvao} = \frac{m_{carvao}}{tempo\ corrida}$ (kg/s)	(3.20)
$h_{cinzas} = c_{p_{cinzas}} (T_{cinzas} - T_{amb})$ (kJ/kg)	(3.21)
$h_{carvao} = c_{p_{carvao}} (T_{carvao} - T_{amb})$ (kJ/kg)	(3.22)

FONTE: WYLEN, SONNTAG e BORGNAKKE (2013).

Onde:

- \bar{h}_{ar} : entalpia média do ar à temperatura ambiente (kJ/kg);
- h_{carvao} : entalpia do carvão na temperatura de operação (kJ/kg);
- h_{cinzas} : entalpia das cinzas na temperatura de operação (kJ/kg);
- m_{carvao} : massa de carvão (kg carvão/kg combustível);
- $\bar{m}_{ar,r}$: massa de ar real média da combustão (kg_{ar}/ kg_{comb});
- T_{cinzas} : temperatura média das cinzas durante o período em regime (K);
- T_{amb} : temperatura ambiente (K);
- T_{carvao} : Temperatura do carvão (estimada pela temperatura da zona de pirólise);
- $c_{p_{carvao}}$: calor específico do carvão à temperatura de operação (kJ/kg.K);
- $c_{p_{cinzas}}$: calor específico das cinzas à temperatura de operação (kJ/kg.K);
- tempo corrida: tempo total da corrida (s).

A energia fornecida pela lenha é a energia nominal ($Q_{nominal}$) e a energia liberada pelos gases de combustão é a energia útil (Qútil), conforme as equações (A4.2) e (A4.4) no ANEXO 2.

3.5.9 Condições de validação das corridas em ensaios/testes

Para que as corridas fossem consideradas válidas, foram estabelecidas as seguintes condições:

a) ocorrência de fluxo *downdraft* (para baixo)

A primeira condição para que a corrida fosse considerada válida é que ocorresse o fluxo *downdraft*, ou seja, os gases e o ar deveriam se deslocar no mesmo sentido.

b) temperatura em regime

Foi considerado período em regime quando a temperatura da fornalha permaneceu superior a 700 °C por no mínimo 10 minutos, como recomendado por Pawliszyn (2002). Essa temperatura foi adotada devido à melhor queima dos gases da combustão, conforme Wylen, Sonntag e Borgnakke, (2013), informando que, a partir dessa temperatura a constante de equilíbrio da reação de formação do CO se torna praticamente nula, o que foi confirmado nos testes, observando o analisador de gases com temperaturas acima de 650 °C.

3.6 ESTUDO DE VIABILIDADE PARA INSTALAÇÃO DE INDÚSTRIA PARA TRITURAR RESÍDUOS, PARA GERAÇÃO DE VAPOR E ENERGIA TERMELÉTRICA

Quanto às avaliações econômicas, se focou principalmente na trituração do cavaco, geração de vapor e produção de energia termelétrica, propondo também, melhorias no sistema de coleta da biomassa (galhos e folhas) após o corte, transporte e a inserção desses produtos no mercado, oferecendo algumas projeções de impactos econômicos setoriais.

Assim, com o intuito de gerenciar adequadamente o destino final da biomassa residual de plantios florestais e da poda urbana, neste trabalho se propôs uma planilha de modelagem de custos, enfatizando a análise de fluxo dos empreendimentos, com a avaliação dos efeitos desta tecnologia e o estudo de viabilidade para fomentar pequenas iniciativas econômicas de instalação de empresa para triturar a biomassa, gerar vapor e energia termelétrica. Se enfatizou a descentralização na distribuição de energia, com o intuito de se utilizar fontes de biomassa próximas aos centros de consumo, com suprimento regional de biomassa a uma distância máxima de 60 quilômetros, conforme recomendam Tahvanainen e Anttila (2011).

Nessa planilha de modelagem, foram inseridos os aspectos econômicos e financeiros da pré-implantação, implantação e operação para essa empresa, com foco em plantas de energia distribuída para produtores independentes. Também foram realizadas avaliações do valor presente líquido (VPL), valor presente líquido anualizado (VPLA), taxa interna de retorno (TIR), índice benefício-custo (IBC), fluxo de caixa (FC), retorno sobre o investimento adicionado (ROIA), taxa mínima de atratividade (TMA) e retorno de investimento (*payback*), considerando taxa Selic de 14,25% ao ano.

No estudo de viabilidade foram analisadas três diferentes categorias de fornecimento e suprimento de biomassa na forma de cavaco, duas categorias de instalação de trocadores de calor para geração de vapor e três categorias de turbinas térmicas para fornecimento de energia de acordo com a disponibilidade de suprimento de biomassa em nível local e regional. O suprimento local ficou atrelado ao que a cidade de Pato Branco, onde foi realizado o estudo, poderia fornecer. Em outras palavras, foram realizados três orçamentos de trituradores de biomassa, dois orçamentos de geradores de vapor e três orçamentos de turbinas térmicas. Dali se propôs a criação de uma planta modular e a instalação dos equipamentos em série - trituradores, geradores de vapor e turbina -, de forma compatível entre eles.

Assim, nos orçamentos e quantificação dos trituradores, foram propostos trituradores com capacidades de seis, oito e 60 toneladas por hora para atender a demanda de biomassa disponível. Denominou-se de “orçamento 1” aquele vinculado ao triturador de seis toneladas

por hora, de “orçamento 2” ao de oito e, de “orçamento 3” ao de 60. Para fins de projeto na produção de cavaco, de acordo com recomendações dos fabricantes, foi considerada ineficiência em até 50% nos processos de trituração. Desta forma, os valores nominais de produção foram divididos pela metade, ficando dimensionados para três, quatro e 30 toneladas por hora, respectivamente. Por apresentar dados mais consistentes e aceitáveis diante às características de investimento, neste estudo foi considerado apenas o orçamento 2, com triturador de oito toneladas por hora que, considerando a ineficiência anteriormente citada, ficou dimensionado para quatro toneladas por hora.

Nos orçamentos dos geradores de vapor, se considerou a capacidade de combustão e a energia que poderia ser fornecida pela queima da biomassa triturada atrelado à fornalha cocorrente e gerador de vapor. As capacidades dos geradores disponíveis no mercado eram de uma e de 30 toneladas de vapor por hora. No caso particular para os “orçamentos 1 e 2”, como as capacidades de geração eram significativamente similares, de 7,8 e 10,5 toneladas por hora de vapor, respectivamente, vinculou-se ao “orçamento 1”, com a capacidade de uma tonelada por hora de vapor, podendo instalar de oito a 11 geradores para atender à demanda total de produção de cavaco. O gerador de vapor 3, com até 78,5 toneladas de vapor por hora, vinculou-se ao “orçamento 3” da fornalha cocorrente e do gerador de vapor com 30 toneladas de vapor por hora, podendo ser instalado até três geradores para atender à demanda.

Para os orçamentos das turbinas, da mesma forma se chamou de “orçamento 1”, de “orçamento 2” e de “orçamento 3”, com potências de 0,5, 1,0 e 1,5 MW respectivamente, as quais também ficaram vinculadas à disponibilidade de biomassa fornecida pelos trituradores e consumo dos geradores de vapor.

A densidade média dos resíduos de poda (kg/m^3) foi obtida experimentalmente com a utilização do densímetro, especificada nos MATERIAIS E MÉTODOS. O consumo de combustível (L/t), foi obtido por informações dos fabricantes. O valor do diesel (R\$/litro) era o valor comercializado na época. O valor do cavaco (R\$/t) era o valor médio de mercado informado por distribuidores e clientes consumidores de cavaco. O custo do combustível (R\$/t) foi calculado a partir do gasto em consumo de combustível pela produção de cavaco. O custo do aterro para depositar resíduos (R\$/t) foi tomado como referência as informações de Meira (2010). O custo da energia comercializada foi tomado como referência os valores de outubro de 2015 (R\$ 412,27) pagos pela Companhia Paranaense de Energia Elétrica – COPEL, de acordo com a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica – ABRADDEE (2015).

Dentre as utilizações industriais das fontes de calor, se destacaram o emprego da energia térmica no pré-aquecimento de produtos, na secagem, em caldeiras, geradores de vapor,

energia termelétrica, entre outros, conforme TABELA 18. A partir de levantamento realizado por Brown, Hamel, Hedman (1996), foram mapeadas algumas indústrias com respectivo ramo de atividade, que utilizam em seus processos energia térmica entre 260 e 1.100 °C.

TABELA 18 - INDÚSTRIAS QUE UTILIZAM CALOR EM SEUS PROCESSOS INDUSTRIAIS À TEMPERATURAS ENTRE 260 A 1.100 °C

Ramo industrial	Temperatura considerada (°C)	Temperatura máxima (°C)
Enlatados de frutas e legumes, indústria leiteira e de pães, biscoitos e afins	260	
Fábrica de celulose, papel, cartão e caixas de fibras sólidas; fibras celulósicas sintéticas ou artificiais; indústria do açúcar da cana e beterraba; indústria madeireira; preparações químicas e farmacêuticas	316	
Álcalis e cloro; indústria de bebidas; equipamentos eletrônicos; fibras orgânicas, não celulósicas; moagem de milho e óleo de soja; produtos da borracha e pneumáticos; produtos plásticos e resinas plásticas; tecelagens e fibra sintética	343	
Tijolos e telhas	371	1.149
Cimento e produtos de gesso	427	
Refinamento de petróleo	538	
Veículos automotores e carrocerias	538	1.593
Folha de alumínio	649	
Lã mineral	677	1.538
Metais não-ferrosos, alumínio primário, cobre primário	816	1.316
Química orgânica e inorgânica	816	1.538
Aço forjado, altos-fornos, usinas de aço e ferro fundido; eletro metalurgia	871	1.593
Vidro soprado e laminado	927	1.538
Aubos e fertilizantes	982	1.260
Equipamentos agrícolas e máquinas de construção	1.093	

FONTE: formatação da TABELA, o autor (2016), dados, BROWN, HAMEL e HEDMAN (1996).

De modo geral, outros itens avaliados para realizar a análise de viabilidade econômica foram levados em consideração:

- a) para a instalação do triturador da biomassa;
- b) para a instalação da fornalha cocorrente e do gerador de vapor;
- c) para a instalação da turbina a vapor.

No detalhamento de cada análise de viabilidade, conforme QUADROS 11 e 12, se enfatizou:

QUADRO 11 - DADOS RELEVANTES PARA A INSTALAÇÃO DA FORNALHA COCORRENTE E DO GERADOR DE VAPOR

FORNALHA COCORRENTE E GERADOR DE VAPOR		
PRÉ IMPLANTAÇÃO		
CUSTOS		
	Estudo de viabilidade	
	Aquisição do terreno	
Impostos, licenças e taxas anuais	Projeto básico, EIA/RIMA	
	Taxas anuais (alvará, etc.)	
	Licença prévia (0,15%) do investimento	
	Licença de instalação (0,5%)	
	IBAMA	
	Bombeiros	
IMPLANTAÇÃO		
CUSTOS		
Infra estrutura geral	Terraplanagem, drenagem, portaria, portão, cancela, cercamento da área externa	
	Materiais de escritório, computador, telefone, entre outros	
MÁQUINAS, TRANSPORTADORESE EQUIPAMENTOS	Silo para armazenar cavacos e cobertura de lona com estrutura metálica	
	Fornalha cocorrente e gerador de vapor (valores considerando 11 meses para instalação e taxa Selic de 14,25% ao ano)	
OPERAÇÃO		
CUSTOS		
	Licença de operação 0,25% 5 anos	
	Aluguel da área para depósito e trituração	
	Expediente diário	24 horas
	Dias trabalhados por mês	30 dias
Salários da equipe para fabricar o cavaco	Número de operários para alimentar de lenha a fornalha (três turnos + folguista)	4
	Administrador	1

FONTE: O autor (2016).

QUADRO 12 - DADOS RELEVANTES PARA INSTALAÇÃO DE TURBINA A VAPOR

TURBINA		
PRÉ IMPLANTAÇÃO		
CUSTOS		
	Estudo de viabilidade	
Impostos, licenças e taxas anuais	Projeto básico, EIA/RIMA	
	Taxas anuais (alvará, etc.)	
	Licença prévia (0,15%) do investimento	
	Licença de instalação (0,5%)	
	IBAMA	
	Bombeiros	
IMPLANTAÇÃO		
CUSTOS		
Infra estrutura geral	Portaria, portão, cancela, cercamento da área externa a 47,6/m	
	Custo de materiais de escritório, computador, telefone, entre outros	
MÁQUINAS, EQUIPAMENTOS	Turbina a vapor (valores considerando 11 meses para instalação e taxa Selic de 14,25% ao ano)	
OPERAÇÃO		
CUSTOS		
	Licença de operação 0,25% 5 anos	
	Aluguel da área para depósito e trituração	
	Expediente diário	9 horas
	Dias trabalhados por mês	22 dias
	Energia elétrica ou diesel para triturador (R\$/mês)	
	Diesel para transporte (R\$/mês)	
Salários da equipe para operar a turbina a vapor	Operários para operar a turbina (três turnos + folguista)	4
	Administrador	1
Aluguel caminhões para transportar a biomassa	Translado do caminhão ida e volta (km/viagem)	124
	Custo de transporte por km	R\$ 2,51
	Capacidade volumétrica de cada caminhão (m ³)	38
	Capacidade de carga de cada caminhão (toneladas)	15,20

FONTE: O autor (2016).

4 RESULTADOS

A partir deste estudo, foi evidenciada a importância em se utilizar a biomassa residual de plantios florestais e da poda urbana como insumo energético, tendo em vista que, além da produção de energia térmica, também poderá propiciar a redução de volumes quando se trata de destiná-los a aterros, haja vista que, além de comprometer seu espaço e diminuir seu tempo de vida útil, geram poluição a partir de sua degradação.

Os resultados das avaliações da secagem da biomassa, levaram às curvas características que foram utilizadas na determinação das taxas de secagem e da umidade residual e nos cálculos de poder calorífico, na logística de manuseio e transporte da biomassa.

Os resultados dos testes termográficos na fornalha de fluxo cocorrente, demonstraram que os níveis térmicos atingindo temperaturas acima de 1.150 °C, são compatíveis com a demanda de energia para uma vasta gama de indústrias, conforme comparação com estudos de Brown, Hamel e Hedman (1996). Quanto aos gases, demonstraram que as emissões de CO, NO_x, SO₂ e H₂S, foram abaixo dos padrões mínimos permitidos pela Resolução SEMA de 2014.

Economicamente falando, foi possível construir um cenário de viabilidade, onde se propôs a instalação de indústria de beneficiamento da biomassa e geração de energia termelétrica. Na proposta de instalação de empresas para beneficiar os resíduos de poda, como indicado nos resultados deste estudo, se poderiam gerar em média 10 empregos em cada planta e fomentar o aquecimento da economia do entorno com faturamentos superiores a R\$ 1.600.000,00 anuais, com *payback* de até 43 meses.

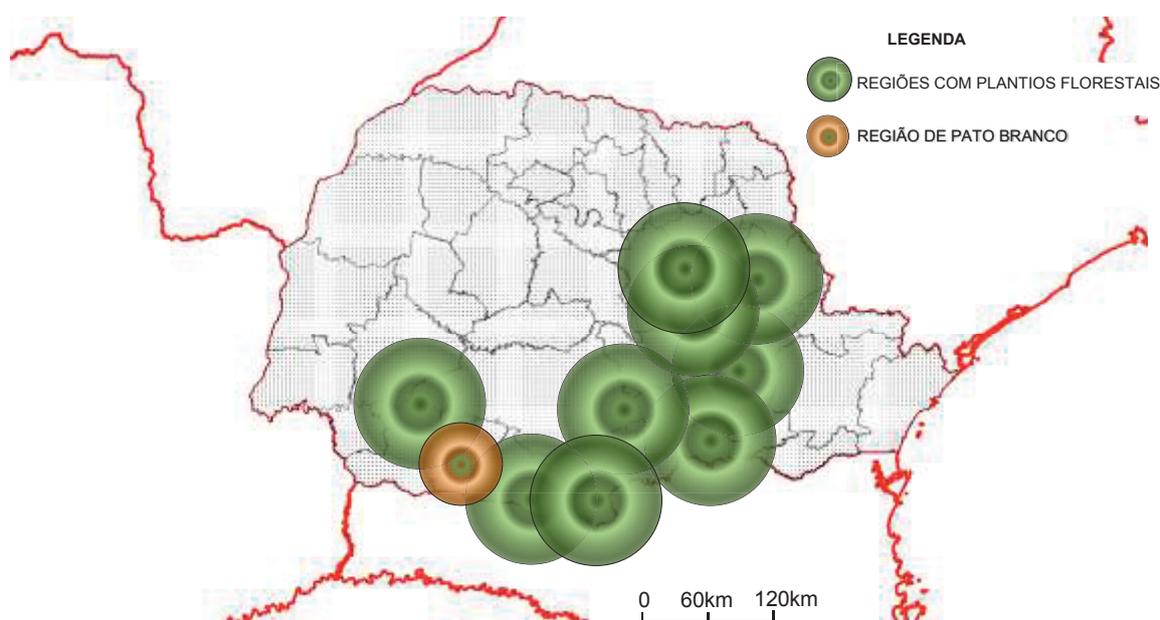
4.1 PANORAMA DE DISPONIBILIDADE DE BIOMASSA PARA O ESTUDO

Entre os principais produtores de plantios florestais, conforme Einfeld e Nascimento (2015), se destacaram as indústrias de laminados de madeira, papel e celulose, localizadas principalmente no centro-sul, centro-oriental, sudoeste e noroeste do estado do Paraná, onde ali conseqüentemente, também se gerava maior quantidade de resíduos de plantios florestais. Mesmo que, de acordo com Gonçalves et al. (2012) na FIGURA 4, da Seção 2.5, estas regiões não estavam sofrendo com o déficit de lenha e eram as que mais consumiam lenha em indústrias, este estudo se tornou relevante para propor alternativa de destinação mais adequada dessa biomassa residual, além de indicar o panorama sobre sua disponibilidade e suprimento. Conforme estimativas de consumo de lenha realizadas por Bell (2012), entre as regiões que tinham falta, a maioria delas supriria sua demanda se fossem aproveitados os resíduos.

As circunferências indicadas na FIGURA 29 representam a abrangência média do suprimento em até 60 quilômetros de raio das fontes geradoras. Jäppinen; Korpinen e Ranta (2012), enfocam a importância em consumir a biomassa residual nessas proximidades, pois acima dessa distância, os custos de transporte poderiam encarecer o produto final, principalmente para os resíduos em forma de cavaco, já que sua densidade era menor que a da lenha em toras. Nesse caso, o produto final em forma de cavaco se torna mais competitivo que com outros energéticos, principalmente com a lenha, diante da possibilidade dos custos de transporte e manuseio se reduzirem, corroborando com informações de Torquati et al. (2016).

Quanto aos fornecedores paranaenses de resíduos de poda urbana, as próprias cidades se enquadraram como as principais geradoras, sendo as prefeituras municipais que determinavam onde, quando e como realizar a poda, frequentemente em parceria com a Companhia Paranaense de Energia Elétrica - COPEL ou empresas terceirizadas. Aqui, como estudo piloto, foi considerada a produção na cidade de Pato Branco que tinha déficit de lenha, apesar de que, conforme a FIGURA 29, esta cidade estava nas imediações de regiões onde se produziam plantios florestais.

FIGURA 29 - RAIOS DE SUPRIMENTO REGIONAL E DOS PRINCIPAIS PRODUTORES DE PLANTIOS FLORESTAIS NO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: O autor (2016) a partir de dados de EISFELD e NASCIMENTO (2015).

A seguir, uma análise comparativa entre as médias anuais de produção paranaense de toras destinadas às serrarias, às indústrias de laminação, às indústrias de papel e celulose e para

lenha, de acordo com Gonçalves et al. (2012), indicando os municípios paranaenses com déficit ou que atendiam à demanda de lenha, bem como, a quantificação daquilo que os plantios florestais poderiam fornecer de biomassa residual para suprir essas necessidades.

a) exploração dos resíduos provenientes de serrarias

A TABELA 19 indica que dentre os municípios paranaenses que produziam até 293.000 m³ por ano de *Pinus sp.* para serraria, 46 deles estavam localizados em regiões com déficit de lenha e 76 que atendiam à demanda. Dentre aqueles que produziam até 586.000 m³ por ano, dois estavam localizados em regiões com déficit e cinco que atendiam à demanda de lenha. Dentre os que produziam até 880.000 m³ por ano, um deles atendia à demanda de lenha.

TABELA 19 – PRODUÇÃO DE *Pinus sp.* PARA SERRARIAS EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA

Produção para serraria (1000 m³/ano)	Quantidade de municípios com déficit de lenha	Quantidade de municípios que atendiam à demanda de lenha
0 a 293	46	76
293 a 586	2	5
586 a 880	0	1
Total	48	82

FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2011).

b) exploração dos resíduos provenientes de toras de *Pinus sp.* para laminação

A TABELA 20 indica que dentre os municípios paranaenses que produziam até 303.000 m³ por ano de *Pinus sp.* para a indústria de laminação, 17 deles estavam localizados em regiões com déficit de lenha e 40 atendiam à demanda. Dentre aqueles que produziam até 606.000 m³ por ano, um estava localizado em região com déficit de lenha e dois que atendiam à demanda. Dentre os que produziam até 910.000 m³ por ano, 18 estavam localizados em regiões com déficit e 43 deles atendiam à demanda de lenha.

TABELA 20 – PRODUÇÃO DE *Pinus sp.* PARA LAMINAÇÃO EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA

Produção (1000 m³/ano)	Quantidade de municípios com déficit de lenha	Quantidade de municípios que atendiam à demanda de lenha
0 a 303	17	40
303 a 606	1	2
606 a 910	0	1
Total	18	43

FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2011).

c) exploração dos resíduos provenientes de toras de *Pinus sp.* para papel e celulose

A TABELA 21 indica que dentre os municípios paranaenses que produziam até 705.000 m³ por ano de *Pinus sp.* para a indústria de celulose e papel, 18 deles estavam localizados em regiões com déficit de lenha e 52 atendiam à demanda. Dentre aqueles que produziam até 1.411.000 m³ por ano, dois estavam localizados em regiões que atendiam à demanda de lenha. Dentre os que produziam até 2.117.000 m³ por ano, um estava localizado em região que atendia à demanda de lenha.

TABELA 21 – PRODUÇÃO DE *Pinus sp.* PARA CELULOSE E PAPEL EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA

Produção (1000 m ³ /ano)	Quantidade de municípios com déficit de lenha	Quantidade de municípios que atendiam à demanda de lenha
0 a 705	18	52
705 a 1.411	0	2
1411 a 2.117	0	1
Total	18	55

FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2011).

d) exploração das toras para lenha

A TABELA 22 indica que os municípios paranaenses que produziam até 165.000 m³ por ano de toras para lenha, 190 deles estavam localizados em regiões com déficit de lenha. Dentre aqueles que produziam até 310.000 m³ por ano, dois estavam localizados em regiões com déficit de lenha e dentre os que produziam até 465.000 m³ por ano, dois estavam localizados em regiões com déficit de lenha.

TABELA 22 – QUANTIFICAÇÃO DE MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA EM RELAÇÃO À PRODUÇÃO DE TORAS PARA LENHA

Disponibilidade Produção (1.000 m ³ /ano)	Número de municípios com déficit de lenha	Número de municípios que atendiam ou superavam a demanda de lenha
0 – 165	190	147
165 – 310	2	16
310 – 465	2	3
Total	194	166

FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2011) e o autor (2016).

Quanto à caracterização da biomassa disponível proveniente de resíduos de poda, a quantidade total de indivíduos na cidade de Pato Branco conforme Puhl et al. (2012), foi de 45.470, mas foram consideradas apenas as espécies estudadas, totalizando 24.580. A amostragem resultou no seguinte perfil, entre as espécies de *Ligustrum lucidum*, *Lagerstroemia*

indica, *Schinus molle* e *Tipuana tipu* conforme a TABELA 23:

TABELA 23 – NÚMERO DE INDIVÍDUOS DE CADA ESPÉCIE ESTUDADA NOS LOGRADOUROS PÚBLICOS DE PATO BRANCO EM RELAÇÃO AO TOTAL DE 45.470 INDIVÍDUOS

Espécie	%	Nº. de indivíduos levantados no campo	Nº. de indivíduos para a interação
<i>Ligustrum lucidum</i> (ligustro)	23,77	10.808	43
<i>Lagerstroemia indica</i> (extremosa)	14,13	6.425	12
<i>Schinus molle</i> (aroeira salsa)	9,51	4.324	4
<i>Bauhinia forficata</i> (pata de vaca)	5,14	2.337	11
<i>Tipuana tipu</i> (tipuana)	1,51	686	20
Total	100	24.580	90

FONTES: Adaptado de Puhl et al. (2012) e o autor (2016).

4.2 MONITORAMENTO DA SECAGEM NATURAL DA BIOMASSA

Os resultados do monitoramento das taxas de secagem das amostras de galhos, folhas, cascas, sementes e cavacos, estão descritas a seguir:

4.2.1 Resultados das taxas de variação da umidade de amostras de galhos em fardos

Neste item, primeiramente foram relatados os resultados da secagem das amostras de *Ligustrum lucidum*, depois do *Schinus molle*, do *Eucalyptus sp.*, do *Pinus sp.*, da *Schinus terebinthifolius* e no fim, do *Cupressus sempervirens* armazenadas no pátio e dentro do laboratório. Os resultados levaram às curvas características que foram utilizadas na avaliação das taxas de secagem e da umidade residual da biomassa.

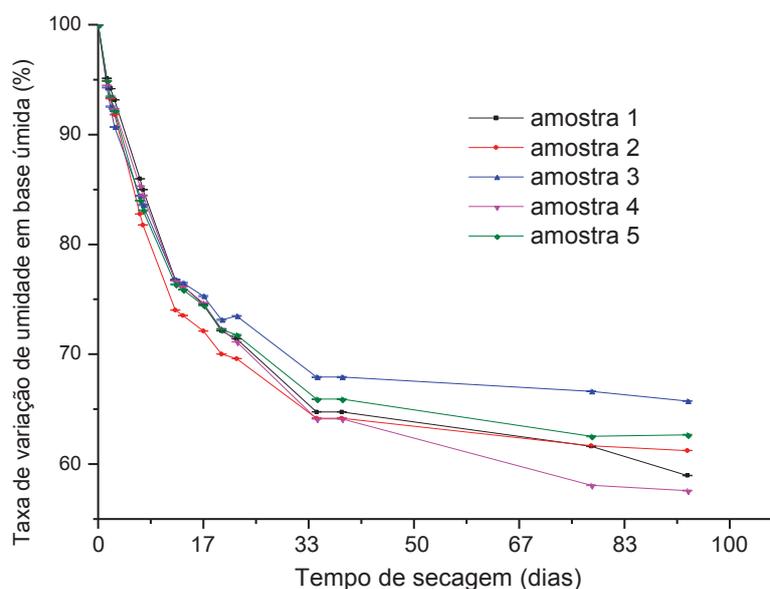
a) *Ligustrum lucidum*

Os resultados da coleta de dados para determinar o perfil das taxas de secagem das amostras de galhos de *Ligustrum lucidum*, depositadas em fardos e submetidas à secagem natural em pátio aberto, sujeitas ao sol, chuva e ventos, está inserido no QUADRO A1 do APÊNDICE 1. Os resultados da secagem das amostras também submetidas à secagem natural, concomitantemente depositadas dentro do laboratório, sem interferência de chuva, ventos e luz solar, estão no QUADRO A2 do APÊNDICE 1.

A FIGURA 30 e a TABELA 24 indicam maiores detalhes a respeito daquelas amostras que ficaram expostas no pátio da Universidade. Em relação à base seca, todos os cinco fardos de amostras tiveram curvas semelhantes, isto é, não tiveram diferenças significativas de secagem entre elas. Após a poda, pesagem e pré secagem dos galhos, foi percebido, a partir de análises periódicas, que as taxas de umidade tiveram decréscimos expressivos, de 27,8% nos

primeiros 13 dias, nas condições de ambiente já relatadas nos MATERIAIS E MÉTODOS. Até o 34°. dia, a perda de umidade foi de 38,4%. Conforme a mesma FIGURA, a partir desta data, as amostras perderam quantidades não significativas de umidade chegando à 43,8% até o 59°. dia, onde a secagem praticamente se estabilizou. Até o 125°. dia, chegou a perder 50,1% de umidade em relação à base úmida.

FIGURA 30 - TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE GALHOS COM FOLHAS DO *Ligustrum lucidum* ARMAZENADAS EM ABRIGO



FONTE: O autor (2015).

Para as amostras de galhos e folhas armazenadas dentro do laboratório da universidade, detalhado na TABELA 24, percebeu-se que a perda mais significativa da umidade foi até o 13°. dia com média de 28% de umidade. Sua estabilização ocorreu a partir do 33°. dia. As folhas, que foram amontoadas, mantiveram perda significativa da umidade até o 25°. dia, período em que começou a se estabilizar, reduzindo até ali, 57,1% de umidade em relação à base úmida.

TABELA 24 - TAXA TOTAL DE DECRÉSCIMO DE UMIDADE EM RELAÇÃO À BASE SECA DAS AMOSTRAS DE *Ligustrum lucidum*

<i>Ligustrum lucidum</i>	Galhos com casca e folhas depositados no pátio	Folhas depositadas no laboratório	Galhos com casca depositados no laboratório
Perda de umidade (base úmida)	27,8% (até o 13°. dia) 38,4% (até o 34°. dia) 43,8% (até o 59°. dia) 50,1% (até o 125°. dia)	57,1% (até o 25°. dia)	28%
Período de maior decréscimo de umidade	13 dias		13 dias
Período de estabilização	59 dias	25 dias	33 dias

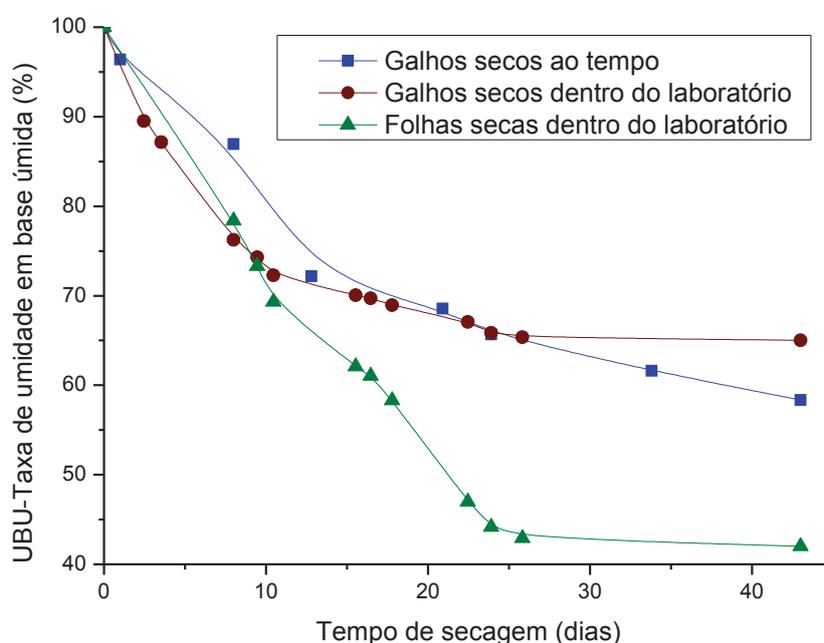
FONTE: O autor (2015).

Outras observações a serem consideradas:

- para galhos com folhas, as taxas de perda de umidade, até atingir a umidade de equilíbrio, foram em média de 39%;
- as amostras de galhos sem casca secaram em média de 28% mais rápido que os galhos com casca;
- as amostras de galhos com diâmetros entre 12 a 60 milímetros, secaram de 32 a 54% mais lentamente que as de diâmetros menores que 12 milímetros, mostrando que, para a secagem, existe influência dos diâmetros das amostras;
- todas as amostras diminuíram a umidade em mais de 50% em relação à base seca, até as três primeiras semanas.

A FIGURA 31 apresenta comparações dos resultados das taxas de secagem entre as amostras deixadas ao tempo e de amostras deixadas concomitantemente para secagem dentro do laboratório.

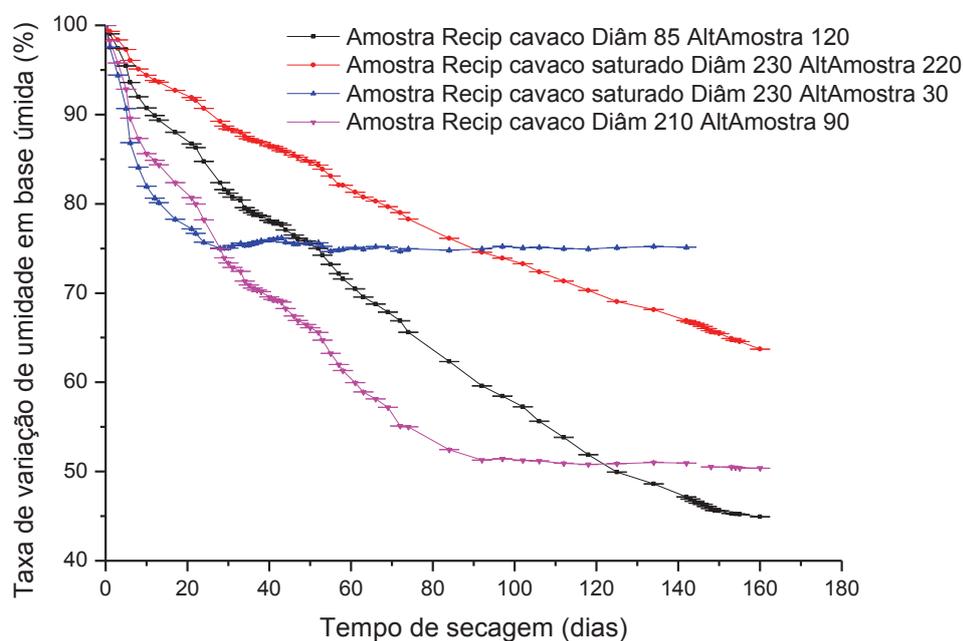
FIGURA 31 - TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE FARDOS DE GALHOS E FOLHAS DO *Ligustrum lucidum*



FONTE: O autor (2015).

Quanto às amostras de cavaco de *Ligustrum lucidum*, armazenadas em recipientes dentro do laboratório, tiveram as seguintes variações nas taxas de umidade, conforme a FIGURA 32:

FIGURA 32 - TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE EM AMOSTRAS DE CAVACO DEIXADAS EM RECIPIENTES DENTRO DO LABORATÓRIO AO ABRIGO



FONTE: O autor (2015).

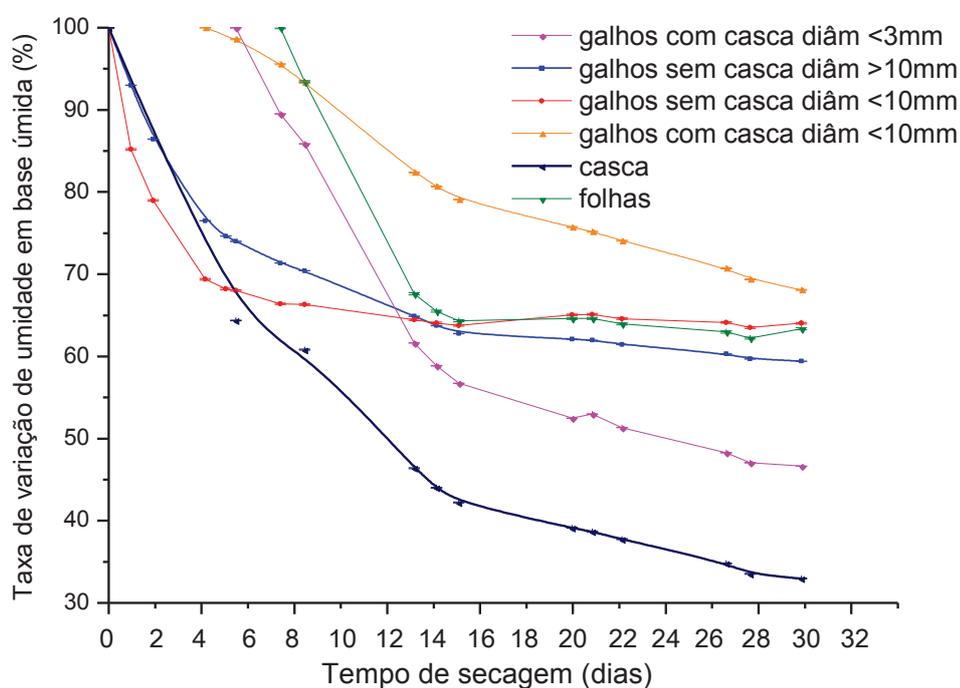
b) *Schinus molle*

Os dados do levantamento das taxas de secagem das amostras de *Schinus molle* submetidas à secagem natural dentro do laboratório está mais detalhada no QUADRO A3 no APÊNDICE 1 e ilustrado pelas FIGURA 33 e TABELA 25.

Para os galhos sem casca de até 1,6 metros de comprimento, verificou-se a tendência em perder mais umidade nos 13 primeiros dias e em estabilizar a partir dali, com perda de massa de 34,8% em relação à base seca. As cascas tiveram decréscimo 29,35% nos 13 primeiros dias. Para os galhos com casca de 40 a 60 centímetros, a perda foi mais significativa nos oito primeiros dias, 30,7%, depois tenderam a se estabilizar.

Verificou-se que a perda média de umidade nos ramos, em 33 dias, em relação à base seca foi de 39,4%. As folhas e os galhos com casca, foram monitorados a partir do sexto dia. Em sete dias, as folhas perderam 50,2% de umidade em relação à base seca, com decréscimo de 35% em seu peso total, mostrando estabilidade a partir deste dia.

FIGURA 33 - TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE GALHOS, CASCAS E FOLHAS DA *Schinus molle* DEPOSITADAS AO ABRIGO



FONTE: O autor (2015).

TABELA 25 - TAXAS DE DECRÉSCIMO DE UMIDADE EM RELAÇÃO À BASE SECA DAS AMOSTRAS DE *Schinus molle*

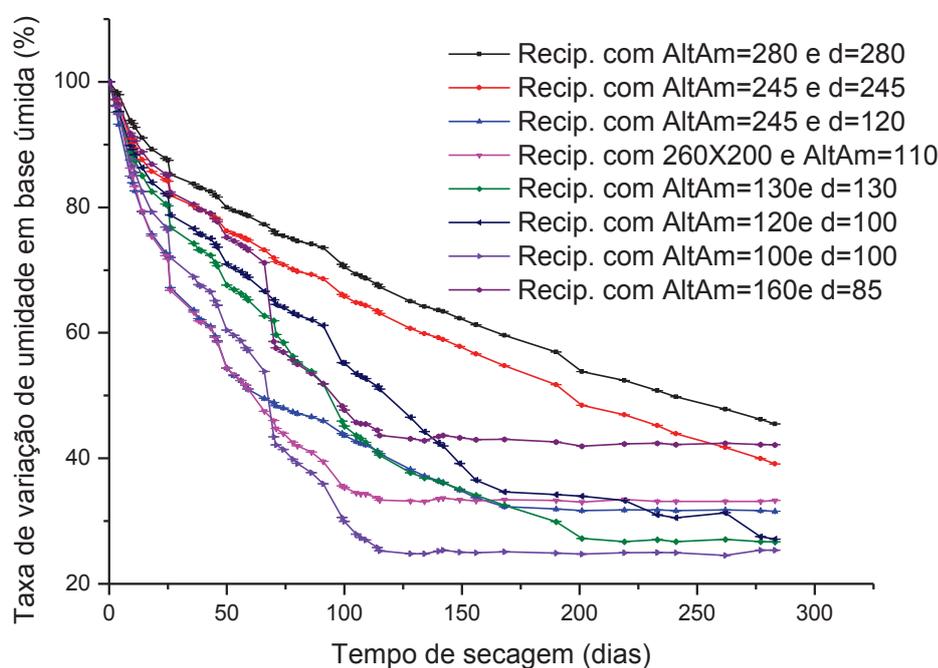
<i>Schinus molle</i>	\bar{W}_s (%)	Período de maior decréscimo de umidade (dias)	Período de estabilização (dias)
Galhos com casca	30,7 (até o 8º. dia)	8	33
Galhos sem casca	34,8 (até o 13º. dia)	5	13
Casca	29,4 (até o 13º. dia)	13	
Folhas	50,2 (até o 7º. dia)	6	7

FONTE: O autor (2015).

As taxas de perda de umidade, até atingir a umidade de equilíbrio foram em média de 37% para galhos com diâmetros menores que 10 milímetros, 67% em média para casca e em média de 38% para as folhas.

Os resultados das taxas de variação da umidade em amostras de folhas de *Schinus molle* deixadas em recipientes dentro do laboratório estão indicadas na FIGURA 34.

FIGURA 34 - TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE EM AMOSTRAS DE FOLHAS DE *Schinus molle* DEIXADAS EM RECIPIENTES AO ABRIGO



FONTE: O autor (2015).

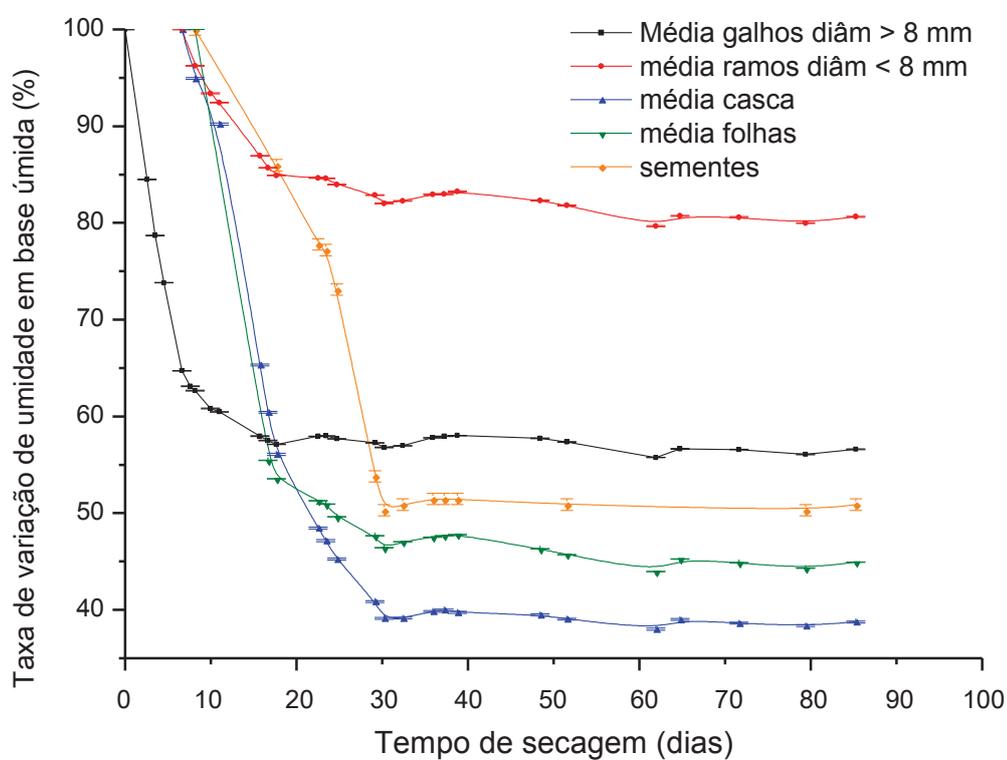
c) *Eucalyptus sp.*

A determinação média da densidade básica do *Eucalyptus sp.*, recomendada por Chave (2006), foi realizada pelo método de medição volumétrica a partir do formato tronco cônico dos galhos, que ficou em média de $948,9 \text{ kg/m}^3$.

O perfil das taxas de secagem das amostras de *Eucalyptus sp.* submetidas à secagem natural dentro do laboratório está indicado no QUADRO A4 no APÊNDICE 1 e detalhado na FIGURA 35. Os galhos sem casca tinham diâmetros de 12 a 50 milímetros. Os ramos com casca tinham diâmetros menores do que 12 milímetros.

De modo geral, ou seja, para a maioria das amostras, verificou-se a tendência em estabilizar a secagem a partir do 13º dia. As taxas de perda de umidade, até atingir a umidade de equilíbrio foram em média de 43% para galhos com diâmetros maiores que oito milímetros, 61% em média para casca e em média de 55% para as folhas.

FIGURA 35 - TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE COMPARTIMENTOS DE *Eucalyptus sp.*, (GALHOS, FOLHAS, CASCAS E SEMENTES)



FONTE: O autor (2015).

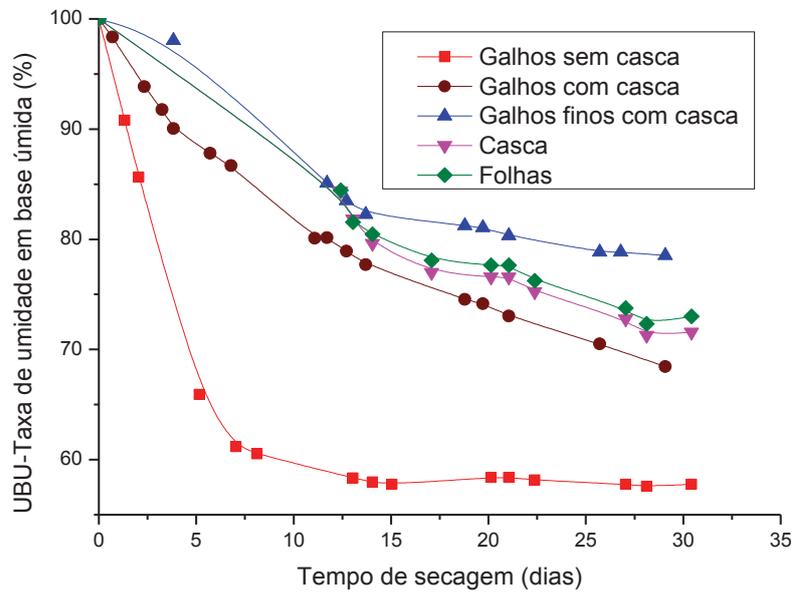
d) *Pinus sp.*

O perfil das taxas de secagem das amostras de *Pinus sp.* submetidas à secagem natural dentro do laboratório está inserido no QUADRO A5 no APÊNDICE 1 e detalhado na FIGURA 36. O galho principal de *Pinus sp.* foi obtido diretamente do caule da árvore, tinha comprimento de 1,4 metros e diâmetros das extremidades de 45 a 60 milímetros. Sua casca foi removida para estudo em separado. Os galhos ramificados do principal que tinham comprimento de 0,8 a 1,6 metros, seus diâmetros variavam de 12 a 40 centímetros e, aqueles com comprimento de até 80 centímetros, seus diâmetros eram menores do que 12 milímetros.

Verificou-se a tendência em estabilizar a secagem a partir do 14º. dia para a maioria das amostras. Para comparação, a FIGURA 36 indica as taxas de secagem nos galhos principais do *Pinus sp.*. Sua densidade básica de $545,1 \text{ kg/m}^3$, foi determinada pelo mesmo método do *Eucalyptus sp.*.

As taxas de perda de umidade, até atingir a umidade de equilíbrio foram em média de 22% para galhos finos com casca, 32% para galhos grossos com casca e em média de 27% para as folhas.

FIGURA 36 - TAXAS DE SECAGEM DE GALHOS, FOLHAS E CASCAS DO *Pinus sp.* DEPOSITADAS AO ABRIGO

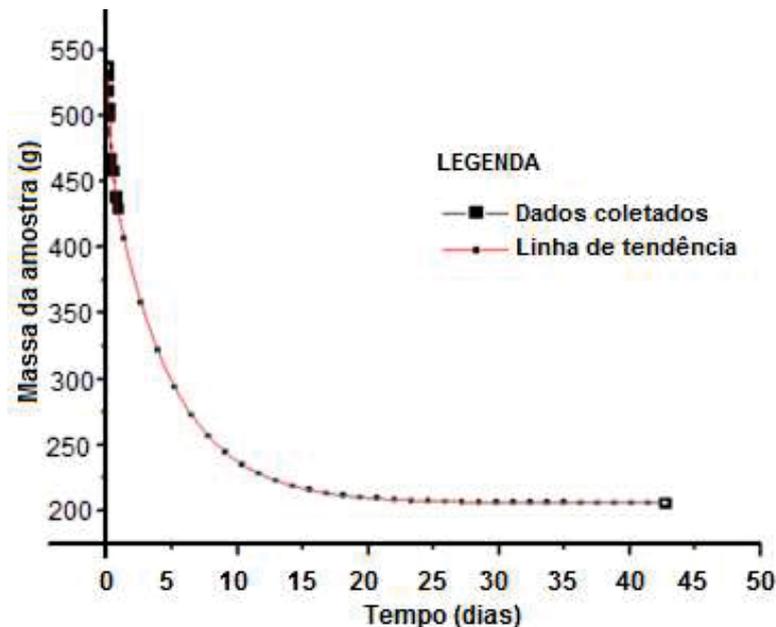


FONTE: O autor (2015).

e) *Schinus terebinthifolius*

Uma amostra representativa de 537,27 gramas de galho com folhas e sementes de *Schinus terebinthifolius* após cortada da árvore, foi levada ao laboratório para secagem natural sem a separação das partes. Após avaliações iniciais horárias e diárias, foi determinado o perfil da taxa de secagem, conforme a FIGURA 37.

FIGURA 37 - TAXA DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE GALHOS DE *Schinus terebinthifolius*



FONTE: O autor (2015).

De modo geral, verifica-se a tendência em estabilizar a secagem a partir do 23º. dia. A equação (4.1) encontrada para o perfil da secagem desta amostra foi:

$$y = \left(264 \text{EXP} \left(-\frac{x}{4,7 \text{EXP} 5} \right) \right) + 66,5 \text{EXP} \left(-\frac{x}{2 \text{EXP} 4} \right) + \text{matéria seca remanescente} \quad (4.1)$$

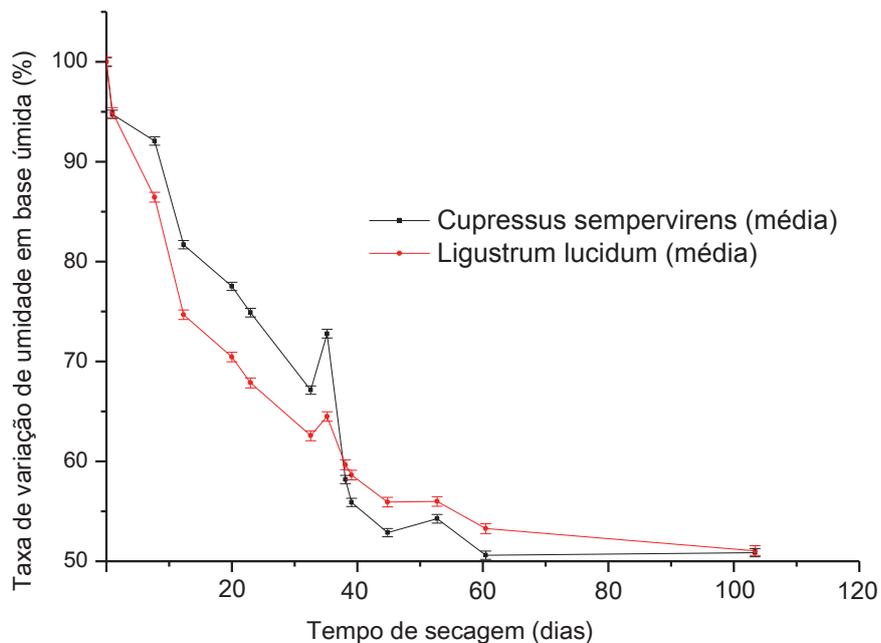
Onde:

- x: tempo decorrido em segundos
- y: massa residual da biomassa após secagem.

f) *Cupressus sempervirens* (cipreste)

Os resultados das taxas de variação da umidade de amostras de galhos de *Cupressus sempervirens* deixadas em fardos ao tempo, conforme o QUADRO A6 do APÊNDICE 1, indicam que a maior taxa de secagem também foi nos primeiros 13 dias (21,7%). Até o 34º. dia, data em que começou a se estabilizar, conforme FIGURA 38, a perda de umidade foi de 35,8%, chegando a 46,1% até o 59º. dia. Até o 125º. dia, chegou ao equilíbrio com 51,1%.

FIGURA 38 - TAXAS DE VARIAÇÃO DA UMIDADE DE GALHOS DO *Cupressus sempervirens* EM COMPARAÇÃO COM OS DE *Ligustrum lucidum*



FONTE: O autor (2015).

4.2.2 Resultados das avaliações das taxas de umidade na parte superficial e no interior da leira depositada no pátio

A respeito das amostras que foram coletadas da leira, para que fosse avaliada e comprovada que existia diferença significativa de taxas de umidade entre a parte superficial e o interior da leira, mesmo estando exposta ao sol, chuva e ventos no pátio da universidade, apresentaram os seguintes resultados após a secagem em estufa:

- aquelas amostras totalizando 483,9 gramas, que foram coletadas da camada de 10 a 20 centímetros do lado externo da leira, apresentaram umidade média em base seca de 37,9%;
- as do lado interno, totalizando 917,6 gramas, retiradas em uma profundidade superior a 35 centímetros, onde o cavaco aparentava aspecto de menor umidade que do lado externo, apresentaram em média 23,9% de umidade em base seca.

Demonstraram assim que do lado externo da leira, o cavaco estava com 2,39 vezes mais umidade que o cavaco localizado no lado interno, TABELA 26, considerando a umidade de equilíbrio de 13,8% em base seca. Esta diferença faz com que se reavalie os procedimentos de disposição do cavaco em leiras exposta às intempéries. As FIGURAS A17 e A18 no APÊNDICE 2 evidenciam esta fronteira pela diferença de coloração no cavaco, onde a coloração mais clara representa o cavaco mais seco.

TABELA 26 – UMIDADE REMANESCENTE DE AMOSTRAS DE LEIRAS DEIXADAS AO TEMPO

	Amostras da camada superficial da leira	Amostras a 35 cm abaixo da superfície da leira
Massa (g)	483,9	917,6
Umidade base seca (%)	37,9	23,9
Umidade de equilíbrio (%)	13,8	13,8

FONTE: O autor (2015).

Deste experimento, com o intuito de explorar este fenômeno e entender por que ele ocorre, uma das amostras de cavaco com umidade de 13,8% que foi deixada na posição inclinada, variando de 10, 20 e 30° e submetida a uma simulação de chuva de 9,4 mm/h, apresentou os seguintes resultados:

- a maior parte da água ali jorrada, 96,3%, escorreu pela região superficial da amostra de cavaco;
- os 3,7% remanescentes, ficaram retidos em uma camada média de até 35 milímetros da superfície;
- abaixo desta camada, o cavaco manteve-se completamente seco, sem que a água tivesse mantido contato.

Evidenciou-se nesse experimento que, apesar do cavaco ter massa porosa, por algum motivo a água escoou quase que totalmente pela região superficial da amostra, com pouca retenção em seu interior, sendo que foi menos intensa nas seguintes situações:

- a) onde a declividade era maior;
- b) onde a compactação era maior e;
- c) onde a incidências de folhas e partículas finas era maior.

Em outro experimento, na comparação dos tempos que leva para cortar galhos secos (com 13,8% de umidade) e verdes, utilizando eletrosserra, se constatou que existiram diferenças significativas entre esses tempos. Os resultados foram os seguintes, conforme a TABELA 27:

TABELA 27 - DIFERENÇAS NO TEMPO DE CORTE ENTRE AMOSTRAS DE *Ligustrum lucidum* SECA E VERDE

Características das amostras	Tempo (s)				Relação de tempos de corte entre amostras secas e verdes
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Média	
Galhos úmidos	4,5	4,7	4,6	4,6	1,57
Galhos secos	7,2	7,1	7,3	7,2	

FONTE: O autor (2016).

Nas amostras de galhos secos o tempo de corte foi de 1,57 vezes maior que dos galhos verdes, corroborando com informações nas TABELAS 7 e 8 da Seção 2.2, que relata estudos de Moraes et al. (2009) e Calil et al. (2014), sobre as propriedades mecânicas da madeira, como por exemplo, tensões de cisalhamento e resistência mecânica. Esses experimentos demonstraram que existe também diferenças significativas dessas propriedades mecânicas entre a madeira seca e a madeira úmida, saturada em água. Houve influência, além do tempo gasto para cortar e na dificuldade em se cortar, também na energia consumida, onde foram maiores com a madeira mais seca.

4.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DA BIOMASSA

4.3.1 Características qualitativas da biomassa

- a) densidade aparente e granulometria média

Conforme a TABELA 28, as amostras de cavaco que foram utilizadas nas corridas da fornalha, deixadas em recipientes para secagem no laboratório, após a avaliação com o densímetro, apresentaram densidade média aparente de 146,8 kg/m³. Assim, de acordo com a

NBR 14984, foi classificada como biomassa leve pois teve menos que 500 kg/m^3 . A mesma TABELA apresenta também a granulometria das amostras submetidas ao peneiramento.

TABELA 28 – DENSIDADE APARENTE MÉDIA E GRANULOMETRIA DAS AMOSTRAS DE CAVACO

	Densidade aparente média (kg/m^3)	Granulometria (%)	Esfericidade
Dimensões maiores que 10X50 mm	95,1	22,5	$\leq 0,3$
Ficou retido na peneira de 4,5X22 mm	132,1	27,3	$\leq 0,5$
Passou na peneira de 4,5X22 mm	150,1	14,2	$\leq 0,6$
Ficou retido na peneira de 3 mm	211,9	25,1	$\leq 0,7$
Passou na peneira de 3 mm	212,1	10,9	$\leq 0,8$
Média ponderada	146,8		

FONTE: O autor (2015).

b) determinação do teor de umidade

A umidade natural na biomassa estudada, em sua avaliação final, variou em média de 13,2% a 21,2% em relação à base seca. O maior percentual em base úmida foi encontrado nas flores, seguida pelas folhas, casca e por último no caule. Não foram encontradas diferenças significativas entre a secagem de galhos em ambiente aberto e fechado.

A TABELA 29 apresenta as taxas de umidade de *Ligustrum lucidum* em base úmida, W_u e em base seca W_s , tomando como referência as massas das amostras de compartimentos em base úmida, M_u , e em base seca, M_s .

TABELA 29 – TEOR DE UMIDADE EM RELAÇÃO À BASE SECA E ÚMIDA DO *Ligustrum lucidum*

Compartimento	M_u (g)	M_s (g)	\bar{W}_u (%)	\bar{W}_s (%)
Folhas	70,6	60,7	14,02	16,30
Galhos	136,6	122,3	10,47	11,69
Total	207,2	183	11,68	13,22

FONTE: O autor (2015).

Para as amostras de cavaco de *Ligustrum lucidum* que foram utilizadas nas corridas da fôrnalha, a TABELA 30 apresenta a determinação da umidade em base seca e úmida.

TABELA 30 – MÉDIA DAS MASSAS DAS AMOSTRAS COM AS RESPECTIVAS UMIDADES

Amostra n.º	M_u (g)	M_s (g)	\bar{W}_u (%)	\bar{W}_s (%)
1	799,5	659,8	17,5	21,2
	493,0	446,4		
2	500,0	436,1	12,1	14,2
	506,0	434,6		

FONTE: O autor (2015).

c) análise química imediata e poder calorífico

A análise química imediata e o poder calorífico dos compartimentos das amostras das árvores - galhos, casca, folhas, sementes e flores, foram realizadas no Laboratório de Energia de Biomassa Florestal e Bioenergia do Curso de Engenharia Florestal da UFPR onde estão especificadas na TABELA 31:

TABELA 31 - PODER CALORÍFICO MÉDIO E RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS IMEDIATAS DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

Amostras	PCS		PCI		PCU		Materiais voláteis	Carbono fixo	Cinzas	
	kcal/kg	kJ/kg	kcal/kg	kJ/kg	kcal/kg	kJ/kg	%	%	%	
Galhos	<i>Ligustrum lucidum</i>	4.434	18.552	4.183	17.502	3.622	15.154	78,51	17,47	4,02
	<i>Lagerstroemia indica</i>	4.399	18.406	4.160	17.406	3.601	15.067	75,93	20,47	3,60
	<i>Schinus molle</i>	4.708	19.699	4.433	18.548	3.842	16.075	67,20	28,96	3,85
	<i>Tipuana tipu</i>	4.429	18.531	4.132	17.289	3.577	14.966	67,64	27,43	4,93
	<i>Cassia fistula, L.</i>	4.331	18.121	4.152	17.372	3.594	15.037	74,31	21,00	4,69
	<i>Schinus terebinthifolius</i>	4.362	18.251	4.108	17.188	3.555	14.874	82,29	17,00	0,70
Folhas	<i>Ligustrum lucidum</i>	4.900	20.502	4.526	18.937	3.924	16.418	69,12	24,61	6,28
	<i>Lagerstroemia indica</i>	4.456	18.644	4.218	17.649	3.652	15.280	72,24	23,38	4,39
	<i>Schinus molle</i>	5.094	21.314	4.757	19.904	4.128	17.272	68,47	24,02	7,52
	<i>Tipuana tipu</i>	4.549	19.033	4.215	17.636	3.650	15.272	77,26	21,05	1,69
	<i>Cassia fistula, L.</i>	5.363	22.439	5.061	21.176	4.396	18.393	75,54	19,74	4,72
	<i>Schinus terebinthifolius</i>	4.734	19.808	4.472	18.711	3.877	16.221	79,94	18,65	1,40
Casca	<i>Ligustrum lucidum</i>	4.526	18.937	4.271	17.870	3.699	15.477	69,71	24,66	5,64
	<i>Lagerstroemia indica</i>	3.377	14.130	3.203	13.402	2.757	11.535	69,77	23,86	6,36
	<i>Schinus molle</i>	4.704	19.682	4.376	18.310	3.792	15.866	75,46	19,92	4,63
	<i>Tipuana tipu</i>	4.035	16.883	3.728	15.598	3.220	13.472	80,38	18,70	0,91
	<i>Cassia fistula, L.</i>	4.262	17.833	3.978	16.644	3.441	14.397			
	<i>Schinus terebinthifolius</i>	4.231	17.703	4.026	16.845	3.483	14.573	78,10	19,89	2,02
Sementes	<i>Ligustrum lucidum</i>	5.371	22.473	5.048	21.121	4.385	18.347	73,70	23,03	3,27
Flores	<i>Cassia fistula, L.</i>	5.165	21.611	4.891	20.464	4.246	17.765	65,02	27,99	6,99

FONTE: O autor (2015).

Para fins de cálculo do poder calorífico inferior (PCI) e do poder calorífico útil (PCU), foi utilizada a umidade em base seca de 14,2%, e a relação percentual entre compartimentos. Foi obtida a partir de avaliações das amostras da biomassa residual, que apresentou os seguintes resultados de acordo com a TABELA 32, levando em consideração a umidade de equilíbrio natural e secagem na estufa:

TABELA 32 – RELAÇÃO PERCENTUAL ENTRE GALHOS, CASCAS E FOLHAS DAS AMOSTRAS DE BIOMASSA RESIDUAL DE *Ligustrum lucidum* E *Schinus molle*

Espécies avaliadas	Condições de secagem	Relação percentual				
		Galhos/total	Casca/total	Folhas/total	Folhas/galhos	Casca/galho
<i>Ligustrum lucidum</i>	Até atingir a umidade natural	70,36%	12,26%	17,38%	24,5%	17,3%
	Após estufa	64,0%	11,5%	24,5%	32,5%	-
<i>Schinus molle</i>	Verde	52,92%	26,23%	20,85%		-
	Até atingir a umidade natural	71,82%	10,47%	17,71%	23,7%	-
Média do <i>Ligustrum lucidum</i> e <i>Schinus molle</i>	Até atingir a umidade natural	71,09%	11,37%	17,54%	-	-

FONTE: O autor (2015).

Obs.: o “total” representa a parcela total de biomassa residual

A TABELA 33 indica o poder calorífico de cada espécie estudada considerando a média ponderada dos compartimentos de cada amostra, tendo como referência os dados de percentuais indicados na TABELA 32.

TABELA 33 - PODER CALORÍFICO UNITÁRIO DA MÉDIA PONDERADA DAS AMOSTRAS ESTUDADAS

Amostras	Média ponderada do PCU de galhos, folhas e cascas	
	kcal/kg	kJ/kg
<i>Ligustrum lucidum</i>	3.684	15.413
<i>Lagerstroemia indica</i>	3.514	14.702
<i>Schinus molle</i>	3.888	16.267
<i>Tipuana tipu</i>	3.549	14.849
<i>Cassia fistula, L.</i>	3.718	15.556
<i>Schinus terebinthifolius</i>	3.604	15.079
Média total	3.659	15.309

FONTE: O autor (2015).

Os dados a seguir, TABELA 34, apresentam as médias de poder calorífico, densidade e teor de umidade do *Eucalyptus sp.* e *Pinus sp.*, espécies mais encontradas em plantios florestais no estado do Paraná.

TABELA 34 – PODER CALORÍFICO E DENSIDADE DO *Eucalyptus sp.* E *Pinus sp.*

Características	Espécie	<i>Eucalyptus sp.</i>		<i>Pinus sp.</i>	
		kcal/kg	kJ/kg	kcal/kg	kJ/kg
Poder calorífico superior		4.525	18.945,3	4.978	20.841,9
Poder calorífico inferior		3.854	16.135,9	4.122	17.258
Densidade kg/m ³		950*		442**	
Teor de umidade (%)		10,5		12,9	

FONTES: QUIRINO ET AL. (2005)

*Média de densidade entre as espécies de eucalipto aqui estudadas, o autor (2014)

***Pinus sp.* de até 14 anos. Mendes et al. (2004)

4.3.2 Quantificação dos resíduos de plantios florestais e da energia gerada com a queima

De acordo com Szymczak (2015) que estudou os resíduos de *Pinus taeda*, e de Dorini (2015) que estudou resíduos de diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus sp.*, onde respectivamente obtiveram índices médios de 18,23% e de 18,18% em peso de base úmida para os compartimentos - galhos, ramos e folhas que eram retirados das árvores e deixados na floresta, interpolou-se com dados da ABRAF (2013) que mapeou o plantio total dessas espécies no Brasil e no estado do Paraná, conforme a TABELA 13 da Seção 3.11, e dali, foram calculadas as quantidades de resíduos geradas. A partir do poder calorífico inferior indicado na TABELA 34, e considerando as taxas de umidade que foram levantadas neste estudo, de 55% para as folhas e 43% para os galhos de *Eucalyptus sp.* e de 27,1% para as folhas e 32% para os galhos de *Pinus sp.*, conforme FIGURAS 35 e 36, apresentadas nos resultados das taxas de variação da umidade de amostras, na Seção 4.2.1, foram calculados os potenciais energéticos que se poderia gerar com a combustão desses resíduos que eram deixados na floresta na forma de compartimentos. Desta forma, foram preenchidas as TABELAS 35, 36 e 37:

TABELA 35 – ENERGIA QUE PODERIA SER GERADA COM A COMBUSTÃO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE PLANTIOS FLORESTAIS NO BRASIL

Espécie	<i>Eucalyptus sp.</i>			<i>Pinus sp.</i>		
	Consumo na indústria em m ³ /ano*	Produção de resíduos em m ³ /ano	Energia em TJ/ano	Consumo na indústria em m ³ /ano*	Produção de resíduos em m ³ /ano	Energia em TJ/ano
Celulose e papel	55.033.172	16.355.859	250.720,7	9.108.030	1.660.394	12.665,5
Painéis reconstituídos	5.580.247	1.658.449	25.422,5	7.252.635	1.322.155	10.085,4
Indústria madeireira	7.034.315	2.090.598	32.047,0	27.424.294	4.999.449	38.136,0
Subtotal	67.647.734	20.104.906	308.190,2	43.784.959	7.981.998,0	60.886,9
Energia total (TJ/ano)	369.077,1					

FONTE: ABRAF (2013). Demais citações, o autor (2016).

TABELA 36 – ENERGIA QUE PODERIA SER GERADA COM A COMBUSTÃO DE RESÍDUOS PROVENIENTES DE *Eucalyptus sp.* E *Pinus sp.* NO PARANÁ

Espécie	<i>Eucalyptus sp.</i>			<i>Pinus sp.</i>		
	Consumo na indústria em m ³ /ano*	Produção de resíduos em m ³ /ano	Energia em TJ/ano	Consumo na indústria em m ³ /ano*	Produção de resíduos em m ³ /ano	Energia em TJ/ano
Celulose e papel	2.133.952	634.211	9.721,9	3.611.846	658.440	5.022,6
Painéis reconstituídos	216.378	64.308	985,8	2.876.078	524.309	3.999,4
Indústria madeireira	272.761	81.065	1.242,6	10.875.276	1.982.563	15.123,1
Subtotal	2.623.091	779.584	11.950,3	17.363.200	3.165.312	24.145,1
Energia total (TJ/ano)	36.095,4					

*FONTE: ABRAF (2013). Demais citações, o autor (2016).

TABELA 37 – ENERGIA TOTAL QUE PODERIA SER GERADA COM A COMBUSTÃO DOS RESÍDUOS PROVENIENTES DE PLANTIOS FLORESTAIS NO PARANÁ

ESPÉCIE	<i>Eucalyptus sp.</i> + <i>Pinus sp.</i>		
Segmento	Consumo na indústria (m ³ /ano)*	Produção de resíduos (m ³ /ano)	Energia (TJ/ano)
Celulose e papel	5.745.798	1.292.651	14.744,5
Painéis reconstituídos	3.092.456	588.617	4.985,2
Indústria madeireira	11.148.037	2.063.628	16.365,7
Subtotal	19.986.291	3.944.896	36.095,4
Energia total (PJ/ano)	36,09		

*FONTE: ABRAF (2013). Demais citações, o autor (2016).

O aproveitamento dos resíduos de poda de origem florestal no Brasil tem potencial para gerar até 369,1 PJ (peta joules) de energia térmica por ano. No Paraná, tem potencial para gerar até 36,1 PJ de energia térmica por ano. Para fins comparativos, as 10 maiores usinas térmicas do Brasil tem um potencial instalado de 7 GW (giga watts), podendo produzir até 60 TWh/ano (tera watt-hora por ano) de energia elétrica ou 216 PJ/ano. O estado do Paraná tem potencial instalado em usina termelétrica de 1,17 GW de energia, podendo gerar até 10,3 TWh/ano ou 37,1 PJ/ano.

Quanto à exploração da biomassa residual de plantios florestais direcionados à geração de energia, entre os resíduos provenientes de serrarias, de toras para laminação, de toras para papel e celulose e de toras para lenha, se interpolou dados de Gonçalves et al. (2011) para detectar áreas que têm disponibilidade de suprimento ou falta de biomassa em cada região do estado do Paraná. Entre as regiões que têm falta de lenha, também produziram até 68 PJ de energia por ano utilizando os resíduos como combustíveis. Ou seja, a maioria delas supriria sua

demanda de lenha se os resíduos fossem aproveitados, conforme estimativas de consumo realizadas por Bell (2012). Dessa interpolação, se chegou aos seguintes resultados:

a) exploração dos resíduos provenientes de serrarias

A média anual paranaense de produção de toras em serrarias no ano de 2012, conforme a TABELA 10, da Seção 2.5, foi de 11.148.000 m³ e a produção total de resíduos provenientes desta exploração foi de 2.064.000 m³.

Com a sobreposição das FIGURAS 4 e 5 da Seção 2.5, foi elaborada a TABELA 38, indicando que dentre os 46 municípios paranaenses que produziam até 293.000 m³ por ano de *Pinus sp.* para serraria, localizados em regiões com déficit de lenha, poderiam gerar até 6,4 PJ de energia térmica com o aproveitamento total dos resíduos para queima, considerando o poder calorífico inferior médio de 17.260 kJ/kg. Dentre os dois municípios que produziam até 586.000 m³ por ano, localizados em regiões com déficit de lenha, poderiam produzir até 0,9 PJ de energia com o aproveitamento dos resíduos provenientes do desbaste de árvores para serrarias.

Dentre os municípios paranaenses que atendiam à demanda de lenha e que produziam até 293.000 m³ por ano de *Pinus sp.* para serraria, 76 deles poderiam produzir até 10,7 PJ de energia térmica com o aproveitamento dos resíduos. Dentre os que produziam até 586.000 m³ por ano, cinco poderiam produzir até 2,3 PJ de energia e dentre os que produziam até 880.000 m³ por ano um deles poderia produzir até 0,6 PJ.

TABELA 38 – QUANTIFICAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE *Pinus sp.* PARA SERRARIAS, EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA

Produção para serraria (1000 m ³ /ano)	Municípios com déficit de lenha			Municípios que atendiam à demanda de lenha				
	Quantidade de municípios	Possibilidade de geração de energia em TJ/ano			Quantidade de municípios	Possibilidade de geração de energia em TJ/ano		
		Mínima	Máxima	Média		Mínima	Máxima	Média
0 a 293	46	0	6.492	3.246	76	0	10.726	5.363
293 a 586	2	460	920	690	5	1.150	2.301	1.726
586 a 880	0	0	0	0	1	460	691	576
Total	48	460	7.413	3.936	82	1.611	13.718	7.664

FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2011) e o autor (2016).

b) exploração dos resíduos provenientes de toras de *Pinus sp.* para laminação

No estado do Paraná, a média anual de produção de toras *Pinus sp.* para laminação no ano de 2012, de acordo com a TABELA 10 da Seção 2.5, foi de 3.093.000 m³ e a produção de resíduos provenientes desta exploração foi de 589.000 m³.

Com a sobreposição das FIGURAS 4 e 6 da Seção 2.5, se elaborou a TABELA 39 indicando que os municípios paranaenses que produziam por ano até 303.000 m³ de madeira para laminação, 17 deles estavam localizados em regiões com déficit de lenha. Estes municípios poderiam produzir até 4,0 PJ de energia com a queima desses resíduos em termelétricas, considerando o poder calorífico inferior médio de 17.260 kJ/kg. Dentre os que produziam até 606.000 m³ por ano de *Pinus sp.* para laminação, um estava localizado em região com déficit de lenha e poderia produzir até 0,4 PJ de energia com o aproveitamento desses resíduos.

Dentre os municípios paranaenses que atendiam à demanda de lenha, 43 deles poderiam produzir até 11,1 PJ de energia térmica com o aproveitamento dessa biomassa residual.

TABELA 39 – QUANTIFICAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE *Pinus sp.* PARA LAMINAÇÃO, EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA

Produção (1000 m ³ /ano)	Municípios com déficit de lenha				Municípios que atendiam à demanda de lenha			
	Quantidade de municípios	Possibilidade de geração de energia em TJ/ano			Quantidade de municípios	Possibilidade de geração de energia em TJ/ano		
		Mínima	Máxima	Média		Mínima	Máxima	Média
0 a 303	17	0	4.045	2.023	40	0	9.518	4.759
303 a 606	1	238	476	357	2	476	952	714
606 a 910	0	0	0	0	1	476	715	595
Total	18	238	4.521	2.379	43	952	11.184	6.068

FONTE: Adaptado de GONÇALVES ET AL. (2011) e o autor (2016).

c) exploração dos resíduos provenientes de toras de *Pinus sp.* para papel e celulose

A média anual de produção de toras de *Pinus sp.* para papel e celulose no ano de 2012, conforme a TABELA 10 foi de 5.746.000 m³ e a produção de resíduos provenientes desta exploração foi de 1.293.000 m³.

Com a sobreposição das FIGURAS 4 e 7 da Seção 2.5, se elaborou a TABELA 40 indicando que os municípios paranaenses que produziam até 705.000 m³ por ano de toras para celulose e papel, 18 deles estavam localizados em regiões com déficit de lenha. Estes municípios poderiam produzir até 18,8 PJ de energia com a queima desses resíduos em termelétricas, considerando o poder calorífico inferior médio de 17.260 kJ/kg.

Dentre os municípios paranaenses que atendiam à demanda de lenha e que produziam até 293.000 m³ por ano de *Pinus sp.* para produção de papel e celulose, 55 deles poderiam produzir até 32,6 PJ de energia térmica com o aproveitamento dos resíduos dessas árvores.

TABELA 40 – QUANTIFICAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE *Pinus sp.* PARA CELULOSE E PAPEL, EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA

Produção (1000 m ³ /ano)	Municípios com déficit de lenha			Municípios que atendiam à demanda de lenha				
	Quantidade de municípios	Possibilidade de geração de energia em TJ/ano			Quantidade de municípios	Possibilidade de geração de energia em TJ/ano		
		Mínima	Máxima	Média		Mínima	Máxima	Média
0 a 705	18	0	9.965	4.983	52	0	28.789	14.394
705 a 1.411	0	0	0	0	2	1.107	2.216	1.662
1411 a 2.117	0	0	0	0	1	1.108	1.662	1.385
Total	18	0	9.965	4.983	55	2.215	32.667	17.441

FONTE Adaptado de Gonçalves et al. (2011) e o autor (2016).

d) exploração das toras para lenha

A média anual de produção de toras para lenha no ano de 2012, conforme a TABELA 10 foi de 1.437.000 m³.

A TABELA 41 indica a quantidade total de energia térmica que poderia ser gerada dentre os municípios paranaenses com déficit ou que atendiam à demanda de lenha se houvesse o aproveitamento dos resíduos provenientes de árvores destinadas às serrarias, indústrias de laminação e de papel e celulose.

TABELA 41 – QUANTIFICAÇÃO TOTAL DE ENERGIA A PARTIR DA BIOMASSA RESIDUAL DE *Pinus sp.* PARA SERRARIA, LAMINAÇÃO E CELULOSE E PAPEL, EM MUNICÍPIOS PARANAENSES COM DÉFICIT OU QUE ATENDIAM À DEMANDA DE LENHA

Para produção de 1000 m ³ /ano	Possibilidade de geração de energia em TJ/ano total					
	Municípios com déficit de lenha			Municípios que atendiam à demanda de lenha		
	Mínima	Máxima	Média	Mínima	Máxima	Média
Total	698	21.899	11.298	4.778	57.570	31.174

FONTE: O autor (2016).

4.3.3 Quantificação dos resíduos de poda urbana e da energia a ser gerada com a queima

Quanto aos resultados de quantificação da poda realizada pela Prefeitura Municipal de Pato Branco, de adequação e conformação da copa de 17 árvores de porte médio que estavam abaixo da fiação elétrica, foi de 2.610 quilogramas de massa verde, incluindo galhos e folhas, chegando a uma média de 153,5 kg/indivíduo.

Quanto aos levantamentos de resíduos de poda urbana gerados por ano, para que fosse realizada a quantificação futura de suprimento de biomassa na cidade de Pato Branco,

considerando o modelo estatístico de regressão *stepwise*, o erro padrão de estimativa mostra o desvio padrão dos valores residuais para ser 328.602. Este valor foi usado para construir limites de predição para novas observações selecionando a opção de relatório a partir do menu de texto, conforme a TABELA A3 no APÊNDICE 2. A média absoluta de erro (mae), que foi de 223,62 foi o valor médio dos valores residuais. O “dw”, estatística de durbin-watson, testou os valores residuais para determinar se houve alguma correlação significativa com base na ordem em que ocorreram no arquivo de dados.

Para determinar se o modelo poderia ser simplificado, foi necessário avaliar o maior valor de p (0,7316) sobre as variáveis independentes, pertencentes ao comprimento dos galhos (em metros). Para os resultados dos valores de ajustamento do modelo de regressão múltipla *stepwise*, para descrever a relação entre os diferentes parâmetros, uma vez que o valor de p fosse maior ou igual a 0,05, o termo não seria estatisticamente significativo nos 95,0% com maior nível de confiança. Consequentemente, foi considerada a remoção do comprimento dos galhos (m) conforme o QUADRO A7 no APÊNDICE 2, a partir do modelo. Com 65,4% de variabilidade em peso, interpolados com dados fornecidos pela Prefeitura Municipal, a primeira interação apresentou os seguintes resultados a partir de dados coletados em campo, com 2.075 toneladas e volume de 2.127 m³ verdes ou 851 toneladas com 14,2% de umidade, conforme a Tabela 42:

TABELA 42 – QUANTIFICAÇÃO DA GERAÇÃO ANUAL DE RESÍDUOS DE PODA NOS LOGRADOUROS PÚBLICOS DE PATO BRANCO

Nº. de indivíduos levantados no campo	Disponibilidade verde (toneladas)	volume (m³)	Disponibilidade com 14,2% de umidade (toneladas)
24.580	2.075	2.127	851

FONTES: Adaptado de Puhl et al. (2012) e o autor (2016)

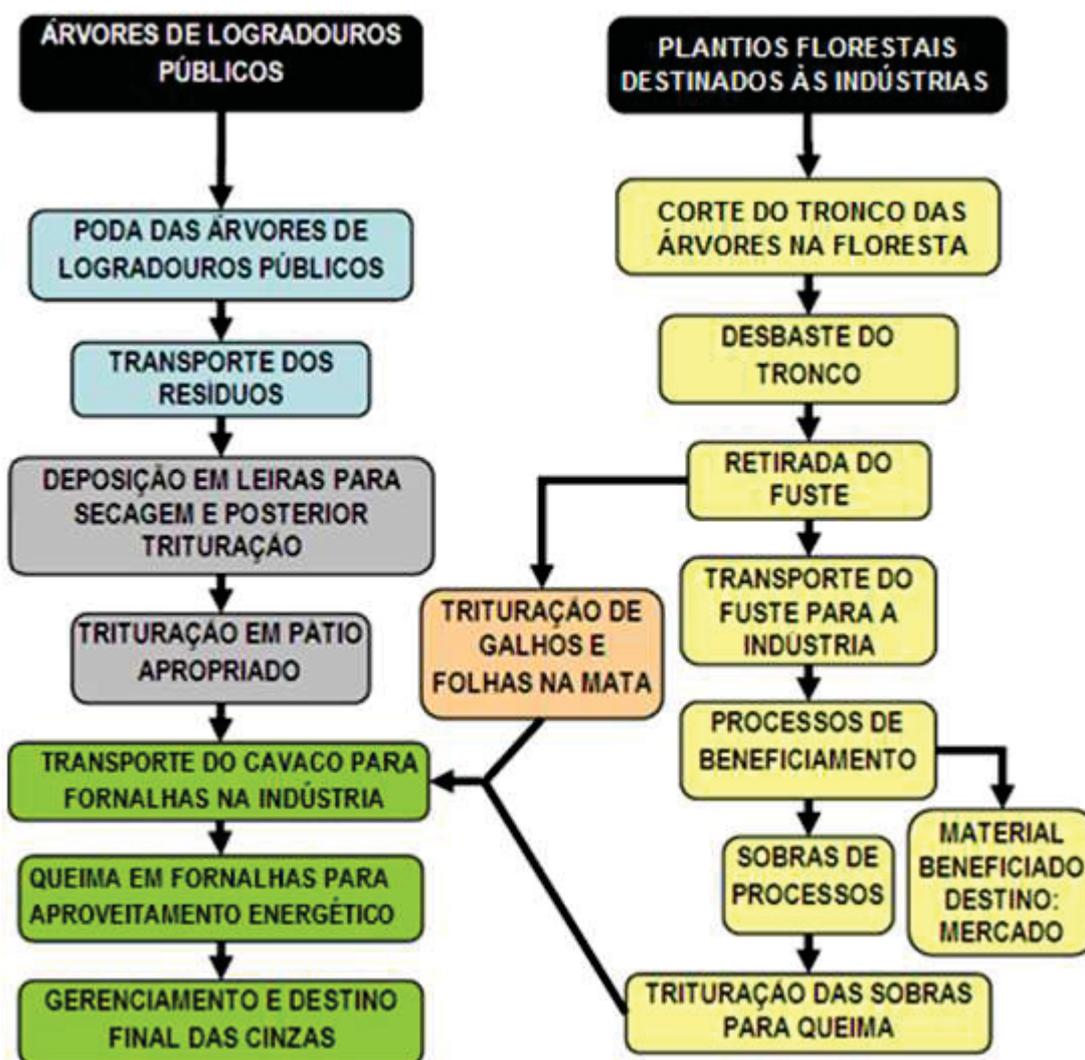
Considerando o poder calorífico médio de 15.310 kJ/kg (3.660 kcal/kg), se todo este resíduo fosse utilizado como combustível, equivaleria a 2.172 GJ/mês (durante os seis meses de poda mais intensa) (em torno de 13.033 GJ/ano) de disponibilidade de energia térmica.

Poderia suprir as necessidades de lenha de uma indústria de alimentos de grande porte localizada na região, onde se produz 5.000 t/mês de ração para consumo animal. Nela se utiliza, em média, um metro cúbico de madeira para cada 29 toneladas de ração animal produzida (consumo mensal de lenha de aproximadamente 175 m³/mês ou 2.100 m³/ano). No Paraná poderiam suprir de energéticos as regiões do estado que tem risco potencial de falta de lenha

com o suprimento de energia e da demanda por lenha, e eventualmente, a exportação (comercialização) do excedente.

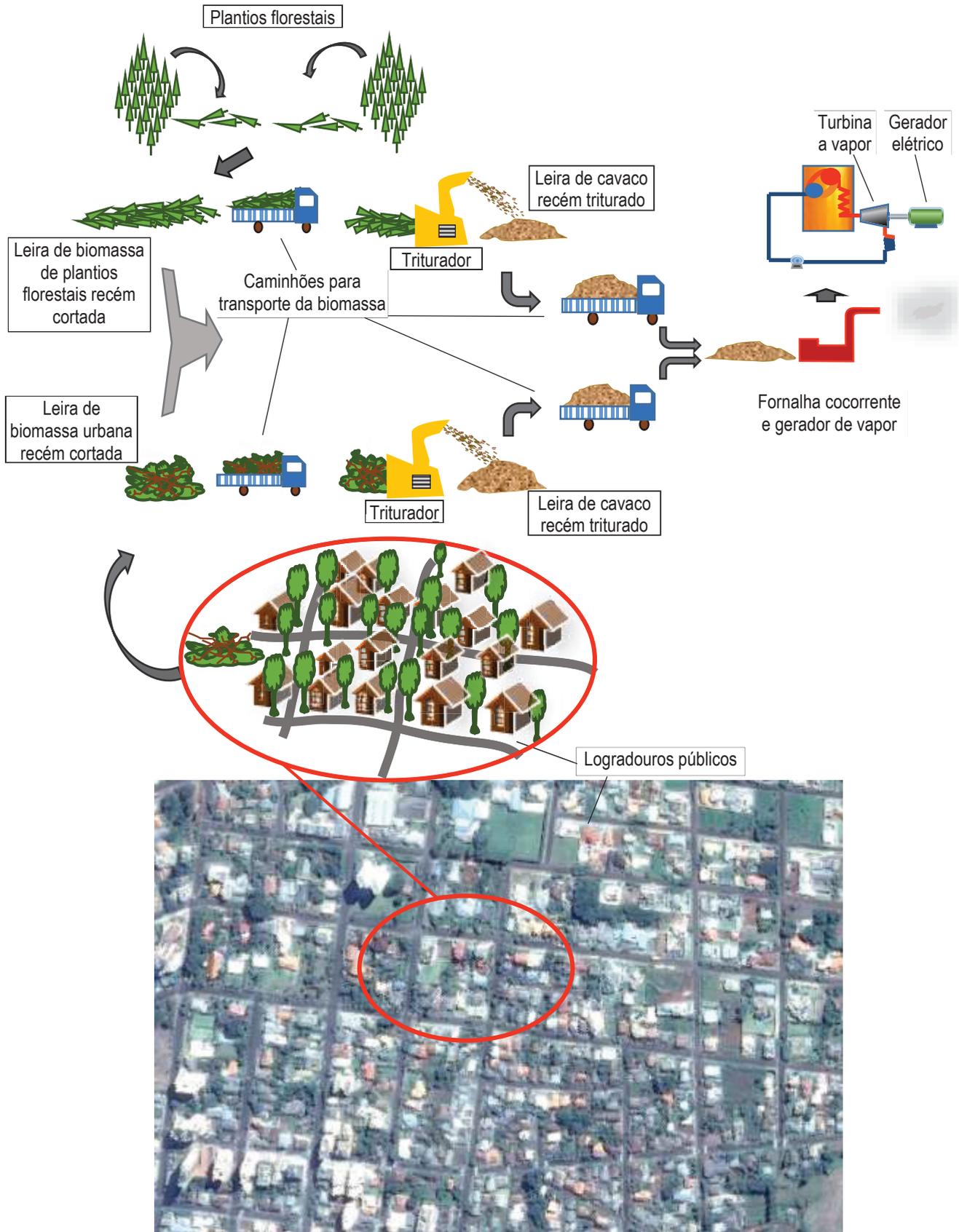
Em síntese, a FIGURA 39 a seguir apresenta procedimentos simplificados para o destino da biomassa residual de plantios florestais e de logradouros públicos, com maior detalhamento na FIGURA 40.

FIGURA 39 - FLUXOGRAMA SIMPLIFICADO DE PROCEDIMENTOS PARA OS RESÍDUOS DA PODA URBANA E DE PLANTIOS FLORESTAIS



FONTE: O autor (2013).

FIGURA 40 - MAPA DE PROCEDIMENTOS PROPOSTO PARA O GERENCIAMENTO DA PODA DE ÁRVORES URBANAS E PLANTIOS FLORESTAIS



FONTE: O autor (2016).

Se evidenciou durante a coleta de dados, tanto para a poda urbana quanto a florestal, que a biomassa logo após a poda fosse depositada em leiras antes de triturá-la. Essa disposição preliminar foi importante para a pré-secagem das folhas, onde nos primeiros dias decresceu de forma considerável, conforme relatado na seção 4.2.1.

Após este período de pré-secagem, os resíduos (galhos, casca, folhas, sementes e flores) foram triturados. Novamente esta biomassa, agora em forma de cavaco, ficou armazenada para que ocorresse a perda mais acentuada de umidade, conforme resultado de amostras retiradas semestralmente das leiras e submetidas à análises.

Assim que a biomassa estivesse em condições adequadas para a queima, foi pesada e utilizada na fornalha de fluxo cocorrente para realizar as corridas.

4.4 RESULTADOS DAS CORRIDAS NA FORNALHA

Dentre as quatro corridas realizadas, devido à ocorrência de falhas técnicas em uma delas, nos resultados serão apresentadas apenas três, onde foi possível realizar testes dos gases e do consumo de ar, com alimentação forçada ou natural de ar, com utilização de diferentes variedades de biomassa, diferentes granulometrias, umidade e quantidade no suprimento.

Na fornalha cocorrente, foram atingidas temperaturas acima de 1.150 °C e emissões de CO, NO_x, SO₂, H₂S, abaixo dos limites permitidos pela Resolução da Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Paraná - SEMA de 2014. O estudo de viabilidade ambiental teve como enfoque principalmente as baixas taxas de emissões de monóxido de carbono e outros gases, onde o estudo de viabilidade técnica para a instalação de usina termelétrica com o aproveitamento do calor da combustão da biomassa residual, mostraram resultados satisfatórios.

Aqui serão apresentados resultados das três corridas realizadas na fornalha, sendo que, cada uma delas gerou mais de um teste com variadas condições de suprimento. Primeiramente serão apresentadas as temperaturas atingidas e análise das concentrações dos gases emitidos ao longo de todos os experimentos, tanto para a combustão da lenha para pré-aquecimento da fornalha, quanto do cavaco seco, de galhos finos, de folhas e também, em alguns testes, do cavaco úmido. Em seguida, os resultados em separado para cada tipo de combustível utilizado, ou seja, emissões de gases para a lenha, que foi utilizada para pré-aquecer a fornalha, depois para o cavaco com galhos e folhas.

4.4.1 Temperaturas

Os valores máximos, mínimos e médios de temperaturas, em graus Celsius (°C), atingidas nas corridas estão representadas nas TABELAS 43, 44 e 45. A TABELA 43 e a FIGURA 41, representam as temperaturas totais entre a partida e o encerramento da primeira corrida.

TABELA 43 – TEMPERATURAS MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS NA PRIMEIRA CORRIDA (°C)

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Valores máx.	877,6	1016,3	976,1	734,6	765,4	148,2	197,4	72,2
Valores mín.	22,5	22,8	22,8	23,1	22,9	23,0	23,1	23,2
Valores méd.	573,6	550,7	536,1	422,0	447,8	79,6	89,4	39,5

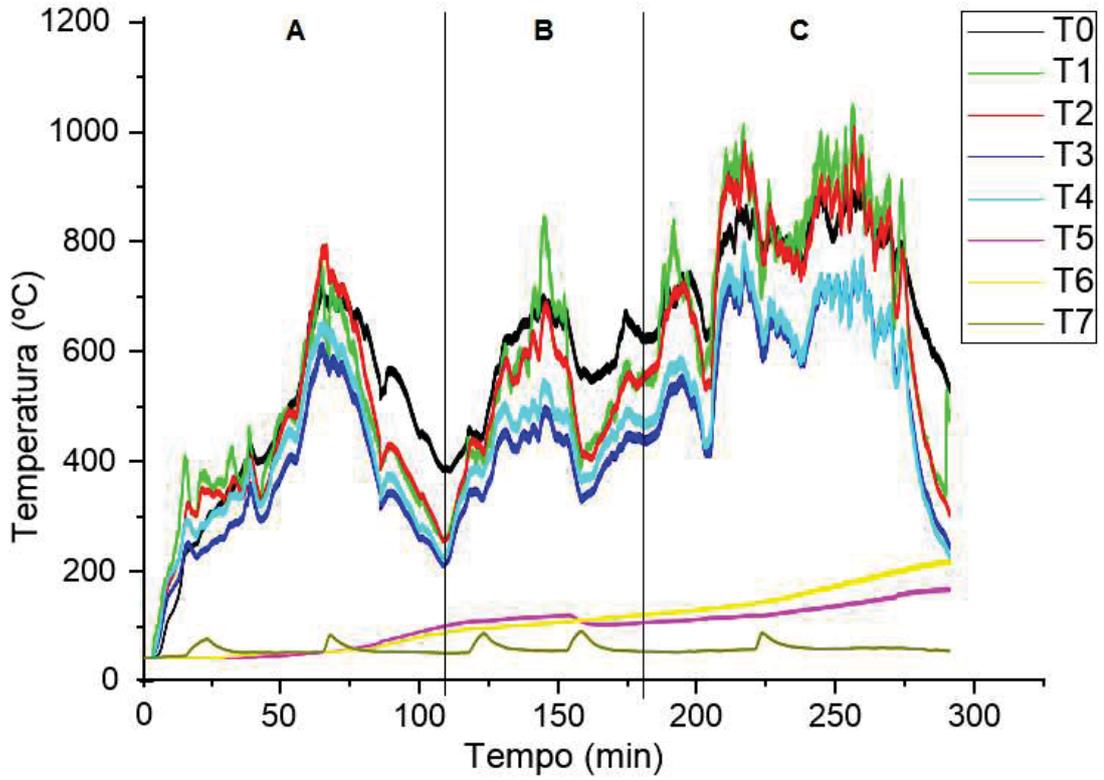
FONTE: O autor (2016).

Onde:

- T0: Temperatura da zona de pirólise (°C);
- T1: Temperatura do início da câmara de combustão (°C);
- T2: Temperatura da saída da câmara de combustão (°C);
- T3: Temperatura da base da chaminé (°C);
- T4: Temperatura do topo da chaminé (°C);
- T5: Temperatura da superfície da zona de pirólise (°C);
- T6: Temperatura externa no meio da câmara de combustão (°C);
- T7: Temperatura na entrada do secador (°C).

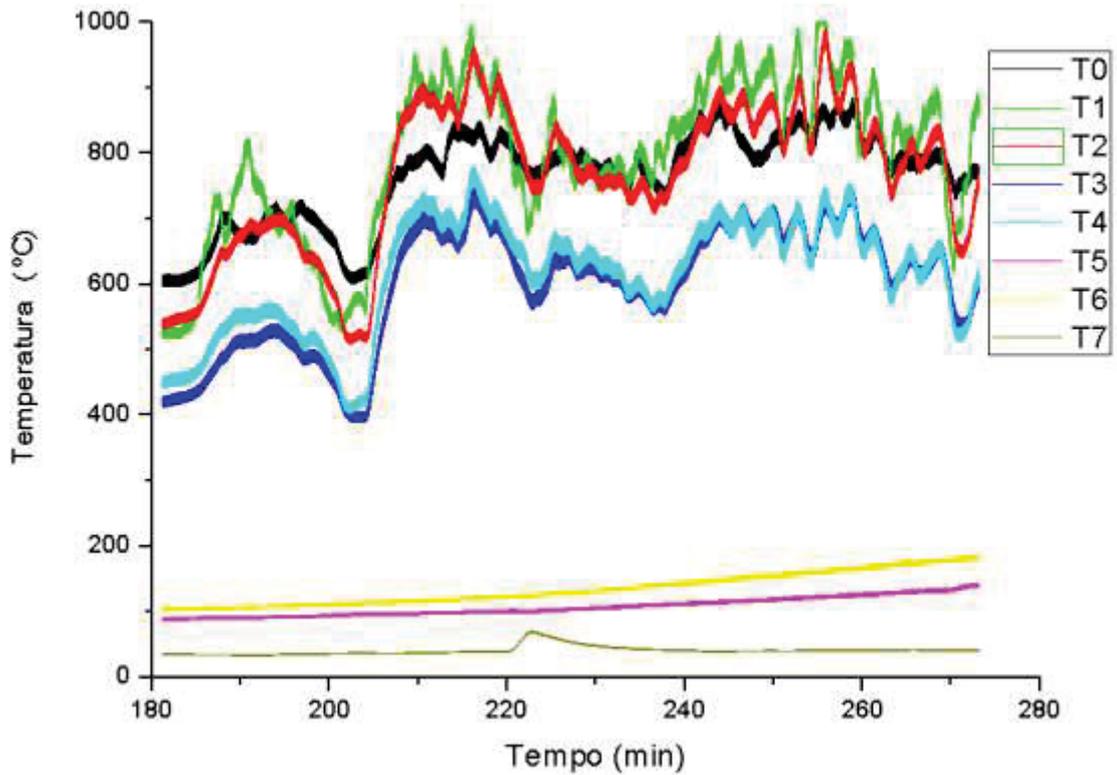
Na FIGURA 41, a seção “A”, representa as temperaturas atingidas durante a partida da primeira corrida, onde foi utilizada lenha. Em seguida, depois de estabilizada a fornalha, após os 111 minutos, se utilizou cavaco. Os resultados de temperatura na seção “B” não foram satisfatórios para o estudo. Na seção “C”, a FIGURA 42 e a TABELA 44, apresentam com maiores detalhes, as temperaturas antes do encerramento da primeira corrida, desde os 180 até os 275 minutos.

FIGURA 41 – TEMPERATURAS NA PRIMEIRA CORRIDA PARA LENHA E CAVACO



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 42 - TEMPERATURAS NA PRIMEIRA CORRIDA PARA O CAVACO



FONTE: O autor (2016).

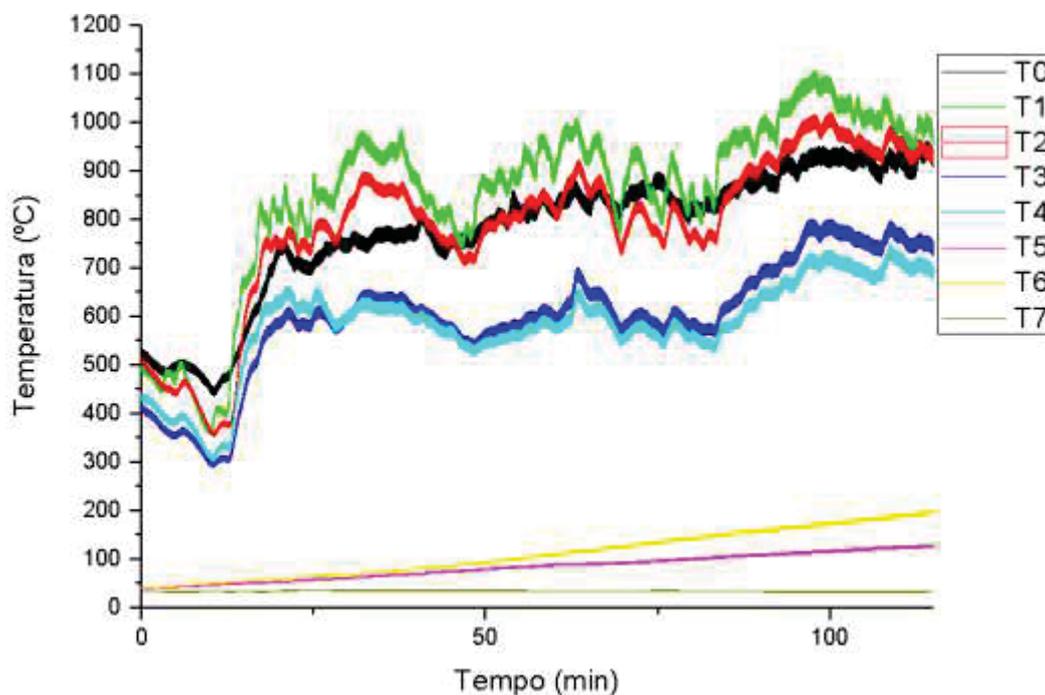
TABELA 44 – TEMPERATURAS MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS NA SEGUNDA CORRIDA (°C)

	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Valores máx.	964,5	1.204,0	1.180,2	1.095,1	948,9	160,5	313,3	44,9
Valores mín.	26,4	28,1	25,9	25,9	26,2	25,0	25,0	24,6
Valores méd.	784,4	904,4	842,2	693,1	644,8	111,6	171,2	34,1

FONTE: O autor (2016).

A FIGURA 43, apresenta as temperaturas na partida da segunda corrida, com a utilização de cavaco.

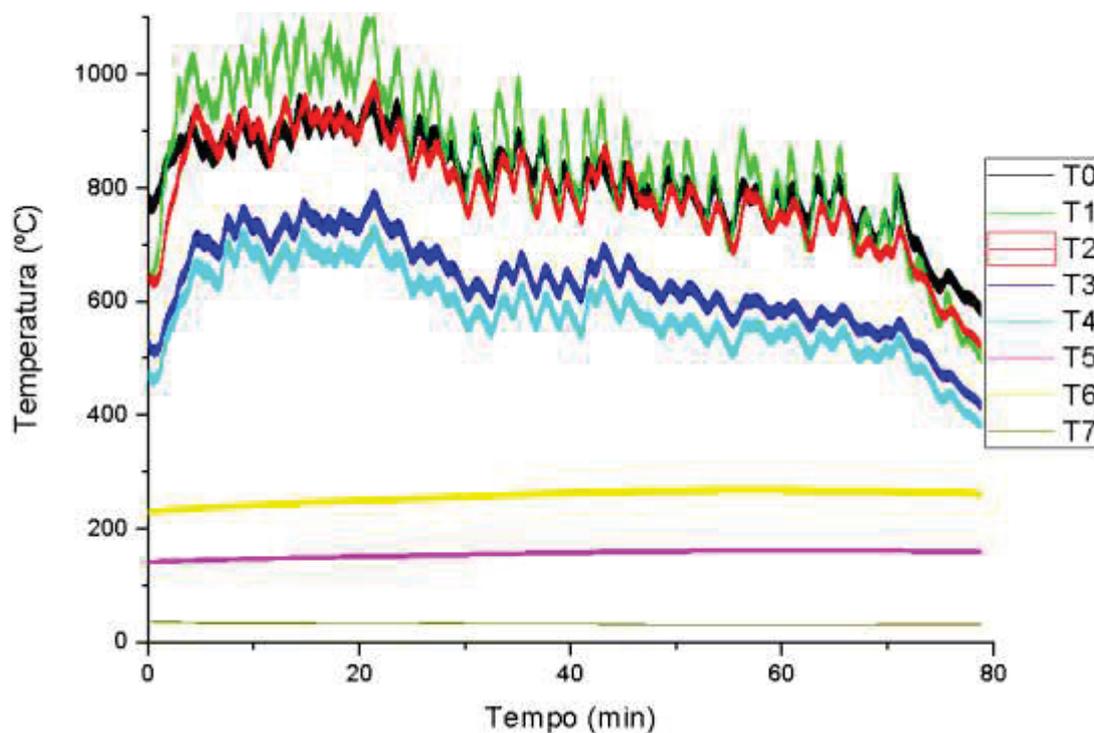
FIGURA 43 - TEMPERATURAS NA SEGUNDA CORRIDA PARA O CAVACO



FONTE: O autor (2016).

Na FIGURA 44, são apresentadas as temperaturas atingidas na segunda corrida, com a utilização de folhas.

FIGURA 44 - TEMPERATURAS NA SEGUNDA CORRIDA PARA FOLHAS



FONTE: O autor (2016).

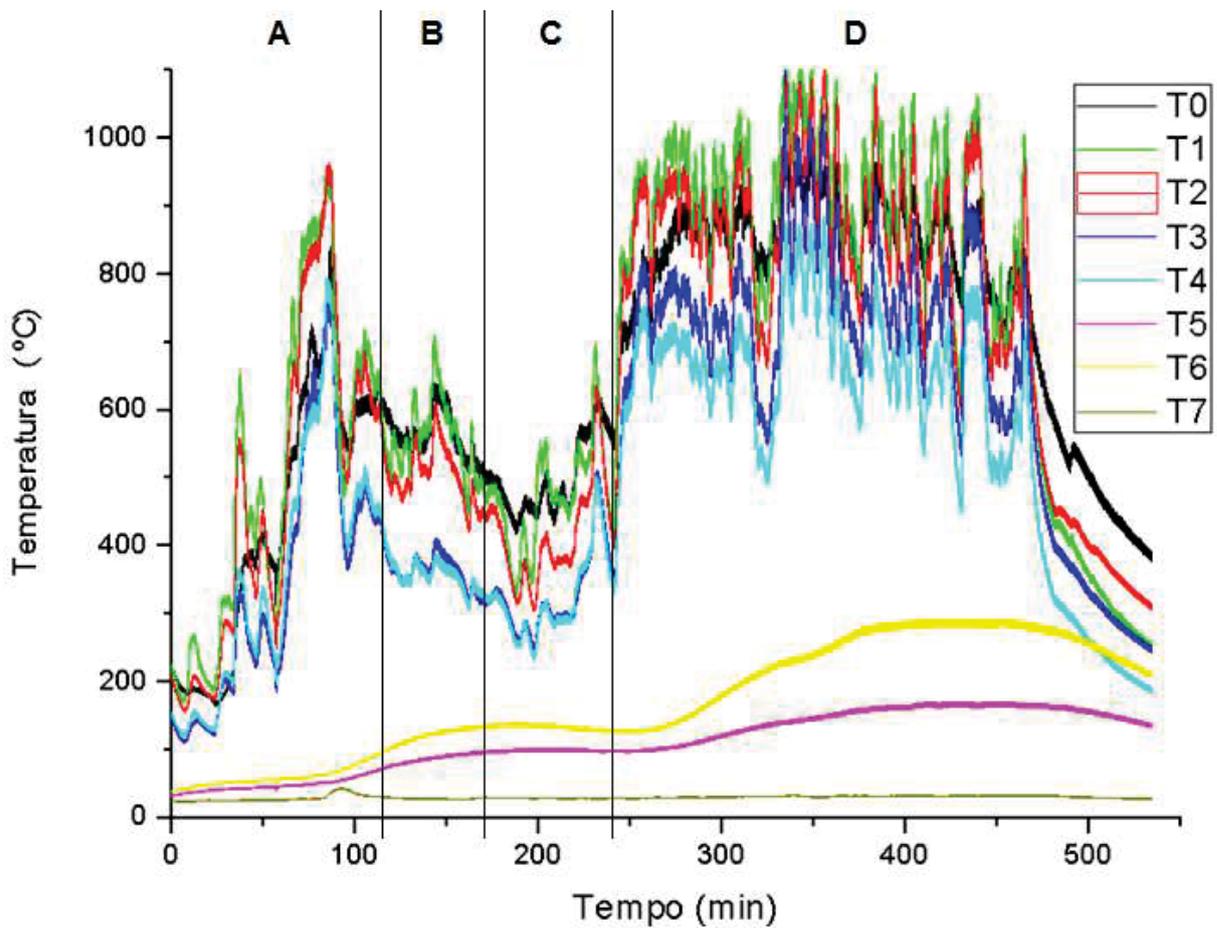
A TABELA 45 e a FIGURA 45 indicam os níveis de temperaturas atingidas na terceira corrida. Do início do processo até o tempo correspondente aos 118 minutos, seção “A”, foi utilizada lenha para pré-aquecimento da fornalha. Dos 118 minutos aos 170, seção “B”, foi utilizado cavaco úmido que atingiu 21,2% de umidade. Dos 170 ao final, partições “C” e “D”, foi utilizado cavaco seco, que atingiu a umidade de equilíbrio, com 14,2%.

TABELA 45 – TEMPERATURAS MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS NA TERCEIRA CORRIDA (°C)

Para a lenha	T0	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Valores máx.	966,5	1.125,6	1.092,0	1.099,5	868,0	166,6	286,5	42,6
Valores mín.	167,9	171,0	157,9	112,8	121,5	32,3	38,7	23,9
Valores méd.	603,8	626,8	592,4	482,1	445,3	104,7	159,8	29,2

FONTE: O autor (2016).

FIGURA 45 - TEMPERATURAS NA TERCEIRA CORRIDA PARA LENHA E CAVACO



FONTE: O autor (2016).

Ao longo do ensaio, ocorreram picos de temperatura, com pontos de máximo e mínimo. Para esclarecer os motivos das ocorrências dos principais picos, o QUADRO 13 a seguir indica os motivos e em qual período de tempo aconteceu.

Na seção “C”, dos 170 aos 240 minutos, foi um período de adaptação entre o término da queima do cavaco a 21,2% de umidade e o cavaco seco, com 14,2% de umidade. Após este período, observa-se que a temperatura T2, onde o termopar estava localizado na saída da câmara de combustão, manteve índices acima de 600 °C até o final da corrida, chegando a mais de 1.000 °C, atingindo a temperatura máxima de 1.092 °C.

QUADRO 13 – MOTIVOS QUE OCORRERAM OS PICOS DE TEMPERATURA NO ENSAIO

Tempo (minutos)	Motivos
54	Fechada entrada de ar falso
70	Abertura de entrada de ar falso
93 a 118	Sem adição de carga
118	Inserção de cavaco
137 a 147	Sem adição de carga
147	Carga cavaco úmido
170	Carga de cavaco seco 14,2% com dimensões maiores que 20 mm
187 até o final	Carga de cavaco seco 14,2% com dimensões menores que 20 mm

FONTE: O autor (2015).

4.4.2 Resultados nas emissões dos gases

As emissões de gases serão apresentadas da seguinte forma: primeiramente as tabelas com as temperaturas na saída da câmara de combustão - T2, e outros gases - CO (ppm), O₂ (%), CO₂ (%), SO₂ (ppm), C_xH_x (%), H₂S (ppm) e NO_x (ppm). Em seguida, os gráficos das corridas mostrando o comportamento do monóxido de carbono (CO) em conjunto com a temperatura na saída da câmara de combustão perante cada configuração de teste nas condições de tempo e parâmetros pré estabelecidos em cada teste. Posteriormente o comportamento das as emissões dos diversos gases em cada corrida para fins de comparação de resultados.

a) concentrações do monóxido de carbono (CO) e a temperatura T2

A TABELA 46 apresenta os testes representados pelas seções A e B, em cada tempo específico, com as temperaturas máximas, mínimas e médias na saída da câmara de combustão (T2) e dos gases da fornalha para o cavaco na primeira corrida, com alimentação de 25 kg/h.

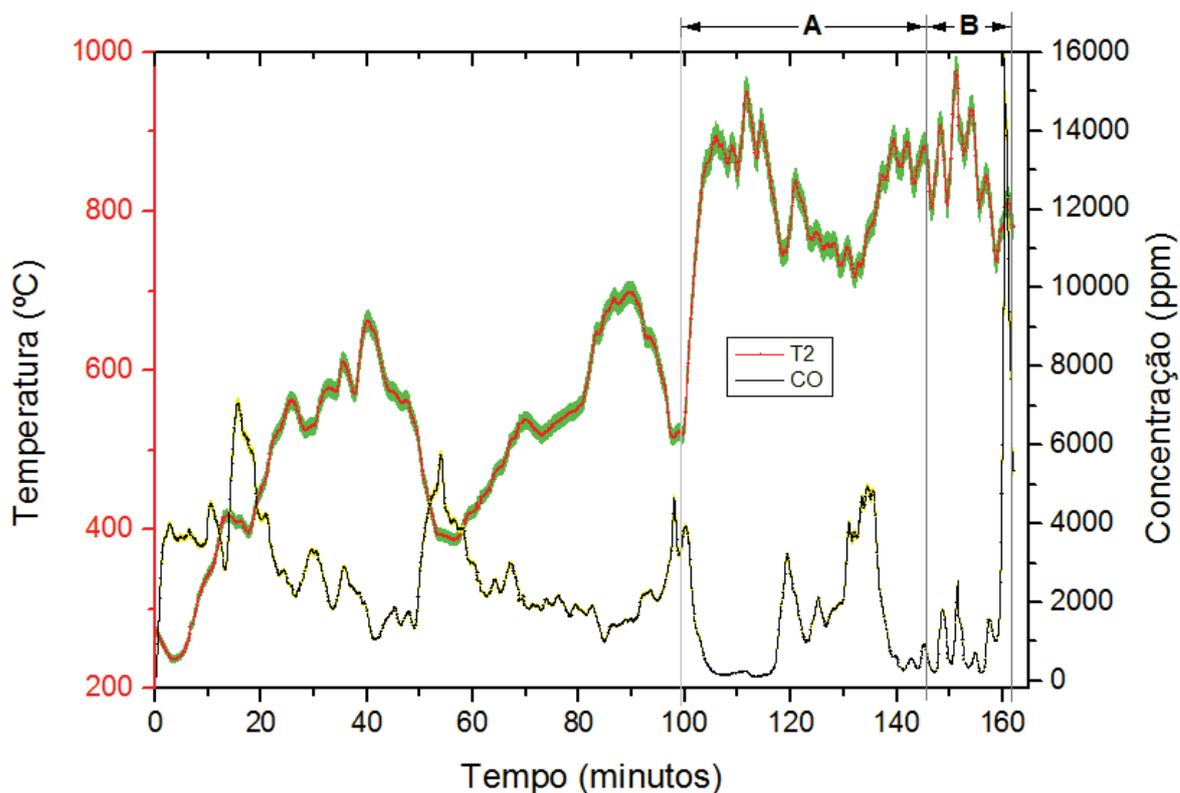
TABELA 46 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE TEMPERATURAS E GASES NA PRIMEIRA CORRIDA, COM O CAVACO A 25 kg/h

Teste	Tempo (minutos)	Parâmetros	Valores	T2 (°C)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	C _x H _x (%)	H ₂ S (ppm)	NO _x (ppm)
A	185 aos 219 minutos	Convecção induzida	Máximo	950,5	4916,9	15,5	17,0	40,6	0,62	82,2	519,4
		Umidade 14,2%	Mínimo	717,5	112,3	8,0	5,5	0,0	0,07	28,2	272,7
		Cavaco grosso 25 kg/h	Médio	813,9	1661,7	13,2	8,9	8,1	0,27	48,6	413,8
B	220 aos 255 minutos	Convecção induzida	Máximo	976,1	15830,4	16,1	14,7	83,4	1,11	90,2	512,8
		Umidade 21,2%	Mínimo	737,2	219,6	10,3	4,3	0,0	0,08	22,4	333,0
		Cavaco grosso 25 kg/h	Médio	846,3	2092,1	13,1	9,1	9,2	0,30	41,1	441,3

FONTE: O autor (2016).

A FIGURA 46 apresenta o comportamento das emissões do monóxido de carbono (CO) perante a variação das temperaturas na saída da câmara de combustão (T2) na primeira corrida, com alimentação de 25 kg/h. As seções A e B, representam cada teste para o cavaco em seu tempo específico.

FIGURA 46 – CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA, COM O CAVACO A 25 kg/h



FONTE: O autor (2016).

Onde a seção “A” representa a configuração de teste 1 onde se utilizou cavaco com 14,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 25 kg/h e tiragem induzida.

A seção “B” representa a configuração de teste 2 onde se utilizou cavaco com 21,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 25 kg/h e tiragem induzida.

A TABELA 47 apresenta os testes representados pelas seções entre A a G, em cada tempo específico, com as temperaturas máximas, mínimas e médias na saída da câmara de combustão (T2) e dos gases da fornalha para o cavaco na segunda corrida, com taxa de alimentação de cavaco a 25 kg/h.

TABELA 47 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE TEMPERATURAS E GASES NA SEGUNDA CORRIDA, COM O CAVACO A 25 kg/h

Teste	Tempo (min)	Parâmetros	Valores	T2 (°C)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	C _x H _x (%)	H ₂ S (ppm)	NO _x (ppm)
A	0 a 12	Convecção induzida	Máximo	511,4	10.853,8	18,2	4,0	138,2	1,34	97,7	338,4
		Cavaco grosso	Mínimo	358,3	6.024,0	16,4	2,1	52,5	0,75	65,7	205,7
		Umidade 21,2%	Médio	435,5	8.588,1	17,3	3,0	97,2	1,06	85,4	267,5
B	13 a 27	Convecção induzida	Máximo	791,6	8.844,6	17,2	12,1	125,7	1,15	86,5	381,6
		Cavaco grosso	Mínimo	376,8	310,8	11,7	3,1	0,8	0,09	14,3	264,1
		Umidade 14,2%	Médio	683,3	1.782,5	13,4	8,8	18,6	0,22	35,4	352,1
C	28 a 38	Convecção natural	Máximo	885,3	390,5	12,6	29,8	3,6	0,12	16,0	276,8
		Cavaco grosso	Mínimo	756,8	117,1	7,7	10,3	0,0	0,08	10,2	201,9
		Umidade 14,2%	Médio	841,8	218,9	9,5	20,3	1,2	0,10	12,6	234,5
D	39 a 50	Convecção natural	Máximo	859,2	776,9	13,7	16,3	7,4	0,21	14,6	305,1
		Cavaco grosso	Mínimo	715,9	109,2	10,4	8,7	0,0	0,10	10,5	242,6
		Umidade 21,2%	Médio	771,7	355,9	12,1	11,8	2,1	0,15	12,7	267,9
E	51 a 82	Convecção induzida	Máximo	909,4	9.002,0	14,2	30,0	49,9	0,55	48,1	260,1
		Cavaco grosso	Mínimo	737,7	122,9	5,6	7,7	0,0	0,09	7,2	159,2
		Umidade 14,2%	Médio	816,5	1.553,6	11,4	14,0	6,6	0,18	14,9	208,9
F	83 a 107	Convecção natural	Máximo	1006,6	2.094,8	13,2	30,0	12,9	0,19	15,1	198,0
		Cavaco fino	Mínimo	746,6	228,3	5,3	9,5	0,3	0,07	2,8	144,8
		Umidade 14,2%	Médio	920,3	573,2	8,1	26,3	1,8	0,10	6,6	162,6
G	108 a 127	Convecção induzida	Máximo	979,3	767,0	13,4	24,0	4,1	0,18	8,6	260,8
		Cavaco grosso	Mínimo	867,6	256,7	8,3	9,2	0,0	0,10	3,1	181,5
		Umidade 14,2%	Médio	931,1	388,8	10,9	14,4	0,3	0,13	5,5	221,0

FONTE: O autor (2016).

A FIGURA 47 apresenta o comportamento das emissões do monóxido de carbono (CO) perante a variação das temperaturas na saída da câmara de combustão (T2) na segunda corrida. As seções entre A a G, representam cada teste para o cavaco em seu tempo específico.

A seção A representa a configuração de teste 3 onde se utilizou cavaco com 21,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 17 kg/h e tiragem induzida.

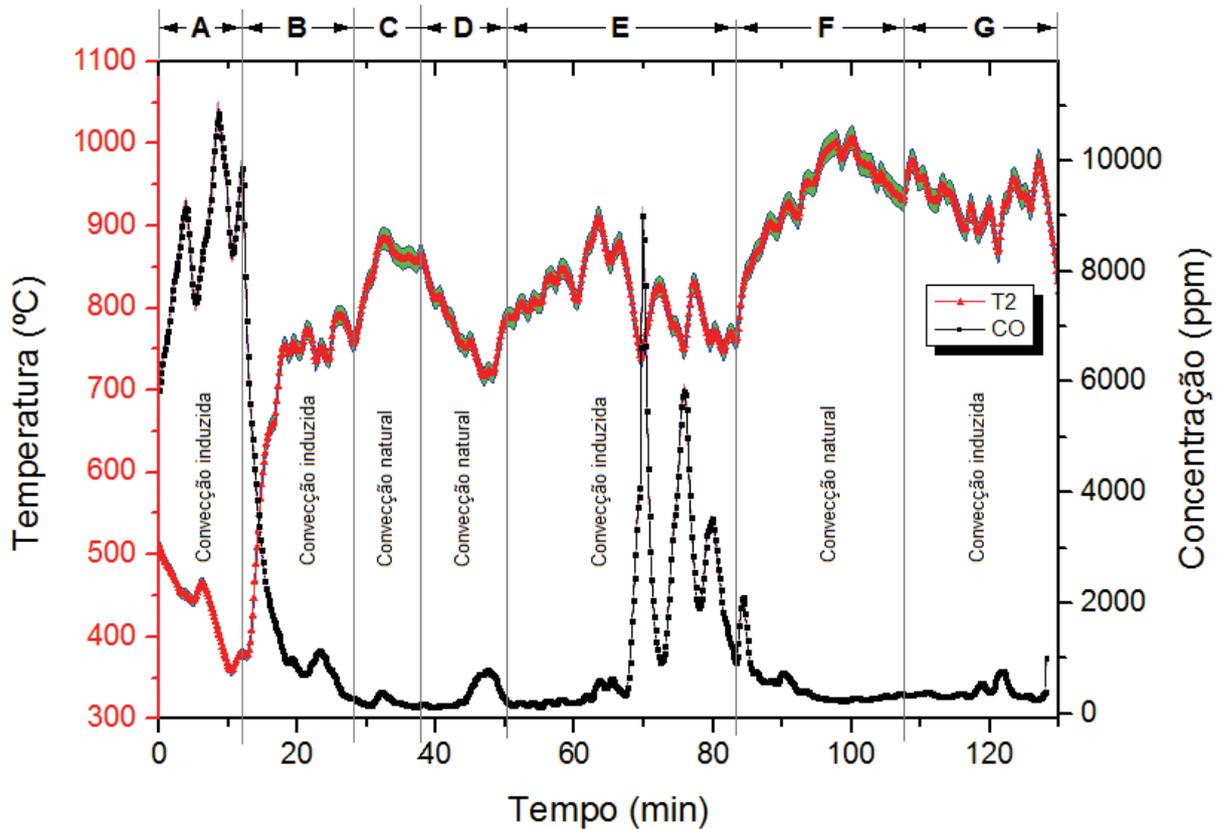
As seções B, E e G representam a configuração de teste 4 onde se utilizou cavaco com 14,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 17 kg/h e tiragem induzida.

A seção C representa a configuração de teste 5 onde se utilizou cavaco com 14,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 17 kg/h e tiragem natural.

A seção D representa a configuração de teste 6 onde se utilizou cavaco com 21,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 17 kg/h e tiragem natural.

A seção F representa a configuração de teste 7 onde se utilizou cavaco com 14,2% de umidade, granulometria fina, alimentação de 17 kg/h e tiragem natural.

FIGURA 47 – CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA, COM CAVACO A 17 kg/h



FONTE: O autor (2016).

A TABELA 48 apresenta os as seções A e B, em cada tempo específico, com as temperaturas máximas, mínimas e médias na saída da câmara de combustão (T2) e dos gases da fornalha para folhas na segunda corrida, utilizando folhas com alimentação de 9 kg/h.

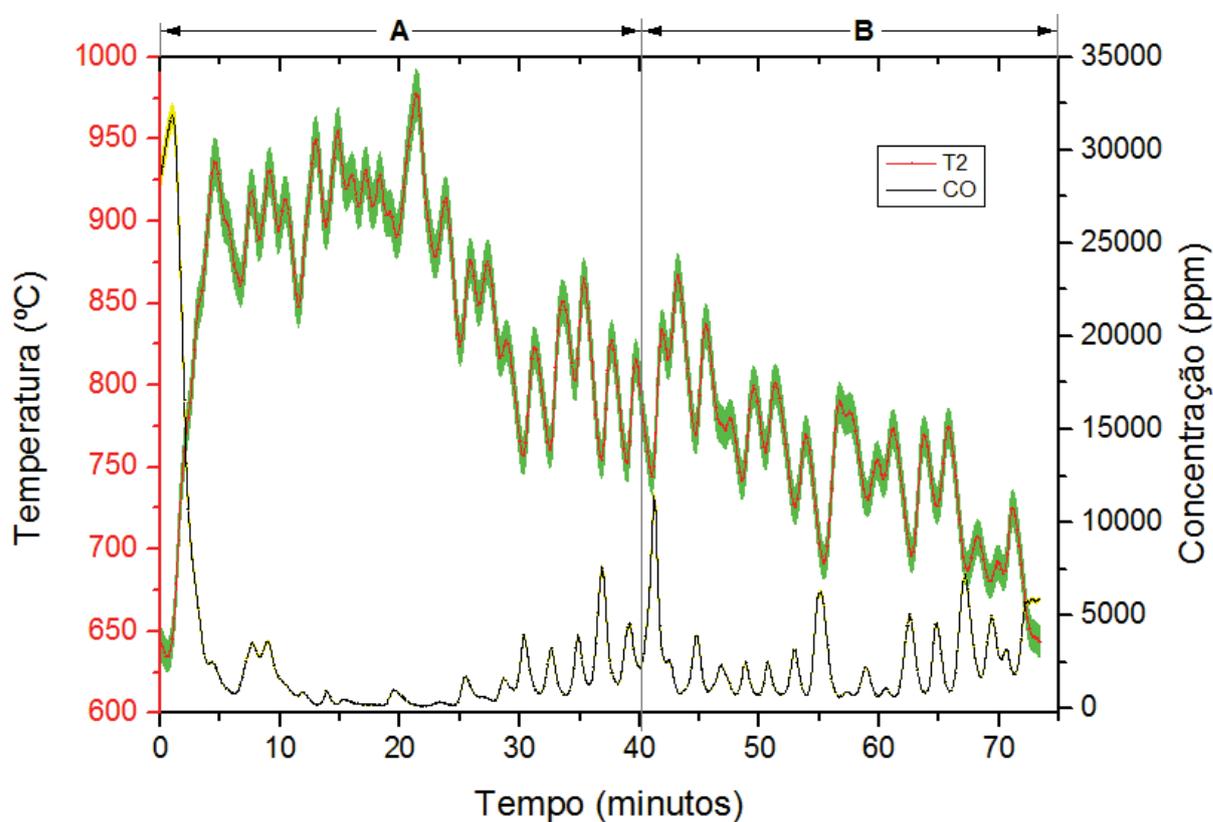
TABELA 48 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE TEMPERATURAS E GASES NA SEGUNDA CORRIDA PARA FOLHAS A 9 kg/h

Seção	Tempo (minutos)	Parâmetros	Valores	T2 (°C)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	C _x H _x (%)	H ₂ S (ppm)	NO _x (ppm)
A	0 aos 40 minutos	Convecção induzida	Máximo	977,7	31.872,2	17,4	30,0	120,7	1,77	132,9	426,2
		Umidade 14,2%	Mínimo	635,1	141,3	5,7	2,8	1,1	0,06	1,5	145,3
		Folhas a 9 kg/h	Médio	855,4	3.095,5	12,4	12,4	14,8	0,28	16,5	245,2
B	41 aos 79 minutos	Convecção natural	Máximo	867,2	11.386,0	18,5	30,0	73,9	0,90	62,6	472,3
		Umidade 14,2%	Mínimo	629,4	632,0	6,8	2,3	0,0	0,07	0,0	212,1
		Folhas a 9 kg/h	Médio	749,1	2.474,7	14,3	8,7	15,5	0,32	12,1	323,0

FONTE: O autor (2016).

A FIGURA 48 apresenta o comportamento das emissões do monóxido de carbono (CO) perante a variação das temperaturas na saída da câmara de combustão (T2) na segunda corrida. As seções A e B, representam cada teste para folhas em seu tempo específico.

FIGURA 48 – CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA, COM FOLHAS A 9 kg/h



FONTE: O autor (2016).

A TABELA 49 apresenta os testes A e B, em cada tempo específico, com as temperaturas máximas, mínimas e médias na saída da câmara de combustão (T2) e dos gases da fornalha para o cavaco na terceira corrida.

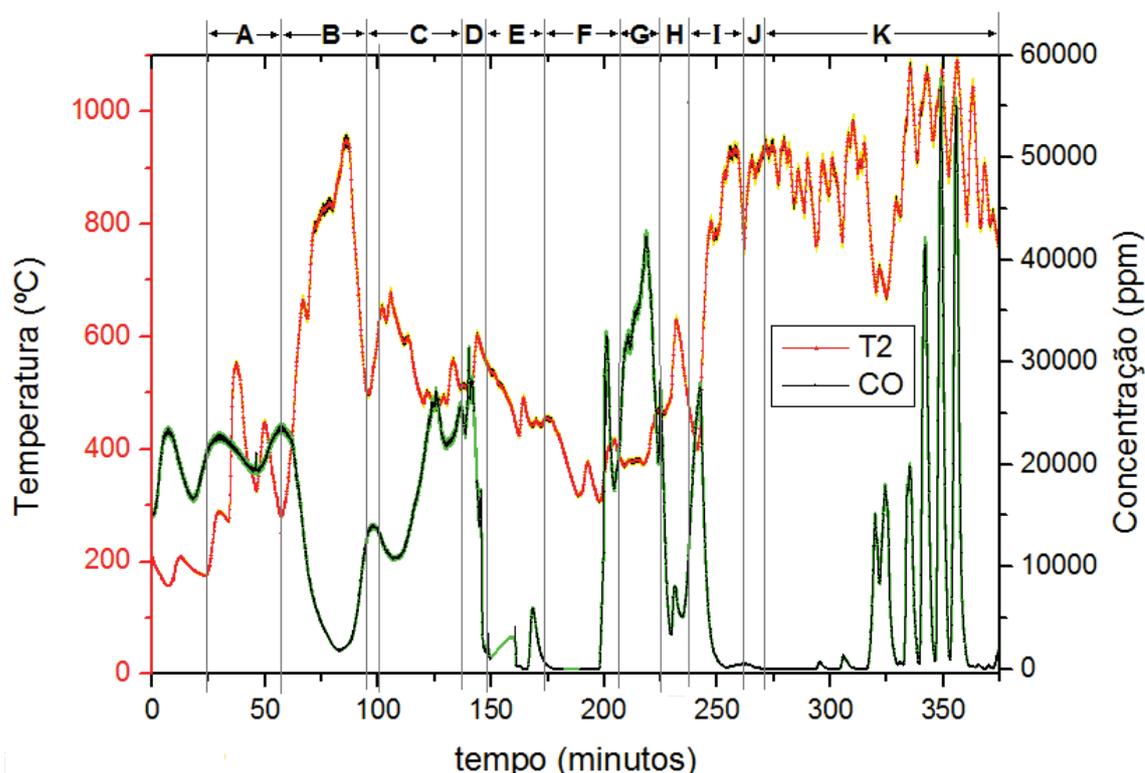
TABELA 49 - VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS E MÉDIOS DE TEMPERATURAS E GASES NA TERCEIRA CORRIDA PARA O CAVACO

Teste	Tempo (minutos)	Parâmetros	Valores	T2 (°C)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	C _x H _x (%)	H ₂ S (ppm)	NO _x (ppm)
A	25 aos 57	Convecção induzida	Máximo	551,1	23.527,2	19,3	2,7	112,8	1,20	116,3	27,2
		Umidade 21,2%	Mínimo	187,3	19.452,8	18,4	1,7	82,1	0,93	95,8	14,7
		Cavaco fino 17 kg/h	Médio	363,9	21.401,6	18,9	2,3	95,0	1,06	111,5	22,1
B	58 aos 90	Convecção induzida	Máximo	949,2	23.557,0	18,8	13,4	123,6	1,17	113,7	50,4
		Umidade 14,2%	Mínimo	252,5	1.852,8	13,1	2,3	21,8	0,05	15,0	24,2
		Cavaco fino 17 kg/h	Médio	709,8	9.247,7	15,9	8,0	59,3	0,42	49,5	43,4
C	101 aos 136	Convecção natural	Máximo	679,0	27.106,2	17,6	6,1	145,3	1,43	123,3	60,7
		Umidade 14,2%	Mínimo	472,1	10.775,0	16,6	3,6	53,7	0,51	56,9	40,0
		Cavaco grosso 17 kg/h	Médio	552,0	18.205,4	17,1	4,5	99,2	0,92	90,2	49,5
D	137 aos 149	Convecção induzida	Máximo	602,6	31.323,6	20,1	5,5	138,7	1,40	122,8	51,1
		Umidade 21,2%	Mínimo	503,9	1.662,1	16,2	0,2	70,9	0,09	9,1	13,9
		Cavaco grosso 17 kg/h	Médio	546,3	17.156,1	18,0	2,9	116,6	0,85	74,7	36,5
E	150 aos 172	Convecção induzida	Máximo	546,0	5.985,2	20,7	1,7	171,6	3,08	62,3	1210,9
		Umidade 14,2%	Mínimo	424,8	0,0	18,4	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
		Cavaco grosso 17 kg/h	Médio	479,8	1.887,2	20,0	0,6	43,7	0,92	15,6	42,3
F	173 aos 206	Convecção natural	Máximo	455,4	32.472,4	21,1	2,6	181,9	2,18	115,5	101,8
		Umidade 14,2%	Mínimo	308,2	0,0	17,8	0,1	0,0	0,00	0,0	0,0
		Cavaco grosso 9 kg/h	Médio	381,4	6.563,6	19,8	0,9	35,0	0,42	31,6	27,2
G	207 aos 224	Convecção induzida	Máximo	468,4	42.202,6	18,6	4,0	233,5	2,30	159,2	102,9
		Umidade 21,2%	Mínimo	370,5	20.310,1	16,7	2,2	113,4	0,90	88,5	54,5
		Cavaco grosso 9 kg/h	Médio	398,9	32.727,6	17,8	2,7	185,8	1,71	131,6	69,7
H	225 aos 235	Convecção natural	Máximo	629,1	26.609,9	20,3	8,3	138,6	1,05	91,2	129,9
		Umidade 14,2%	Mínimo	463,4	3.389,3	13,5	0,7	24,0	0,10	16,2	18,4
		Cavaco grosso 9 kg/h	Médio	534,6	8.560,7	16,9	4,3	64,5	0,29	40,2	85,4
I	236 aos 259	Convecção induzida	Máximo	934,3	27.481,9	17,7	30,0	90,5	1,33	101,6	126,0
		Umidade 21,2%	Mínimo	401,5	167,9	4,2	2,9	0,0	0,00	3,3	64,6
		Cavaco grosso 9 kg/h	Médio	708,1	8.141,8	11,6	14,5	26,2	0,36	35,8	98,7
J	260 aos 268	Convecção induzida	Máximo	913,5	502,6	11,2	26,0	0,0	0,06	3,1	93,0
		Umidade 21,2%	Mínimo	756,8	122,7	6,6	12,9	0,0	0,02	1,7	75,8
		Cavaco grosso 17 kg/h	Médio	863,5	352,9	9,3	19,2	0,0	0,05	2,5	87,3
K	269 aos 382	Convecção natural	Máximo	1091,5	56.930,4	16,2	30,0	153,6	2,25	117,0	257,3
		Umidade 14,2%	Mínimo	671,4	0,0	0,0	4,5	0,0	0,04	0,0	13,9
		Cavaco grosso 17 kg/h	Médio	891,7	5.434,1	9,1	18,9	19,0	2,77	0,4	16,2

FONTE: O autor (2016).

A FIGURA 49 apresenta o comportamento das emissões do monóxido de carbono (CO) perante a variação das temperaturas na saída da câmara de combustão (T2) na terceira corrida, onde entre as seções A a K, representam cada teste para o cavaco em seu tempo específico.

FIGURA 49 – CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA, COM CAVACO A 17 kg/h



FONTE: O autor (2016).

A seção A representa a configuração de teste 10 onde se utilizou cavaco com 21,2% de umidade, granulometria fina, alimentação de 17 kg/h com tiragem induzida.

A seção B representa a configuração de teste 11 onde se utilizou cavaco com 14,2% de umidade, granulometria fina, alimentação de 17 kg/h e tiragem induzida. As seções C e K representam a configuração de teste 5 onde se utilizou cavaco com 14,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 17 kg/h e tiragem natural.

A seção D representa a configuração de teste 3 onde se utilizou cavaco com 21,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 17 kg/h e tiragem induzida.

A seção E representa a configuração de teste 4 onde se utilizou cavaco com 14,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 17 kg/h e tiragem induzida.

A seção F representa a configuração de teste 12 onde se utilizou cavaco com 14,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 9 kg/h e tiragem natural.

A seção G representa a configuração de teste 13 onde se utilizou cavaco com 14,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 9 kg/h e tiragem induzida.

A seção H representa a configuração de teste 14 onde se utilizou cavaco com 21,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 9 kg/h e tiragem natural.

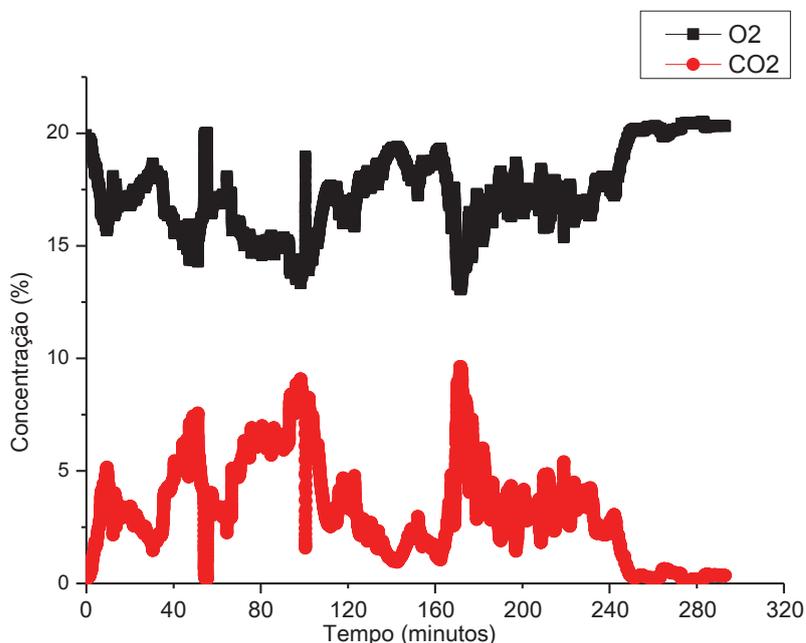
A seção I representa a configuração de teste 15 onde se utilizou cavaco com 21,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 9 kg/h e tiragem induzida.

A seção J representa a configuração de teste 6 onde se utilizou cavaco com 21,2% de umidade, granulometria grosseira, alimentação de 17 kg/h e tiragem natural.

b) concentrações de O₂ em comparação com os de CO₂

Na comparação dos níveis de concentração de O₂ com os de CO₂, FIGURA 50, observa-se que quando um decresce, outro aumenta proporcionalmente e vice-versa.

FIGURA 50 – CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA, COM CAVACO A 17 kg/h



FONTE: O autor (2015).

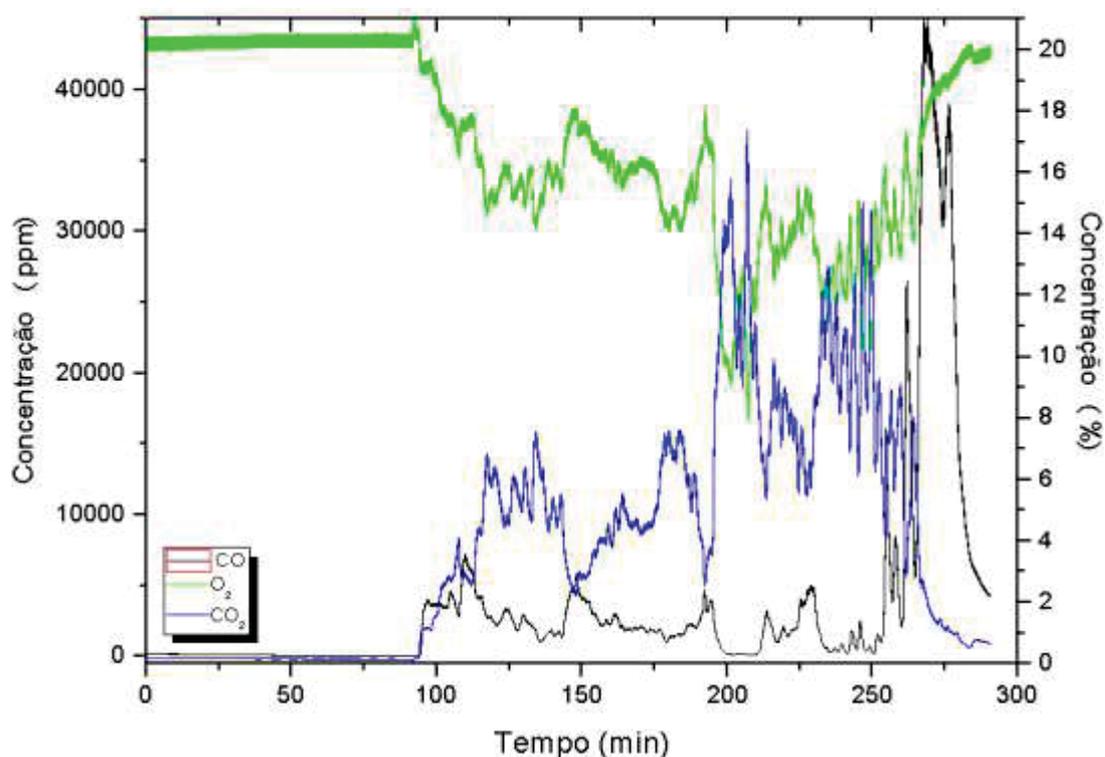
Os valores máximos, mínimos e médios de concentrações de gases atingidas na primeira corrida foram, conforme a TABELA 50 e FIGURAS 51 a 55:

TABELA 50 – CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS DE CO, O₂, CO₂, SO₂, NO₂, NO, C_xH_x, H₂S, NO_x, ATINGIDAS NA PRIMEIRA CORRIDA

	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO (ppm)	C _x H _x (%)	H ₂ S (ppm)	NO _x (ppm)
Valores máx.	44.227,4	21,1	17,1	192,9	9,7	565,6	2,5	186,7	575,0
Valores mín.	0,0	8,0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
Valores méd.	3.580,0	17,1	3,8	29,3	1,7	184,8	0,4	38,7	186,5

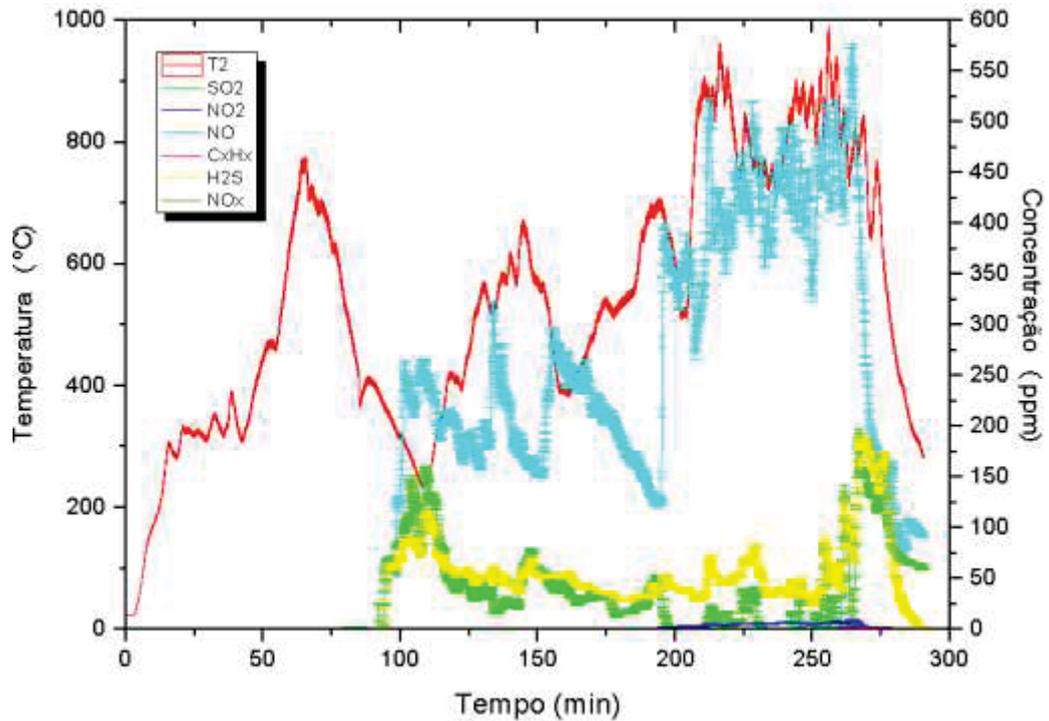
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 51 – CONCENTRAÇÃO DE O₂, CO₂ E NA SAÍDA DA CÂMARA DE COMBUSTÃO LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA



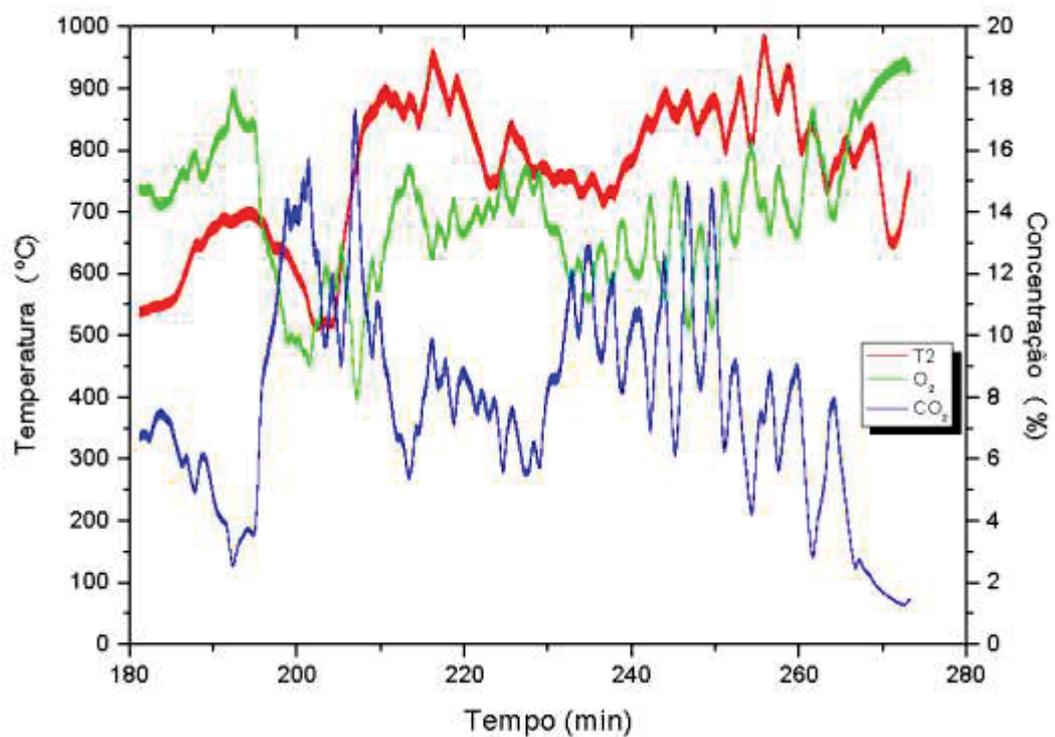
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 52 – CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO₂, NO₂, NO, C_xH_x, H₂S, NO_x, EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA



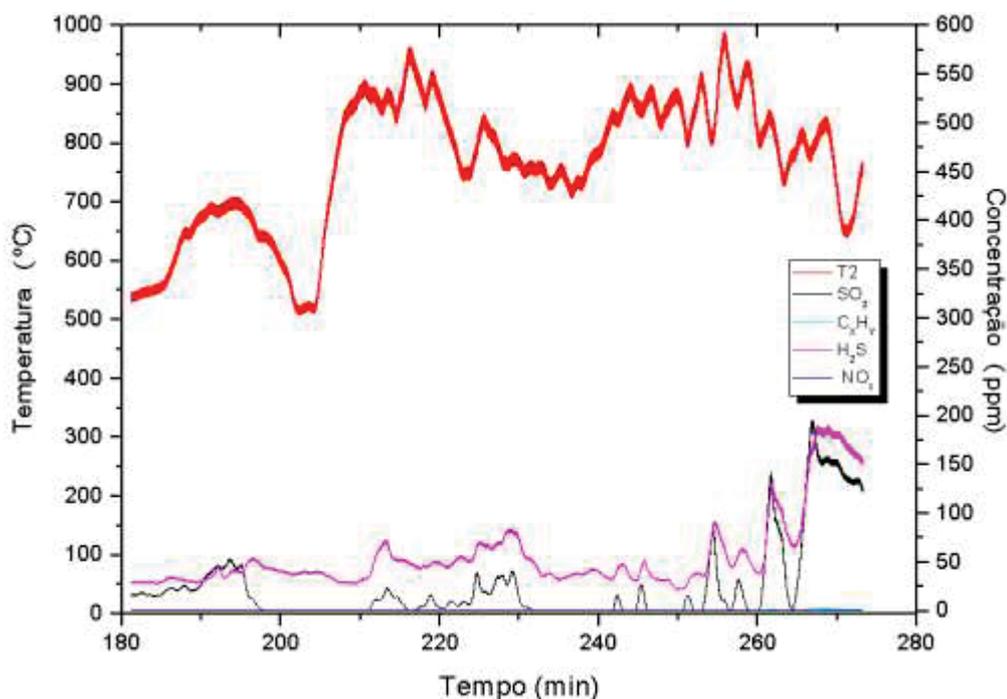
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 53– CONCENTRAÇÃO DE O₂ E CO₂ EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS T2 DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA PARA O CAVACO



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 54 – CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO₂, NO₂, NO, C_xH_x, H₂S, NO_x, EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS T2 DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA COM O CAVACO



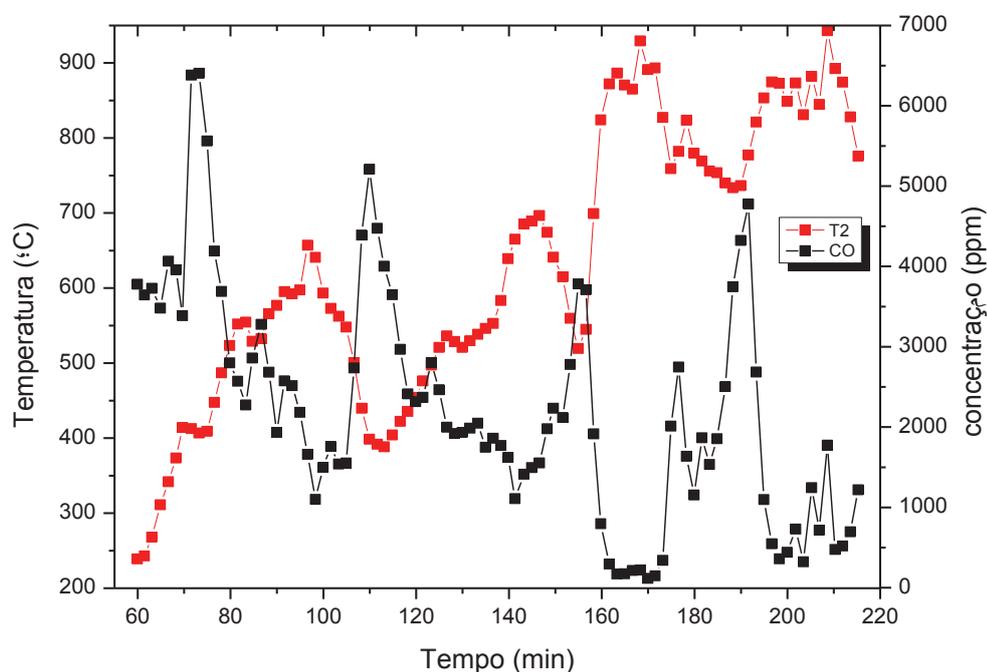
FONTE: O autor (2016).

Quanto à emissão de CO, observa-se conforme as FIGURAS 55 e 56 que os níveis foram elevados quando:

- se iniciou as corridas;
- as temperaturas foram inferiores a 500 °C;
- se utilizou cavaco com umidade de 21,2% em convecção induzida.

Em outros ensaios, mesmo com a utilização de cavaco úmido, mas com convecção natural, as taxas de CO foram reduzidas, apesar de que a temperatura em nove minutos diminuiu drasticamente, de 859,2 para 715,9 °C com o cavaco mais úmido. Com o cavaco a 14,2% de umidade, as taxas de CO foram próximas à zero, com exceção dos 68 aos 85 minutos, onde, devido a problemas na alimentação da fornalha, houve variações acentuadas nas taxas de CO, com picos que atingiram 9.000 ppm. Mesmo assim, a média atingiu taxas de 1.554 ppm, que foi abaixo dos padrões referenciais da Resolução SEMA 16/2014, conforme a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (2014). Nesta Resolução, para a capacidade da fornalha em produzir até 150 kW de energia as emissões de CO permitidas são de 2.183 ppm. A entrada falsa de ar pelas laterais da grelha, provocou redução na temperatura e aumento nos níveis de CO.

FIGURA 55 – CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA PRIMEIRA CORRIDA PARA O CAVACO



FONTE: O autor (2016).

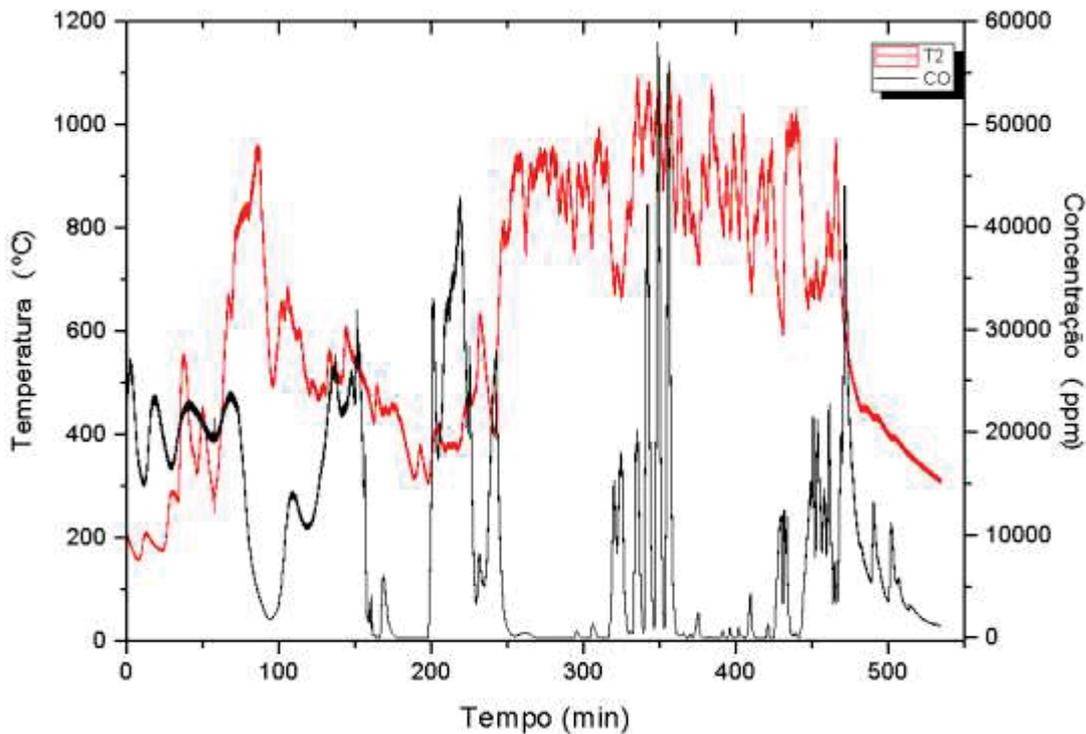
Os valores máximos, mínimos e médios de concentrações de gases atingidas na segunda corrida foram, conforme a TABELA 51 e FIGURAS 56 a 59:

TABELA 51 – CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS DE CO, O₂, CO₂, SO₂, NO₂, NO, C_xH_x, H₂S, NO_x, ATINGIDAS NA SEGUNDA CORRIDA

	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO (ppm)	C _x H _x (%)	H ₂ S (ppm)	NO _x (ppm)
Valores máx.	38.822,0	20,1	21,1	251,6	4,2	502,3	1,8	132,7	504,2
Valores mín.	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,1
Valores méd.	3.534,0	10,1	16,8	29,3	1,6	225,4	0,3	23,9	227,1

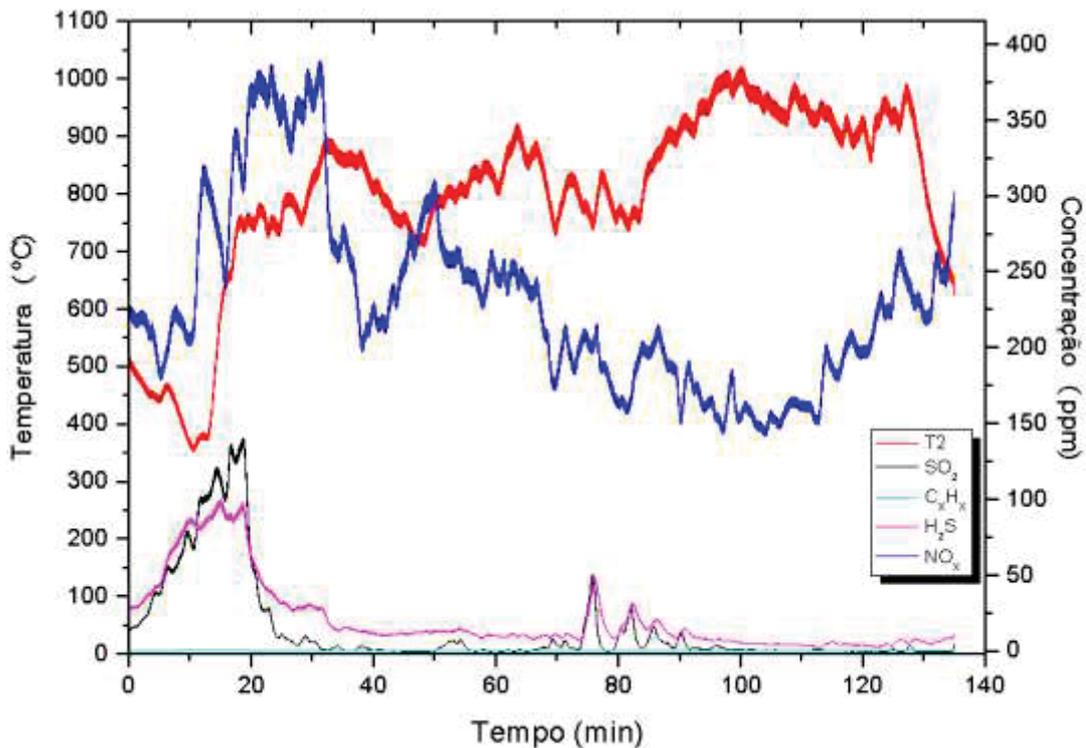
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 56 – CONCENTRAÇÃO DE CO EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA



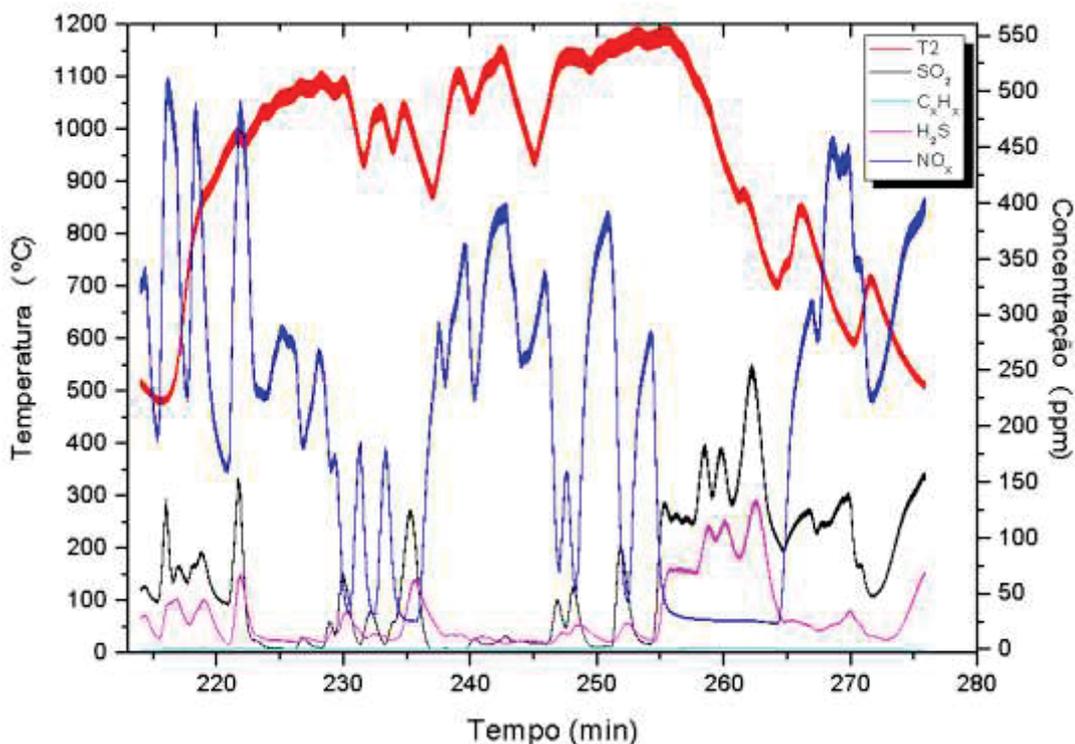
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 57– CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO_2 , NO_2 , NO , C_xH_x , H_2S , NO_x , EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA COM O CAVACO



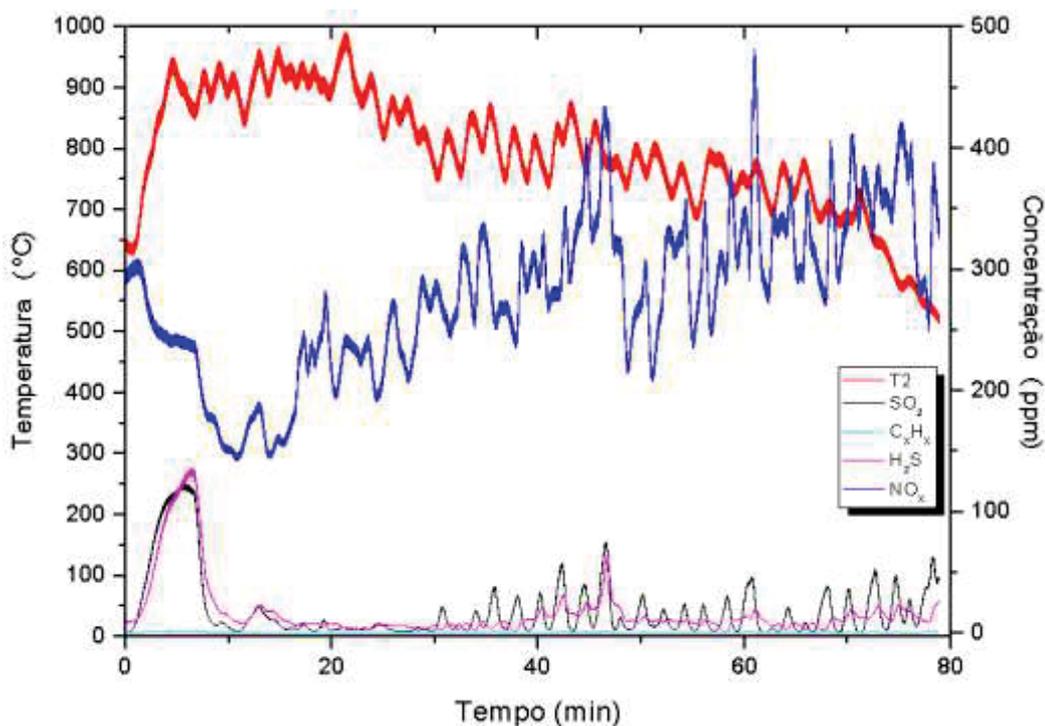
FONTE: O autor (2016).

FIGURA 58 – CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO₂, NO₂, NO, C_xH_x, H₂S, NO_x EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA COM O CAVACO



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 59 – CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO₂, NO₂, NO, C_xH_x, H₂S, NO_x EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA SEGUNDA CORRIDA COM FOLHAS



FONTE: O autor (2016).

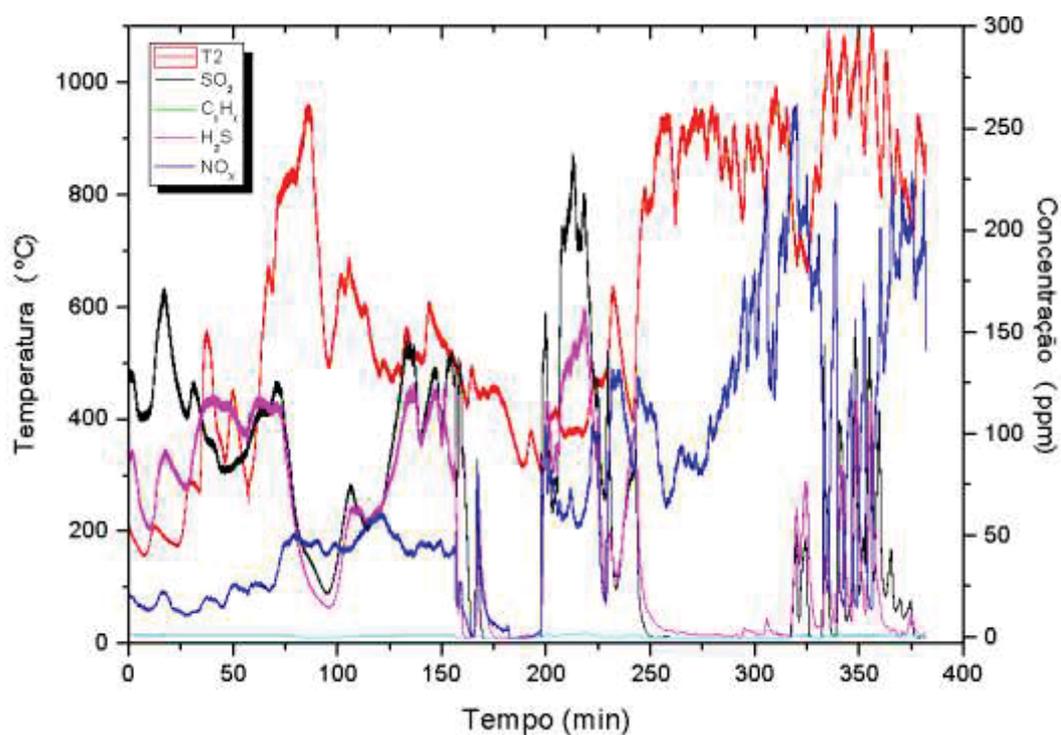
Os valores máximos, mínimos e médios de concentrações de gases atingidas na terceira foram, conforme as TABELA 52 e FIGURA 60:

TABELA 52 – CONCENTRAÇÕES MÁXIMAS, MÍNIMAS E MÉDIAS DE CO, O₂, CO₂, SO₂, NO₂, NO, C_xH_x, H₂S, NO_x, ATINGIDAS NA TERCEIRA CORRIDA

Para a lenha	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	SO ₂ (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO (ppm)	C _x H _x (%)	H ₂ S (ppm)	NO _x (ppm)
Valores máx.	57.178,9	21,1	21,1	233,7	169,3	579,0	4,3	180,2	1210,9
Valores mín.	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Valores méd.	11.045,1	15,6	8,3	57,9	2,1	95,2	0,9	49,7	97,3

FONTE: O autor (2016).

FIGURA 60 – CONCENTRAÇÃO DOS GASES SO₂, NO₂, NO, C_xH_x, H₂S, NO_x EM RELAÇÃO ÀS TEMPERATURAS DA BASE DA CHAMINÉ LEVANTADAS NA TERCEIRA CORRIDA COM O CAVACO



FONTE: O autor (2016).

4.4.3 Balanço de massa

O balanço de massa e o rendimento final da fornalha de fluxo cocorrente está resumido na TABELA 53.

TABELA 53 – BALANÇO DE MASSA E RENDIMENTO DA FORNALHA

Elementos químicos	$\dot{m}_e(kg/h)$	$\dot{m}_s(kg/h)$	Rendimento (%)	Potencial térmico (kW)
C	11,46	7,73		
O	17,07	9,97		
H	1,40	1,40		
N	22,71	22,7		
S	0,02	0,00007		
Σ	52,66	41,8	86,99	154

FONTE: O autor (2016).

4.5 RESULTADOS DO ESTUDO DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE INDÚSTRIA COM TRITURAÇÃO DE RESÍDUOS E GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ENERGIA TERMELÉTRICA

Nesta seção serão detalhados os resultados de cada análise de viabilidade para os três orçamentos propostos, na seguinte ordem:

- dados quantitativos e de custos para a instalação dos trituradores de cada orçamento, TABELA 54;
- dados quantitativos para a instalação da fornalha cocorrente e gerador de vapor de cada orçamento, QUADRO 14;
- dados quantitativos para a instalação da turbina, de cada orçamento, TABELA 22.

Em seguida, será dada ênfase ao orçamento que mais se tornou atrativo, que neste caso foi o “orçamento 2”.

- a) para a instalação do triturador da biomassa

A seguir, na TABELA 54, os dados quantitativos e de custos para a instalação do triturador da biomassa residual. Estes dados foram obtidos a partir de levantamentos com os fabricantes e buscas de preços de alguns itens com fornecedores específicos.

TABELA 54 – DADOS QUANTITATIVOS E DE CUSTOS PARA A INSTALAÇÃO DO TRITURADOR

Triturador			
Juros+correção monetária anual 14,5%	Orçamento 1	Orçamento 2	Orçamento 3
Capacidade em m ³ /h	6	8	60
Densidade média dos resíduos de poda em kg/m ³	400	400	400
Capacidade em m ³ /dia (consid. 50% da capacidade)	3	4	30
Valor do diesel em R\$/litro	R\$ 2,80	R\$ 2,80	R\$ 2,80
Consumo de combustível em L/t	1,0	1,0	1,0
Custo do combustível em R\$/t	R\$ 2,80	R\$ 2,80	R\$ 2,80
Valor de comercialização do cavaco em R\$/t	R\$ 74,00	R\$ 74,00	R\$ 74,00
Custo do aterro para depositar resíduos em R\$/t	R\$ 67,00	R\$ 67,00	R\$ 67,00

FONTE: O autor (2016).

A seguir, no QUADRO 14, o levantamento de dados para a instalação do triturador. Estes dados foram obtidos a partir de levantamentos com fornecedores específicos ou ligações telefônicas aos órgãos que mantêm serviços direcionados às áreas específicas.

QUADRO 14 - DADOS DE CUSTOS PARA A INSTALAÇÃO DO TRITURADOR

TRITURADOR			CUSTOS (R\$)		
			Orçamento		
			1	2	3
PRÉ IMPLANTAÇÃO			168.300,65	168.339,65	168.551,50
	Estudo de viabilidade		30.000,00		
Impostos, licenças e taxas anuais	Projeto básico, EIA/RIMA		138.339,36	138.393,36	138.686,69
	Taxas anuais (alvará, etc.)				
	Licença prévia (0,15%) do investimento				
	Licença de instalação (0,5%)				
	IBAMA				
	Bombeiros				
CUSTO TOTAL DE IMPLANTAÇÃO			154.400,00	279.400,00	958.400,00
Infra estrutura geral	Terraplanagem, drenagem, portaria, portão, cancela, cercamento da área externa a 47,6/m		30.000,00		
	Custo de materiais de escritório, computador, telefone, entre outros		6.400,00		
Máquinas, transportadores e equipamentos	Triturador de resíduos		55.000,00	180.000,00	319.000,00
	Silo para armazenar cavacos e cobertura de lona com estrutura metálica		13.000,00	13.000,00	23.000,00
	Caminhão caçamba para transporte de biomassa e caminhão com grua para alimentação do triturador		-	-	480.000,00
	Trator com pá carregadeira		50.000,00	50.000,00	100.000,00
CUSTO TOTAL DE OPERAÇÃO			31.472,00	36.026,40	89.108,80
	Licença de operação 0,25% 5 anos		38,71	53,71	135,19
	Aluguel da área para depósito e trituração		12.000,00	16.000,00	46.000,00
	Expediente diário	9 horas			
	Dias trabalhados por mês	22 dias			
	Energia elétrica ou diesel para triturador (R\$/mês)		1.663,20	2.217,60	16.632,00
	Diesel para transporte (R\$/mês)		2.993,76	3.991,68	29.937,60
Salários com encargos da equipe para fabricar o cavaco	Operários para alimentar galhos na máquina	3 a 8	17.808,80	17.808,80	26.476,80
	Operador da máquina	1			
	Administrador	1			
Aluguel caminhões para transportar a biomassa	Número de viagens/mês		39	52	391
	Translado do caminhão ida e volta (km/viagem)	124	12.153,24	16.204,32	121.532,40
	Custo de transporte por km	R\$ 2,51			
	Capacidade volumétrica de cada caminhão (m³)	38			
	Capacidade de carga de cada caminhão (toneladas)	15,20			
Custo total					

FONTE: O autor (2016).

b) Para a instalação da fornalha cocorrente e gerador de vapor.

A seguir, no TABELA 55, o levantamento de dados para a instalação do triturador. Estes dados foram obtidos a partir de levantamentos com fornecedores específicos.

TABELA 55 – DADOS DE QUANTITATIVOS PARA A INSTALAÇÃO DA FORNALHA COCORRENTE E GERADOR DE VAPOR

FORNALHA COCORRENTE E GERADOR DE VAPOR			
Juros + correção monetária anual 14,5%	Orçamento 1	Orçamento 2	Orçamento 3
Produção de cavaco (t/h)	3	4	30
Capacidade total em gerar vapor (t/h)	7,8	10,5	78,5
Capacidade do equipamento (t/h de vapor)	1		30
Pressão Mpa	2	2	2
Quantidade de geradores de vapor	8	11	3

FONTE: O autor (2016).

c) para a instalação da turbina a vapor

A seguir, na TABELA 56, o levantamento de dados para a instalação do triturador. Estes dados foram obtidos a partir de levantamentos com fornecedores específicos.

TABELA 56 – DADOS QUANTITATIVOS PARA A INSTALAÇÃO DA TURBINA A VAPOR

TURBINA			
Juros + correção monetária anual 14,5%	Orçamento 1	Orçamento 2	Orçamento 3
Capacidade MW	0,5	1	1,5
Valor de comercialização da energia R\$/MW	Venda	R\$ 326,37	
	Compra	R\$ 412,27	

FONTE: O autor (2016).

As análises dos resultados do estudo de viabilidade para a instalação de indústria com trituração de resíduos e geração de energia térmica e energia termelétrica foram baseadas em considerações realizadas nos estudo de Lima et al. (2015) descritas a seguir, onde a TABELA 57 apresenta os resultados detalhados desse estudo de viabilidade, considerando os três orçamentos:

TABELA 57 - RESULTADOS DO ESTUDO DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE INDÚSTRIA COM TRITURAÇÃO DE RESÍDUOS E GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E ELÉTRICA

TRITURADOR COM GERADOR DE VAPOR E TURBINA	Orçamento 1 (R\$)	Orçamento 2 (R\$)	Orçamento 3 (R\$)
Pré-implantação	495.899,25	496.156,70	738.509,30
Implantação	2.290.200,00	3.115.200,00	9.844.200,00
Operação	71.663,13	76.301,53	159.061,95
Total	2.857.762,38	3.687.658,22	10.741.771,26
Receita bruta de vendas (MENSAL)	148.417,20	267.150,96	400.726,44
ISS + PIS + COFINS (5%+1,65%+7,6%) Mensal	21.149,45	38.069,01	57.103,52
Receita líquida de vendas mensal	127.267,75	229.081,95	343.622,92
Custo de operação mensal	71.663,13	76.301,53	159.061,95
Despesas de depreciação mensal	9.407,50	12.845,00	40.882,50
LUCRO ANTES DO IR+CSLL mensal	46.197,12	139.935,42	143.678,47
IR+CSLL (34%) mensal	15.707,02	47.578,04	48.850,68
Despesas de depreciação mensal	9.407,50	12.845,00	40.882,50
Fluxo de caixa operacional mensal	39.897,60	105.202,38	135.710,29
Receita bruta de vendas (ANUAL)	1.781.006,40	3.205.811,52	4.808.717,28
ISS + PIS + COFINS (5%+1,65%+7,6%) anual	253.793,41	456.828,14	685.242,21
Receita líquida de vendas anual	1.527.212,99	2.748.983,38	4.123.475,07
Custo de operação anual	859.957,54	915.618,34	1.908.743,42
Despesas de depreciação anual	112.890,00	154.140,00	490.590,00
LUCRO ANTES DO IR+CSLL	554.365,45	1.679.225,04	1.724.141,64
IR+CSLL (34%) anual	188.484,25	570.936,51	586.208,16
Despesas de depreciação	112.890,00	154.140,00	490.590,00
Fluxo de caixa operacional (anual)	478.771,20	1.262.428,53	1.628.523,48

FONTE: O autor (2016).

- Análise da dimensão retorno: conforme a TABELA 57 os projetos de investimentos (PI) em estudo necessitam de investimentos iniciais de R\$ 2.698.605,00, R\$ 3.544.126,453 e R\$ 10.813.975,29, respectivamente para o “orçamento 1”, “orçamento 2” e “orçamento 3”. Espera-se que esses investimentos retornem respectivamente R\$ 3.331.912,81, R\$ 8.785.619,92 e R\$ 11.333.384,86. Isso implica em um retorno líquido (VPL) de R\$ 633.308,17, R\$ 5.241.493,47 e R\$ 519.409,57 em 20 anos, equivalentes a R\$ 7.583,47, R\$ 62.763,65 e R\$ 6.219,61 por mês. Vale ressaltar que esses ganhos sempre são os adicionais ao oportunizado pelo mercado (TMA). Para esses projetos de investimentos, a cada unidade monetária investida, há a expectativa de retorno de 1,2347, 2,4789 e 1,0480. Isso foi equivalente aos ganhos de 0,09%, 0,38% e 0,02% ao mês além da TMA. O retorno fica melhor expresso pelo índice ROIA/TMA recomendados por Souza e Clemente (2008), cujo valor obtido foi de 7,89%, 34,04% e 1,76%. Isso permite avaliar o investimento como retorno de nível baixo (0 a 20%), para o “orçamento 1”, baixo-médio (20% a 40%) para o “orçamento 2” e baixo (0 a 20%) para o “orçamento 3” segundo a escala proposta por Lima et al. (2015).

- Análise da dimensão de riscos: quanto aos riscos, os projetos de investimentos em estudo apresentam retorno do investimento em aproximadamente 127, 43 e 198 meses, conforme TABELA 58. O índice *Payback/N* para o “orçamento 1”, “orçamento 2” e “orçamento 3”, têm que ser promissor respectivamente em pelo menos 52,92%, 17,92% e 82,50% da vida estimada para se pagar. Por outro lado, os índices TMA/TIR resultaram em 77,90%, 37,55% e 94,38%, representando a razão entre os percentuais oferecidos pelo mercado e o rendimento esperados nos projetos de investimentos. Isso permite categorizar os investimentos como risco de nível médio-alto baixo (60% a 80%) para o “orçamento 1”, baixo-médio (20% a 40%) para o “orçamento 2” e (80% a 100%) para o “orçamento 3” segundo a escala proposta por Lima et al. (2015).

A TABELA 58 indica os resultados do valor presente líquido (VPL), valor presente líquido anualizado (VPLA) taxa interna de retorno (TIR), índice benefício-custo (IBC), fluxo de caixa (FC), retorno sobre o investimento adicionado (ROIA), taxa mínima de atratividade (TMA) e retorno de investimento (*payback*).

TABELA 58 - AVALIAÇÃO DE RETORNO, RISCOS E LIMITES DE ELASTICIDADE PARA OS ORÇAMENTOS 1, 2 E 3

DIMENSÃO	INDICADOR	RESULTADO ESPERADO (SE VIÁVEL)	VALOR ESPERADO			
			Orçamento 1	Orçamento 2	Orçamento 3	
Retorno	VP (R\$)	$VP \geq FC_0 $	3.331.912,81	8.785.619,92	11.333.384,86	
	VPL (R\$)	$VPL \geq 0$	633.308,17	5.241.493,47	519.409,57	
	VPLM (R\$)	$VPLM \geq 0$	7.583,47	62.763,65	6.219,61	
	IBC ₁ ou IL	$IBC_1 \geq 1$	1,2347	2,4789	1,0480	
	ROIA (%)	$ROIA \geq 0$	0,09	0,38	0,02	
	Índice ROIA/TMA (%)	$\text{Índice ROIA/TMA} \geq 0$	7,89	34,04	1,76	
	ROI ou TIRM (%)	$ROI \geq TMA$	1,20	1,50	1,13	
Riscos	<i>Payback</i>	$\text{Payback} \leq N$	127	43	198	
	TIR (%)	$TIR \geq TMA$	1,43	2,97	1,18	
	Índice <i>payback/N</i> (%)	$\text{Índice } \textit{payback/N} \leq 100\%$	52,92	17,92	82,50	
	Índice TMA/TIR (%)	$\text{Índice TMA/TIR} \leq 100\%$	77,90	37,55	94,38	
Limites de elasticidade	$\Delta\%$ TMA		28,37	166,35	5,95	
	$\Delta\%$ FC ₀		23,47	147,89	4,80	
	$\Delta\%$ FC _j		19,01	59,66	4,58	
	$\Delta\%$ FC ₀ e FC _j	Quanto maior a tolerância, melhor		10,50	42,51	2,35
	$\Delta\%$ TMA e FC ₀			12,84	78,29	2,66
	$\Delta\%$ TMA e FC _j			11,38	43,91	2,59
	$\Delta\%$ FC ₀ e FC _j e TMA			7,66	33,86	1,68

FONTE: O autor (2016).

Análise dos limites de elasticidade (LEs) e dos valores-limite (VLs): para os projetos de investimentos em estudo, a TMA admite uma variação máxima de 28,37, 166,35 e 5,95% antes de torná-los economicamente viáveis, sendo, conforme TABELA 59, o valor-limite igual a 1,43, 2,97 e 1,18% (TIR). Por outro lado, os investimentos iniciais poderão sofrer acréscimos de até 23,47%, 147,89% e 4,80%, sendo o valor-limite igual a R\$ 3.331.912,81 para o “orçamento 1”, 8.785.619,92 para o “orçamento 2” e 11.333.384,86 para o “orçamento 3” (VP). Já os fluxos de caixa permitem redução máxima de 19,01%, 59,66% e 4,58%, sendo o valor-limite igual a R\$ 32.314,13 para o “orçamento 1”, 42.438,73 para o “orçamento 2” e 129.490,68 para o “orçamento 3”. Esses valores melhoram a percepção dos riscos associados à implementação dos projetos de investimentos em estudo. Além disso, esses valores podem ser utilizados nas etapas/fases de monitoramento e controle do projeto, se os projetos de investimentos forem aprovados e implementados, conforme Lima et al. (2015).

TABELA 59 - VALORES LIMITE ENTRE OS ORÇAMENTOS 1, 2 E 3 PARA DIVERSOS INDICADORES

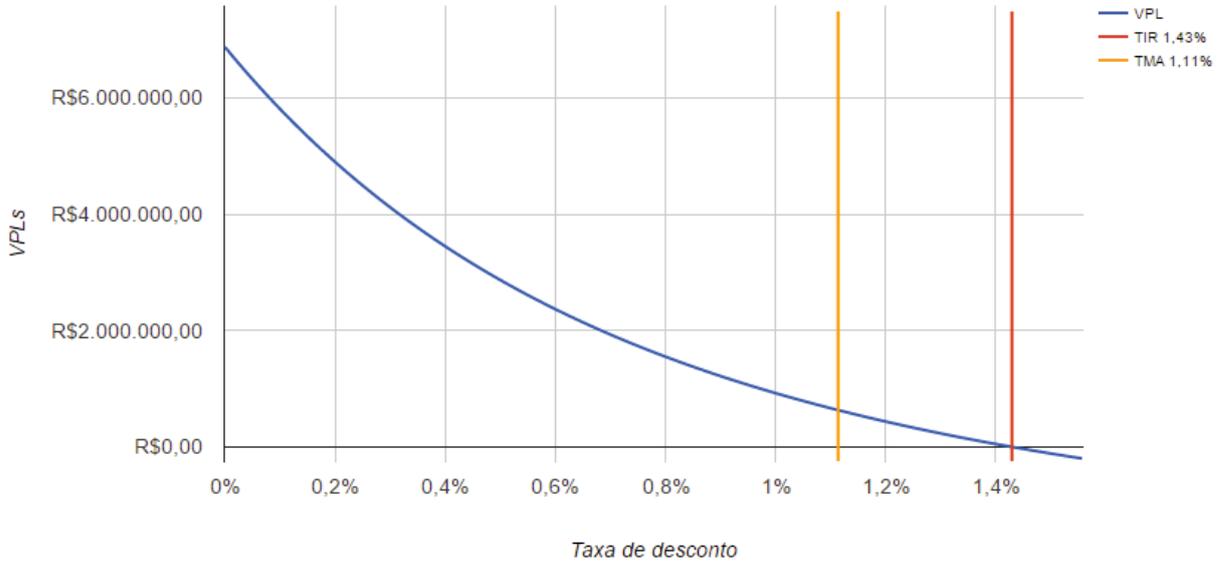
INDICADOR	VALOR-LIMITE		
	Orçamento 1	Orçamento 2	Orçamento 3
TMA (%)	1,43	2,97	1,18
FC ₀ (R\$)	3.331.912,81	8.785.619,92	11.333.384,86
FC _j (1 a N-1) (R\$)	32.314,13	42.438,73	129.490,68

FONTE: O autor (2016).

Com base nos dados fornecidos nos resultados apresentados e na análise da expectativa do retorno, das estimativas de riscos envolvidos, dos limites de elasticidade e valores-limite das principais variáveis intervenientes no desempenho econômico dos três projetos de investimentos, do confronto entre retorno e riscos e do espectro de validade da decisão, recomenda-se a implementação dos projetos de investimentos em estudo mas em constante análise do projeto. Além disso, sinaliza-se, conforme FIGURA 61 uma especial atenção no processo de monitoramento e controle do projeto para a variável “fluxo de caixa” que se apresenta como a mais sensível para a manutenção da viabilidade econômica dos projetos de investimentos em estudo.

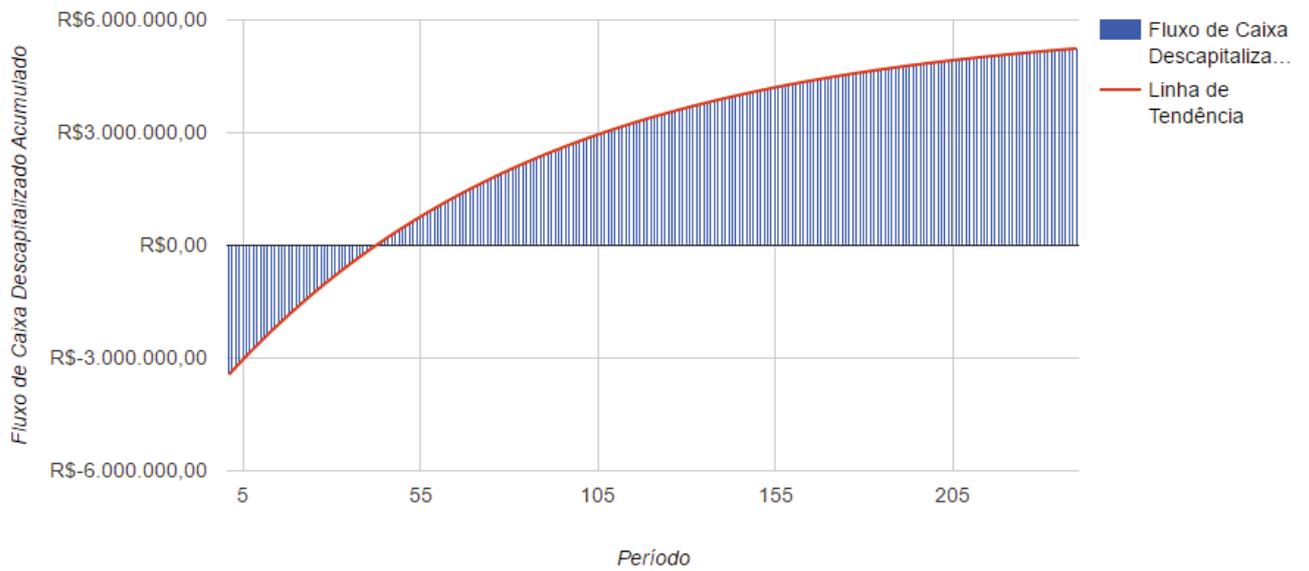
A ilustração das curvas obtidas nos resultados de VPL e fluxos de caixa foram realizadas apenas para o orçamento 2, devido a apresentar resultados mais atraentes que os outros orçamentos. Enquanto a FIGURA 61 representa os VPLs, a FIGURA 62 representa o fluxo de caixa descapitalizado acumulado.

FIGURA 61 - VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL) DO ORÇAMENTO 2 COM RELAÇÃO À TAXA DE DESCONTO



FONTE: O autor (2016).

FIGURA 62 - FLUXO DE CAIXA DESCAPITALIZADO ACUMULADO PARA O ORÇAMENTO 2 EM RELAÇÃO AOS 240 MESES



FONTE: O autor (2016).

Foram realizados cálculos envolvendo os custos em cada investimento para o triturador, gerador de vapor e turbina, conforme os QUADROS 15 a 19:

QUADRO 15 - CUSTOS DE CADA ORÇAMENTO PARA O TRITURADOR

	TRITURADOR		
	ORÇAMENTO 1	ORÇAMENTO 2	ORÇAMENTO 3
Pré-implantação	R\$ 168.300,65	R\$ 168.339,65	R\$ 168.551,50
Implantação	R\$ 154.400,00	R\$ 279.400,00	R\$ 958.400,00
Operação	R\$ 31.472,00	R\$ 36.026,40	R\$ 89.108,80
Total	R\$ 354.172,65	R\$ 483.766,05	R\$ 1.216.060,30
Receita bruta de vendas (MENSAL)	R\$ 43.956,00	R\$ 58.608,00	R\$ 439.560,00
ISS + PIS + COFINS (5%+1,65%+7,6%) Mensal	R\$ 6.263,73	R\$ 8.351,64	R\$ 62.637,30
Receita líquida de vendas mensal	37.692,27	50.256,36	376.922,70
Custo de operação mensal	31.472,00	36.026,40	89.108,80
Despesas de depreciação mensal	598,33	1.119,17	3.948,33
LUCRO ANTES DO IR+CSLL mensal	5.621,94	13.110,79	283.865,57
IR+CSLL (34%) mensal	R\$ 1.911,46	R\$ 4.457,67	R\$ 96.514,29
Despesas de depreciação mensal	R\$ 598,33	R\$ 1.119,17	R\$ 3.948,33
	Fluxo de caixa operacional mensal para o TRITURADOR		
Fluxo de caixa operacional mensal	R\$ 4.308,81	R\$ 9.772,29	R\$ 191.299,61
Receita bruta de vendas (ANUAL)	R\$ 527.472,00	R\$ 703.296,00	R\$ 5.274.720,00
ISS + PIS + COFINS (5%+1,65%+7,6%) anual	R\$ 75.164,76	R\$ 100.219,68	R\$ 751.647,60
Receita líquida de vendas anual	R\$ 452.307,24	R\$ 603.076,32	R\$ 4.523.072,40
Custo de operação anual	R\$ 377.664,00	R\$ 432.316,80	R\$ 1.069.305,60
Despesas de depreciação anual	R\$ 7.180,00	R\$ 13.430,00	R\$ 47.380,00
LUCRO ANTES DO IR+CSLL	R\$ 67.463,24	R\$ 157.329,52	R\$ 3.406.386,80
IR+CSLL (34%) anual	R\$ 22.937,50	R\$ 53.492,04	R\$ 1.158.171,51
Despesas de depreciação	R\$ 7.180,00	R\$ 13.430,00	R\$ 47.380,00
Fluxo de caixa operacional (anual)	R\$ 51.705,74	R\$ 117.267,48	R\$ 2.295.595,29

FONTE: O autor (2016).

QUADRO 16 – CUSTOS PARA OPERAÇÃO DO GERADOR DE VAPOR

Custos e despesas	GERADOR DE VAPOR	
	ORÇAMENTO 1 e 2	ORÇAMENTO 3
Pré-implantação	R\$ 469.133,28	R\$ 470.771,28
Implantação	R\$ 599.400,00	R\$ 5.849.400,00
Operação	R\$ 18.628,18	R\$ 73.474,18
Total	R\$ 1.087.161,46	R\$ 6.393.645,46
Receita bruta de vendas (MENSAL)	Não houve comercialização	
ISS + PIS + COFINS (5%+1,65%+7,6%) Mensal	Não houve comercialização	
Receita líquida de vendas mensal	Não houve comercialização	
Custo de operação mensal	18.628,18	73.474,18
Despesas de depreciação mensal	2.452,50	24.327,50
LUCRO ANTES DO IR+CSLL mensal	Obs.: Depreciação do gerador+turbina	
IR+CSLL (34%) mensal	Não houve comercialização	
Despesas de depreciação mensal	R\$ 2.452,50	R\$ 24.327,50
Custo de operação anual	R\$ 223.538,21	R\$ 881.690,21
Despesas de depreciação anual	R\$ 29.430,00	R\$ 291.930,00
Fluxo de caixa operacional (anual)	R\$ 29.430,00	R\$ 291.930,00

FONTE: O autor (2016).

QUADRO 17 - CUSTOS PARA OPERAÇÃO DA TURBINA SEM CONSIDERAR O GASTO COM CAVACO

	TURBINA (sem considerar o gasto com cavaco)		
	ORÇAMENTO 1	ORÇAMENTO 2	ORÇAMENTO 3
Pré-implantação	R\$ 168.740,27	R\$ 168.958,71	R\$ 169.208,37
Implantação	R\$ 1.536.400,00	R\$ 2.236.400,00	R\$ 3.036.400,00
Operação	R\$ 26.900,37	R\$ 26.984,37	R\$ 27.080,37
Total	R\$ 1.732.040,64	R\$ 2.432.343,08	R\$ 3.232.688,73
Receita bruta de vendas (MENSAL)	R\$ 148.417,20	R\$ 296.834,40	R\$ 445.251,60
ISS + PIS + COFINS (5%+1,65%+7,6%) Mensal	R\$ 21.149,45	R\$ 42.298,90	R\$ 63.448,35
Receita líquida de vendas mensal	127.267,75	254.535,50	381.803,25
Custo de operação mensal	26.900,37	26.984,37	27.080,37
Despesas de depreciação mensal	8.809,17	11.725,83	36.934,17
LUCRO ANTES DO IR+CSLL mensal	91.558,21	215.825,30	317.788,71
IR+CSLL (34%) mensal	R\$ 31.129,79	R\$ 73.380,60	R\$ 108.048,16
Despesas de depreciação mensal	R\$ 8.809,17	R\$ 11.725,83	R\$ 36.934,17
	Fluxo de caixa operacional mensal para a TURBINA		
Fluxo de caixa operacional mensal	R\$ 69.237,59	R\$ 154.170,53	R\$ 246.674,72
Receita bruta de vendas (ANUAL)	R\$ 1.781.006,40	R\$ 3.562.012,80	R\$ 5.343.019,20
ISS + PIS + COFINS (5%+1,65%+7,6%) anual	R\$ 253.793,41	R\$ 507.586,82	R\$ 761.380,24
Receita líquida de vendas anual	R\$ 1.527.212,99	R\$ 3.054.425,98	R\$ 4.581.638,96
Custo de operação anual	R\$ 322.804,42	R\$ 323.812,42	R\$ 324.964,42
Despesas de depreciação anual	R\$ 76.280,00	R\$ 111.280,00	R\$ 151.280,00
LUCRO ANTES DO IR+CSLL	R\$ 1.098.698,57	R\$ 2.589.903,56	R\$ 3.813.464,55
IR+CSLL (34%) anual	R\$ 373.557,51	R\$ 880.567,21	R\$ 1.296.577,95
Despesas de depreciação	R\$ 105.710,00	R\$ 140.710,00	R\$ 443.210,00
Fluxo de caixa operacional (anual)	R\$ 830.851,06	R\$ 1.850.046,35	R\$ 2.960.096,60

FONTE: O autor (2016).

QUADRO 18 – CUSTOS PARA OPERAÇÃO DA TURBINA CONSIDERANDO A COMPRA DE CAVACO

	TURBINA (com compra de cavaco)		
	ORÇAMENTO 1	ORÇAMENTO 2	ORÇAMENTO 3
Pré-implantação	R\$ 168.740,27	R\$ 168.958,71	R\$ 169.208,37
Implantação	R\$ 1.536.400,00	R\$ 2.236.400,00	R\$ 3.036.400,00
Operação	R\$ 218.096,54	R\$ 409.376,71	R\$ 600.668,88
Total	R\$ 1.923.236,81	R\$ 2.814.735,42	R\$ 3.806.277,25
Receita bruta de vendas (MENSAL)	R\$ 126.154,62	R\$ 237.467,52	R\$ 356.201,28
ISS + PIS + COFINS (5%+1,65%+7,6%) Mensal	R\$ 17.977,03	R\$ 33.839,12	R\$ 50.758,68
Receita líquida de vendas mensal	108.177,59	203.628,40	305.442,60
Custo de operação mensal	218.096,54	409.376,71	600.668,88
Despesas de depreciação mensal	8.809,17	11.725,83	36.934,17
LUCRO ANTES DO IR+CSLL mensal	-109.918,95	-205.748,31	-295.226,29
IR+CSLL (34%) mensal	-R\$ 23.019,39	-R\$ 10.347,67	-R\$ 8.196,80
Despesas de depreciação mensal	-R\$ 33.876,91	-R\$ 56.632,80	-R\$ 86.971,93
	Fluxo de caixa operacional mensal da TURBINA com compra de cavaco		
Fluxo de caixa operacional mensal	-R\$ 90.828,79	-R\$ 154.841,21	-R\$ 218.865,64
Receita bruta de vendas (ANUAL)	R\$ 1.781.006,40	R\$ 3.562.012,80	R\$ 5.343.019,20
ISS + PIS + COFINS (5%+1,65%+7,6%) anual	R\$ 253.793,41	R\$ 507.586,82	R\$ 761.380,24
Receita líquida de vendas anual	R\$ 1.527.212,99	R\$ 3.054.425,98	R\$ 4.581.638,96
Custo de operação anual	R\$ 2.617.158,48	R\$ 4.912.520,55	R\$ 7.208.026,62
Despesas de depreciação anual	R\$ 105.710,00	R\$ 140.710,00	R\$ 443.210,00
LUCRO ANTES DO IR+CSLL	-R\$ 1.089.945,49	-R\$ 1.858.094,57	-R\$ 2.626.387,65
IR+CSLL (34%) anual	R\$ 0,00	R\$ 0,00	R\$ 0,00
Fluxo de caixa operacional (anual)	-R\$ 1.089.945,49	-R\$ 1.858.094,57	-R\$ 2.626.387,65

FONTE: O autor (2016).

QUADRO 19 - CUSTOS PARA OPERAÇÃO DO TRITURADOR, GERADOR DE VAPOR E TURBINA

	TRITURADOR COM GERADOR DE VAPOR E TURBINA		
	ORÇAMENTO 1	ORÇAMENTO 2	ORÇAMENTO 3
Pré-implantação	R\$ 806.174,20	R\$ 806.431,64	R\$ 808.531,14
Implantação	R\$ 2.290.200,00	R\$ 3.115.200,00	R\$ 9.844.200,00
Operação	R\$ 77.000,55	R\$ 81.638,95	R\$ 189.663,35
Total	R\$ 3.173.374,75	R\$ 4.003.270,59	R\$ 10.842.394,50
Receita bruta de vendas (MENSAL)	R\$ 126.154,62	R\$ 237.467,52	R\$ 356.201,28
ISS + PIS + COFINS (5%+1,65%+7,6%) Mensal	R\$ 17.977,03	R\$ 33.839,12	R\$ 50.758,68
Receita líquida de vendas mensal	108.177,59	203.628,40	305.442,60
Custo de operação mensal	R\$ 77.000,55	R\$ 81.638,95	R\$ 189.663,35
Despesas de depreciação mensal	9.407,50	12.845,00	40.882,50
LUCRO ANTES DO IR+CSLL mensal	21.769,53	109.144,45	74.896,75
IR+CSLL (34%) mensal	R\$ 7.401,64	R\$ 37.109,11	R\$ 25.464,89
Despesas de depreciação mensal	R\$ 9.407,50	R\$ 12.845,00	R\$ 40.882,50
	Fluxo de caixa operacional mensal do triturador, gerador de vapor e turbina		
Fluxo de caixa operacional mensal	R\$ 36.374,90	R\$ 118.479,02	R\$ 140.712,38
Receita bruta de vendas (ANUAL)	R\$ 1.781.006,40	R\$ 3.562.012,80	R\$ 5.343.019,20
ISS + PIS + COFINS (5%+1,65%+7,6%) anual	R\$ 253.793,41	R\$ 507.586,82	R\$ 761.380,24
Receita líquida de vendas anual	R\$ 1.527.212,99	R\$ 3.054.425,98	R\$ 4.581.638,96
Custo de operação anual	R\$ 924.006,62	R\$ 979.667,42	R\$ 2.275.960,22
Despesas de depreciação anual	R\$ 112.890,00	R\$ 154.140,00	R\$ 490.590,00
LUCRO ANTES DO IR+CSLL	R\$ 490.316,36	R\$ 1.920.618,55	R\$ 1.815.088,74
IR+CSLL (34%) anual	R\$ 166.707,56	R\$ 653.010,31	R\$ 617.130,17
Despesas de depreciação	R\$ 112.890,00	R\$ 154.140,00	R\$ 490.590,00
Fluxo de caixa operacional (anual)	R\$ 436.498,80	R\$ 1.421.748,24	R\$ 1.688.548,57

FONTE: O autor (2016).

4.5.1 Estudo hipotético de caso para viabilizar a instalação de indústria com trituração de resíduos e geração de energia térmica e elétrica para o orçamento 2

As análises a seguir especificamente para o “orçamento 2”, foram baseadas em considerações realizadas nos estudos de Lima et al. (2015):

Análise da dimensão retorno: conforme a TABELA 60 os projetos de investimentos (PI) em estudo necessitam de investimentos iniciais de R\$ 3.687.658,22. Conforme a TABELA 61, espera-se que esse investimento retorne um valor de R\$ 8.785.619,92 ao longo do período de amortização dos equipamentos, de 20 anos. Isso implica em um retorno líquido (VPL) de R\$ 5.241.493,47, equivalente à R\$ 62.763,65 por mês. Vale ressaltar que esse ganho sempre será o adicional ao oportunizado pelo mercado (TMA). Para esse projeto de investimento, a

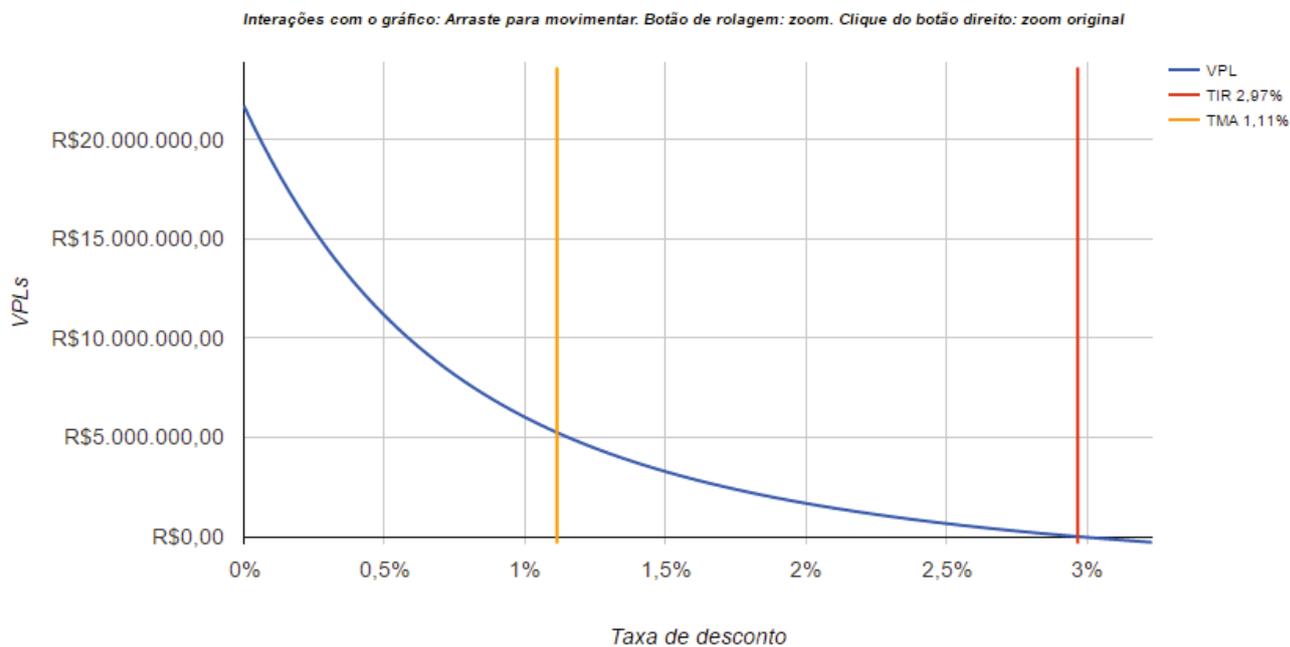
cada unidade monetária investida, há a expectativa de retorno de 2,4789. Isso foi equivalente ao ganho de 0,38% ao mês além da TMA. O retorno ficou melhor expresso pelos índices ROIA/TMA recomendados por Souza e Clemente (2008), cujo valor obtido foi de 34,04%. Isso permitiu avaliar o investimento como retorno de nível baixo-médio (20% a 40%) para o orçamento segundo a escala proposta por Lima et al. (2015).

Análise da dimensão de riscos: quanto aos riscos, o projeto de investimento em estudo apresenta retorno do investimento em aproximadamente 43 meses. O índice *Payback/N* tem que ser promissor respectivamente em pelo menos 17,92% da vida estimada para se pagar. Por outro lado, os índices TMA/TIR resultaram em 37,55%, representando a razão entre os percentuais oferecidos pelo mercado e o rendimento esperado nos projetos de investimentos. Isso permite categorizar os investimentos como risco de nível baixo-médio (20% a 40%) para o orçamento, segundo a escala proposta por Lima et al. (2015).

Análise dos limites de elasticidade (LEs) e dos valores-limite (VLs): para o projeto de investimento em estudo, a TMA admite uma variação máxima de 166,35% antes de torná-lo economicamente viável, sendo o valor-limite igual a 2,97% (TIR). Por outro lado, o investimento inicial poderá sofrer acréscimos de até 147,89%, sendo o valor-limite igual a R\$ 8.785.619,92 (VP). Já os fluxos de caixa permitem redução máxima de 59,66%, sendo o valor-limite igual a R\$ 42.438,73. Esse valor melhorou a percepção dos riscos associados à implementação do projeto de investimento em estudo. Além disso, esse valor poderá ser utilizado nas etapas/fases de monitoramento e controle do projeto, se o projeto de investimento for aprovado e implementado.

A FIGURA 63 representa os Valores Presentes Líquidos (VPLs).

FIGURA 63 - VALOR PRESENTE LÍQUIDO (VPL) DO ORÇAMENTO COM RELAÇÃO À TAXA DE DESCONTO



FONTE: O autor (2016).

A TABELA 60 apresenta os resultados detalhados do estudo de viabilidade para a instalação de indústrias considerando o orçamento levantado:

TABELA 60 - RESULTADOS DO ESTUDO DE VIABILIDADE DA INSTALAÇÃO DE INDÚSTRIA COM TRITURAÇÃO DE RESÍDUOS E GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA E TERMELÉTRICA

TRITURADOR COM GERADOR DE VAPOR E TURBINA	ORÇAMENTO
Pré-implantação	R\$ 496.156,70
Implantação	R\$ 3.115.200,00
Operação	R\$ 76.301,53
Total (PI)	R\$ 3.687.658,22
Receita bruta de vendas (MENSAL)	R\$ 267.150,96
Impostos mensais diversos (14,25%)	R\$ 38.069,01
Receita líquida de vendas mensal	229.081,95
Custo de operação mensal	R\$ 76.301,53
Despesas de depreciação mensal	12.845,00
LUCRO ANTES DO IR+CSLL mensal	139.935,42
IR+CSLL (34%) mensal	R\$ 47.578,04
Despesas de depreciação mensal	R\$ 12.845,00
Fluxo de caixa operacional mensal	R\$ 105.202,38
Receita bruta de vendas (ANUAL)	R\$ 3.205.811,52
Impostos anuais diversos (14,25%)	R\$ 456.828,14
Receita líquida de vendas anual	R\$ 2.748.983,38
Custo de operação anual	R\$ 915.618,34
Despesas de depreciação anual	R\$ 154.140,00
LUCRO ANTES DO IR+CSLL	R\$ 1.679.225,04
IR+CSLL (34%) anual	R\$ 570.936,51
Despesas de depreciação	R\$ 154.140,00
Fluxo de caixa operacional anual	R\$ 1.262.428,53

FONTE: O autor (2016).

A TABELA 61 indica os resultados do valor presente líquido (VPL), valor presente líquido anualizado (VPLA), taxa interna de retorno (TIR), índice benefício-custo (IBC), fluxo de caixa (FC), retorno sobre o investimento adicionado (ROIA), taxa mínima de atratividade (TMA) e retorno de investimento (*payback*) e a TABELA 62, valores limite entre os orçamentos para diversos indicadores.

TABELA 61 - AVALIAÇÃO DE RETORNO, RISCOS E LIMITES DE ELASTICIDADE PARA O ORÇAMENTO 2

DIMENSÃO	INDICADOR	RESULTADO ESPERADO (SE VIÁVEL)	VALOR ESPERADO
			Orçamento 2
Retorno	VP	$VP \geq FC_0 $	8.785.619,92
	VPL	$VPL \geq 0$	5.241.493,47
	VPLM	$VPLM \geq 0$	62.763,65
	IBC ₁ ou IL	$IBC_1 \geq 1$	2,4789
	ROIA (%)	$ROIA \geq 0$	0,38
	Índice ROIA/TMA (%)	$\text{Índice ROIA/TMA} \geq 0$	34,04
	ROI ou TIRM (%)	$ROI \geq TMA$	1,50
Riscos	<i>Payback</i>	$\text{Payback} \leq N$	43
	TIR (%)	$TIR \geq TMA$	2,97
	Índice <i>payback</i> /N (%)	$\text{Índice } \textit{payback}/N \leq 100\%$	17,92
	Índice TMA/TIR (%)	$\text{Índice TMA/TIR} \leq 100\%$	37,55
Limites de elasticidade	$\Delta\% TMA$		166,35
	$\Delta\% FC_0$		147,89
	$\Delta\% FC_j$	Quanto maior a tolerância, melhor	59,66
	$\Delta\% FC_0$ e FC_j		42,51
	$\Delta\% TMA$ e FC_0		78,29
	$\Delta\% TMA$ e FC_j		43,91
	$\Delta\% FC_0$ e FC_j e TMA		33,86

FONTE: O autor (2016).

TABELA 62 - VALORES LIMITE ENTRE OS ORÇAMENTOS PARA DIVERSOS INDICADORES

Indicador	Valor-limite
	Orçamento 2
TMA (%)	2,97
FC ₀ (R\$)	8.785.619,92
FC _j (1 a N-1) (R\$)	42.438,73

FONTE: O autor (2016).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados apresentados neste trabalho, conclui-se como delineamento estratégico do ponto de vista técnico, econômico, ambiental, operacional e quanto às metodologias apresentadas para a preparação da biomassa, que pode-se destacar como oportunidade para o setor industrial a coleta, processamento e comercialização da biomassa residual originada de plantios florestais e da poda urbana. Também podem ser utilizadas como insumo energético, com o emprego de tecnologia de complexidade moderada, onde a fornalha de fluxo cocorrente demonstrou ser adequada à sua combustão, já que os níveis térmicos atingiram, com estabilidade satisfatória, temperaturas acima de 1.150 °C e emissões de monóxido de carbono e outros gases como o SO₂, NO_x e H₂S, abaixo dos permitidos pela Resolução SEMA 016/2014.

Existe também, a possibilidade de redução de volumes e custos pela não disponibilização dos resíduos de poda urbana em aterros. Quanto aos resíduos de plantios florestais, mesmo que não tivessem como destino os aterros, somente pelo fato de ficarem degradando no campo, também poderiam provocar emissões de poluentes no ar, no solo e em cursos hídricos. Quanto à remoção do campo, logisticamente falando, existe maior dificuldade do que com remoção dos resíduos de poda em vias públicas, mas tem-se a vantagem de que os espaços para armazená-los após o corte são mais amplos e pode-se mantê-los secando ao sol por um período mais longo.

Quanto ao levantamento espacial de suprimentos, se percebeu que existe grande potencial de fornecimento para atender a demanda para indústrias ou empresas localizadas em regiões que têm déficit de lenha. Quanto às regiões paranaenses que atendem à demanda de lenha, os resíduos de plantios florestais, além de suprir a necessidade de lenha no setor industrial, ainda têm grande potencial de suprir desse combustível em projetos de geração e cogeração descentralizada de energia termelétrica. Assim, o estudo contribuiu veementemente para que se faça o uso racional e destinação apropriada dos resíduos, com aproveitamento energético, propiciando que a demanda de outros combustíveis, fósseis ou não, seja reduzida. Além disso, há possibilidade de se explorar essa atividade e provocar o aquecimento da economia no entorno.

Recomenda-se que a biomassa originada de árvores urbanas seja utilizada em cada cidade geradora, direcionando-a para pequenas indústrias do entorno, deixando nesse caso, o produto final mais atrativo economicamente e tornando-se competitivo com outros energéticos, como por exemplo, a lenha comprada de outros fornecedores.

Quanto aos resíduos da poda urbana gerados na cidade de Pato Branco, constatou-se no estudo que há grande potencial de aproveitamento, onde sua abrangência de suprimento foi equivalente ao consumo anual de uma indústria de grande porte localizada na região. Uma das dificuldades em se realizar o aproveitamento desses resíduos está em estabelecer contratos de parceria entre a prefeitura municipal e a empresa para explorá-los, isso porque o suprimento de biomassa tem que ocorrer ao longo de um longo período de tempo, onde ao menos, que se torne viável os investimentos. Assim para evitar transtornos futuros com esse suprimento, recomenda-se firmar contratos formais diretamente com os órgãos municipais envolvidos. Para viabilizar a comercialização do cavaco, outros contratos deverão ser realizados com as empresas interessadas na sua compra.

Quanto à preparação da biomassa antes de direcioná-la às fornalhas, primeiramente deve-se considerar as condições aqui propostas de disposição dos resíduos após o corte das árvores, conforme resultados apresentados na seção 4.2.1:

- a) diante da não possibilidade em dispor os resíduos em lugares cobertos e como meio de reduzir os custos de secagem, transporte e manuseio da biomassa e melhorar seu potencial calorífico, pelo fato de que, após a poda, os fardos apresentaram perdas significativas de umidade – ocasionado principalmente pela secagem das folhas nos 13 primeiros dias, – recomenda-se que se disponibilize, nestes 13 primeiros dias, os galhos amontoados em leiras, - cuidando para que se minimize a compactação -, em ambiente aberto, sujeito às intempéries. Neste período, a secagem se comportou de forma similar em ambiente aberto e fechado, sem precisar de secagem forçada, não apresentando diferenças significativas entre as duas disposições, com pequena vantagem das amostras deixadas ao abrigo. Essa disponibilização poderá reduzir em até 30% do seu peso em relação à base seca e perda de até 50% da umidade remanescente da biomassa. Não foi recomendável por um período maior que este, pois o decaimento de folhas dos galhos começaria a se acentuar, diminuindo assim, a disponibilidade de biomassa, até porque, partindo-se do pressuposto de que o poder calorífico das folhas, em todas as amostras analisadas, conforme testes realizados pelo autor, foi maior que do caule e casca, sua utilização não pode ser desprezada. Porém, devido à alta formação de cinzas causadas pela queima das folhas, alguns consumidores rejeitam cavaco misturado com folhas, conforme relatos de entrevistas realizada pelo autor e direcionadas a empresários, fabricantes de cavaco;

- c) após esta pré secagem dos galhos, recomenda-se triturá-los. Entre esta trituração e a disposição em leiras antes de utilizá-los em fornalhas, recomenda-se esperar até duas semanas para que percam quantidades mais significativas de umidade.
- d) ao dispor os cavacos em leiras, foi recomendado cobrir sua camada externa com folhas trituradas, propiciando desta forma maior proteção à água da chuva, reduzindo consideravelmente sua percolação, conforme constatado nos ensaios. Para sua utilização, recomenda-se remover a camada externa de cavaco na leira, em torno de 30 centímetros, tendo em vista que foi a camada que apresentou maior teor de umidade (37,9%). Abaixo desta profundidade, decrescia significativamente, de acordo com levantamentos das taxas de umidade (23,9%);
- e) os galhos não deverão estar muito secos para iniciar o processo de trituração (em 28 dias deixados ao tempo, os galhos finos, de até cinco centímetros, atingiram quase que sua umidade natural de 14,2% em base seca), pois os testes exploratórios de corte de amostras de madeira verde e seca com a eletrosserra, deram indício de que o tempo de corte dos galhos secos foi de 1,57 vezes maior que o tempo de corte de galhos ainda verdes. Experimentos realizados por Calil et al. (2014) e Moraes et al. (2009) para a determinação de propriedades da madeira, (tensões de cisalhamento, flexão e tração), também indicaram que a madeira saturada em umidade foi menos resistente a essas propriedades que a madeira seca. Outro fator foi que, a partir de entrevistas realizadas com produtores de cavaco de madeira, indicou-se que triturar a madeira verde, além de facilitar o corte, possibilitava a diminuição do tempo de máquina, economizava energia e a vida das ferramentas era maior do que quando se triturava madeira seca. Em estudos futuros, sugere-se quantificar essa diferença de energia e também o desgaste das ferramentas.

Nas corridas, não ocorreram diferenças significativas na queima entre cavaco com granulometria grossa ou fina. Com a utilização de cavaco a 14,2% de umidade, houve maior estabilidade e homogeneização da combustão, das temperaturas e dos níveis de gases do que com a utilização do cavaco a 21,2% e muito maior do que com a lenha não triturada. Porém, a vazão mássica de combustível consumido, não foi suficiente para uma demanda mais elevada de energia. Recomendou-se, neste caso, que a fornalha fosse ampliada em escala.

De modo geral, a atividade em estudo não gerou refugos (rejeitos) de biomassa, já que todo o cavaco foi utilizado na queima, independentemente de sua granulometria e da composição qualitativa em seus diversos compartimentos como galhos, folhas e cascas das

árvores. A quantidade de rejeitos mais significativa foi de cinzas, que atingiu até 7,5% na combustão das folhas.

Com a proposta de instalação de pequenas empresas para beneficiar os resíduos de poda e gerar energia termelétrica em usinas de pequena escala, conforme Araújo, Bandeira e Campos (2014) e se utilizar o excedente do calor para outras finalidades industriais, como indicado nos resultados deste estudo, se poderiam gerar em média de 10 empregos em cada planta e fomentar o aquecimento da economia no entorno do empreendimento, com faturamentos superiores a R\$ 1.600.000,00 anuais, com *payback* de 127, 43 e 198 meses, conforme a modalidade de investimento e recomendações de Casarotto e Kopittke (2010).

A partir da análise da expectativa, confronto e estimativas entre retorno e riscos envolvidos, dos limites de elasticidade e valores-limite das principais variáveis intervenientes no desempenho econômico do projeto de investimento e, do espectro de validade da decisão, propostos por Lima et al. (2015), recomenda-se a implementação do projeto de investimento em estudo mas, em constante análise do projeto. Além disso, sinaliza-se uma especial atenção no processo de monitoramento e controle do projeto para a variável “fluxo de caixa” que se apresenta como a mais sensível para a manutenção de sua viabilidade econômica e do investimento em estudo.

A partir dos resultados apresentados sobre o aproveitamento desses resíduos, percebe-se a possibilidade em se efetivar ainda mais sua comercialização, já que foram apresentadas informações e diagnósticos importantes para que isso ocorra, como por exemplo:

- viabilidade para instalar plantas termelétricas e de cogeração, com reaproveitamento do calor residual;
- demonstração de logísticas mais adequadas ao manuseio, disposição e secagem da biomassa;
- granulometria e relação estequiométrica mais adequadas ao sistema de combustão;
- balanços que demonstraram valores reduzidos das emissões de gases, impactos ambientais, entre outros, causados pela queima.

Com a possibilidade de se usar a biomassa do entorno e se gerar a energia próxima aos centros de consumo, os custos de transporte, dificuldades logísticas, perdas na transmissão e distribuição, poderão ser reduzidos, onde haverá o incremento da confiabilidade no suprimento e independência no fornecimento de energia elétrica.

Em estudos futuros, sugere-se realizar um mapeamento regional termo industrial no estado do Paraná ou em outros locais, mostrando a distribuição da indústria em função do nível térmico necessário, a partir de dados disponibilizados pelas próprias indústrias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa nº. 687, de 24 de novembro de 2015. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>. 2015. Acesso em março de 2016.
- AGUILAR, F. X.; SONG, N.; SHIFLEY, S. R. **Review of consumption trends and public policies promoting woody biomass as an energy feedstock in the U.S.** Biomass and Bioenergy, Volume 35, Vol. 8, August 2011.
- ALFONSO, D. R. PERPIÑÁ, C.; PÉREZ-NAVARRO, A.; PEÑALVO, E.; VARGAS, C.; CÁRDENAS, R. **Methodology for optimization of distributed biomass resources evaluation, management and final energy use.** Journal Biomass and Bioenergy, 2009. Vol. 33 No. 8.
- ARAÚJO, M. P. S. A.; BANDEIRA, R. A. M.; CAMPOS, V. B. G. **Custos e fretes praticados no transporte rodoviário de cargas: uma análise comparativa entre autônomos e empresas.** Journal of Transport Literature. vol. 8 nº. 4, Manaus, Out. 2014. Acesso em jul/2016, disponível em http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2238-10312014000400009
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PRODUTORES DE FLORESTAS PLANTADAS - ABRAF. Anuário estatístico da ABRAF 2013 ano base 2012. Brasília: 2013. Acesso em março de 2016. Disponível em <http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/3910>.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DISTRIBUIDORES DE ENERGIA ELÉTRICA – ABRADEE. **Tarifa média de fornecimento para classe industrial.** COPEL DISTRIBUIÇÃO S.A. Outubro 2015. Acesso em março de 2016. Disponível em <http://www.abradee.com.br/setor-de-distribuicao/tarifas-de-energia/tarifas-de-energia>
- ATAIDES, P. R. V de. **A importância econômica do setor florestal.** Conselho em Revista. CREA – RS: Porto Alegre, ano II, n.16, p. 25. Dez. 2005.
- BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z.; SILVA FILHO, D. F. **Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas.** 1ª. Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- BEJAN, A. VADÁSZ, P.; KRÖGER, D. G. (Eds.). **Energy and the environment.** Kluwer Academic Publishers, vol. 15, Dordrecht, Netherland, 1999.
- BELL, R. A. O. **Demanda de lenha para secagem de grãos no estado do Paraná.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. 2012.
- BERMANN, C. **Energia no Brasil: para que? Para quem? Crise e alternativas para um país sustentável.** São Paulo: Editora Fase, 2001.
- BHUTTO, A. W.; BAZMI, A. A.; ZAHEDI, G. **Greener energy: Issues and challenges for Pakistan -Biomass energy prospective.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.
- BIONDI, D.; LEAL, L.; COBALCHINI, J. L. **Tratamentos silviculturais em mudas de *Allophylus edulis* (a. st.-hil., cambess. & a. juss.) radlk. para arborização de ruas.** Revista Floresta, Curitiba, PR, v. 37, n. 3, set./dez. 2007.
- BLANCO-CANQUI, H. **Crop residue removal for bioenergy reduces soil carbon pools: how can we offset carbon losses?** Bio Energy Research, 2012.
- BORSATO, D.; GALÃO, O. F.; MOREIRA, I. **Combustíveis fósseis: carvão e petróleo.** Londrina: EDUEL, 2009.
- BRANT, V.; PIVEC, J.; FUKSA, P.; NECKÁŘ, K.; KOCOURKOVÁ, D.; VENCLOVÁ, V. **Biomass and energy production of catch crops in areas with deficiency of precipitation during summer period in central Bohemia.** Biomass and Bioenergy, vol. 35, n 3, mar. 2011.

BRITO, J. O. **Princípios de produção e utilização de carvão vegetal de madeira**. Documentos Florestais – Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Departamento de Ciências Florestais. Piracicaba, mai. 1990.

BRITO, J. O.; BARICHELLO, L. E. G. **Usos diretos e propriedades da madeira para geração de energia**. IPEF- Filosofia de trabalho de uma elite de empresas florestais brasileiras, Circular Técnica n. 52, jun./1979.

BROWN, H. L.; HAMEL, B. B.; HEDMAN, B. A. **Energy Analysis of 108 Industrial Processes**. Washington D. C.: Fairmont Press, Inc., 6 Ed., 1996.

CALIL NETO, C.; CHRISTOFORO, A. L.; RIBEIRO FILHO, S. L. M.; LAHR, F. A. R.; CALIL JUNIOR, C. **Avaliação da resistência ao cisalhamento e à delaminação em madeira laminada colada**. Ciência Florestal, v. 24, n. 4, Santa Maria, 2014. Acesso em maio de 2015. Disponível em <http://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/issue/view/787>

CARESANA, F.; COMODI, G.; PELAGALLI, L.; VAGNI, S. **Cogeneration micro turbine fuelled by solid biomass: a technical-economic study for Italy**. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2010, Vol. 1. Pg. 677-683.

CARLOS, R. M.; BA KHANG, D. **Characterization of biomass energy projects in Southeast Asia**. Biomass and Bioenergy, 2008.

CASAROTTO FILHO, N, KOPITTKKE, B. H. **Análise de Investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. São Paulo: Atlas, 11 Ed. 2010.

CHAVE, J. **Medição da densidade da madeira em árvores tropicais: manual de campo**. Sixth Framework Programme, Lab. Evolution et Diversité Biologique Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 2006.

CHEN, L.; LI, X.; WEN, W.; JIA, J.; LI, G.; DENG, F. **The status, predicament and countermeasures of biomass secondary energy production in China**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012.

COSIC, B.; STANIC, Z.; DUIC, N. **Geographic distribution of economic potential of agricultural and forest biomass residual for energy use: Case study Croatia**. Energy, 2011.

CREA-PR Revista do Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Estado do Paraná. Apagão Florestal. Curitiba, ano 7, n. 29, p.41 e 42, jun./jul. 2004.

CUIPING, L.; CHUANGZHI, W.; YANYONGJIE; HUANG, H. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. **Biomass and Bioenergy**, v. 27, p. 119 – 130, 2004.

DEMIRBAS, A. **Relationships between lignin contents and heating values of biomass**. Energy Conversion and Management, v. 42, p. 183-188, 2001. 93

DERCAN, B.; LUKIC, T.; BUBALO- ZIVKOVIC, M.; DURDEV, B.; STOJSAVLJEVIC, R.; PANTELIC, M. **Possibility of efficient utilization of wood waste as a renewable energy resource in Serbia**. Renewable and Sustainable Energy, Vol. 16, Issue 3, abr. 2012.

DETZEL, V. A.; MILANO, M. S; HOEFLICH, V. F.; FIRKOWSKI, C. **Desenvolvimento de um método de avaliação monetária de árvores urbanas e aplicação à situação de Maringá – PR**, Revista Floresta, v.28, n. 1. Curitiba, 1998.

DODIC, S. N.; POPOV. S. D.; DODIĆ, J. M.; RANKOVIĆ, J. A.; ZAVARGO, Z. Z.; GOLUŠIN, M. T. **An overview of biomass energy utilization in Vojvodina**. Renewable and Sustainable Energy, 2010.

DORINI JÚNIOR, J. R. **Produção de biomassa em diferentes materiais genéticos de *Eucalyptus sp.*** Engenharia Florestal UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2015.

EICHLER, P.; TOLEDO, M.; MACHADO, G; LEON, S; NUNES, T.; FARIA, D.; GOMES, F.; SANTOS, F. **Potencial energético da biomassa florestal**. In: 4º. Anuário Brasileiro das Indústrias de Biomassa e Energias Renováveis, 2016.

EISFELD, R. L.; NASCIMENTO, F. A. F. **Mapeamento dos plantios florestais do estado do Paraná— Pinus e Eucalyptus**. Instituto de Florestas do Paraná IFPR, Curitiba, 2015.

ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M.; VANIER, N. L.; FERREIRA, C. D. **Tecnologias de pré-armazenamento, armazenamento e conservação de grãos**. Faculdade de Agronomia, Departamento de Ciência e Tecnologia Agroindustrial - Laboratório de pós-colheita, industrialização e qualidade de grãos, Pelotas, UFPEL, 2015.

ELOY E. **Implantação de florestas energéticas no norte do Rio Grande do Sul, Brasil** Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná UFPR. Orientador: Prof. Dr. Dimas A. da Silva, CURITIBA, 2015

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **Balço energético nacional**. Relatório final 2015- ano base 2014. Ministério de Minas e Energia - MME Brasília.

EUFRADE JUNIOR, H. J. **Caracterização físico-química da biomassa produzida em sistemas florestais de curta rotação para geração de energia**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Botucatu. Faculdade de Ciências Agrônômicas. Botucatu, 2015.

FELFLI, F. F.; MESA, J. M.; ROCHA, J. D.; FILIPPETTO, D.; LUENGO, C. A.; PIPPO, W. A. **Biomass briquetting and its perspectives in Brazil**. Biomass and Bioenergy, v.35, p. 232-242, Campinas – SP, 2011.

FERNANDES, U.; COSTA, M. **Potential of biomass residues for energy production and utilization in a region of Portugal**. Biomass and Bioenergy, mai. 2010; Vol. 34, n. 5. Pg. 661-666. 2010.

FERREIRA, A. B. H. Dicionário da língua portuguesa. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira, 2013.

FIGUEIREDO, P. J. M. **A sociedade do lixo: os resíduos, a questão energética e a crise ambiental**. 2ª. Edição. Piracicaba. Editora UNIMEP, 1995. 240p.

FOWLER, P.; KRAJACIĆ, G.; LONČAR, D.; DUIĆ, N. **Modeling the energy potential of biomass – H2RES**. International Journal of Hydrogen Energy, 2009.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS – FGV PROJETOS Estudo sobre os aspectos econômicos e financeiros da implantação e operação de aterros sanitários – ABETRE – Associação Brasileira de Empresas de Tratamento de Resíduos – Relatório Final. 2008.

GABRIELLI, L. **Madeira escassa**. Revista CREA-PR, Curitiba, ano 8, n.37, p. 19-22, dez. 2005.

GOKCOL, C.; DURSUN, B.; ALBOYACI, B.; SUNAN, E.; **Importance of biomass energy as alternative to other sources in Turkey**. Energy Policy, 2009.

GÓMEZ, E.O. CORTEZ, L. A. B.; PÉREZ, J. M. M.; SEYEI, O.; LINERO, F. A. B. **Projeto de pirólise rápida contínua de biomassa com ar em reator de leito fluidizado atmosférico**. An. 3. Enc. Energ. Meio Rural, 2003.

GONÇALVES, R. V.; NASCIMENTO, F. A. F.; MENDES JUNIOR, C. L.; SCHAITZA, E.; CEMIN, L. G.; FIALHO, J. T. **Panorama do setor florestal paranaense**. Secretaria de Estado da Agricultura e Abastecimento - SEAB Departamento de Desenvolvimento Agropecuário - DEAGRO Divisão de Cultivos Florestais - DCF Curitiba, abril de 2011.

_____. **Relação entre a demanda e a disponibilidade de área florestal para secagem de produtos agrícolas no Paraná**. SEAB/DEAGRO – Divisão de Cultivos Florestais. Curitiba, 2012.

GRAÇA, G. G. **Energia e florestas: tendências e potencialidades brasileiras de emissão e captação de dióxido de carbono**. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE NA INTEGRAÇÃO DA BACIA DO PRATA. ANAIS. Juan Luis Mascaró, coord. UFRGS/SAGRA. Porto Alegre, 1992. p. 187-194.

GRACIA, C.; VELÁZQUEZ-MARTÍ, B. e ESTORNELL, J. **An application of the vehicle routing problem to biomass transportation**. Biosystems Engineering, Vol. 124, Aug. 2014, Pg. 40–52, 2014.

HELESCH, C. **Flexible steam turbine solutions for combined heat and power in combined cycle power plants**. Russia Power Siemens 2013 - March 2013. Acesso em julho de 2016. Disponível em http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/energy-topics/publications/Technical%20Papers/Steam%20Turbines/Power_Russia_Helesch_Internet.pdf.

HOOGWIJK, M. M. **Exploration of the ranges of the global potential of biomass for energy**. Biomass and Bioenergy, 2003.

HOOGWIJK, M. M. **Over het mondiale en regionale potentieel van hernieuwbare energiebronnen**. Tese de Doutorado, Universidade de Utrecht, Holanda. 12 de março, 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em <http://www.ibge.gov.br> – IBGE – Cidades@, em população/projeção da população 2015, Rio de Janeiro, IBGE, 2015.

Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Governo Federal. Estação Meteorológica de Observação de Superfície Automática 2015. Dados de julho de 2013 a setembro de 2015. Acessado em http://www.inmet.gov.br/sonabra/pg_dspDadosCodigo_sim.php?QTgwNw==.

IPIRANGA, S. M. H. **Grupos estratégicos no setor madeireiro de Manaus**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

JANKOWSKY, I. P.; GALINA, I. C. M. **Secagem de madeiras** - curso técnico, Associação Nacional dos Produtores de Pisos de Madeira - ANPM, ESALQ/USP, Projeto Piso de Madeira Sustentável (PIMADS), ITTO – International Tropical Timber Organization, 2013.

JÄPPINEN, E.; KORPINEN, O.-J.; RANTA, T. **The effects of local biomass availability and possibilities for truck and train transportation on the greenhouse gas emissions of a small-diameter energy wood supply chain**. Bio Energy Research, 2012.

JARDIM, N. S.; WELLS, C.; CONSONI, A. J.; AZEVEDO, R. M. B. de. **Gerenciamento integrado do lixo municipal**. In: D'ALMEIDA, M. L. O.; VILHENA, A. (Coord.). Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado. 2. ed. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT/Compromisso Empresarial para Reciclagem – CEMPRE, 2000.

KANIANSKA, R.; GUŠTAFÍKOVÁ, T.; KIZEKOVÁ, M.; KOVANDA, J. **Use of material flow accounting for assessment of energy savings: A case of biomass in Slovakia and the Czech Republic**. Energy Policy, 2011.

KASMIOUI, O.; CEULEMANS, R. **Financial analysis of the cultivation of short rotation woody crops for bioenergy in Belgium: Barriers and opportunities**. Bioenergy Research, Vol. 6, pg. 336-350, 2013.

KAYGUSUZ, K.; TU, M. F. **Biomass energy potential in Turkey**. Renewable Energy, 26(4), 661–678, 2002.

KEIRSTEAD, J. N.; SAMSATLI, N.; PANTALEO, A. M.; SHAH, N. **Evaluating biomass energy strategies for a UK eco-town with an MILP optimization model**. Biomass and Bioenergy, 2012.

KLAUTAU, J. P. **Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos**. Dissertação UFPR – PPGERHA. Orientador: Marcelo Risso Errera, Curitiba, 2008.

KLITZKE, R.J. **Secagem da madeira**. In: NOGUEIRA M. F. M.; OLIVEIRA, J. T. S. e FIEDLER, N. C. Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro. Jerônimo Monteiro: Suprema Gráfica e Editora Ltda., 2007. 1Ed.V.1, 426p.

KUO, K. K. **Principles of combustion**, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey, 2a. Ed. 2005.

LEAL, L. **Custos das árvores de rua** – estudo de caso: cidade de Curitiba/PR. Dissertação de Mestrado em Ciências Florestais, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná UFPR. CURITIBA, 2007.

LIMA, J. D.; TRENTIN, M. G.; ADAMCZUK, G. O.; BATISTUS, D. R.; SETTI, D. **A systematic approach for the analysis of the economic viability of investment projects**. Int. J. Engineering Management and Economics, Vol. 5, Nos. 1/2, Inderscience Enterprises Ltd. 2015.

LIRA, C. S. **Pirólise rápida da semente de tucumã-do-Amazonas (*Astrocaryum aculeatum*):** caracterização da biomassa in-natura e dos produtos gerados. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2012.

LOO, S. V.; KOPPEJAN, J. **The handbook of biomass combustion & co-firing**. Earthscan Ltd. London-Washington, 2010.

LORA, E. E. S. **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002.

LUCKE, S. A. **A usina que faz o lixo desaparecer**. Jornal da UNICAMP Nº 552, Campinas, mar. 2013.

MACCARINI, A. C., ANDRADE J. B. L. e HERNÁNDEZ R.H. **Metodologia aplicada ao destino industrial de resíduos de poda de logradouros públicos para fins energéticos (estudo de caso)**. 25º. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Recife: ABES, 2009.

MANDELLI, S., et al. **Tratamento de resíduos sólidos** (compêndio de publicações). Caxias do Sul: Editora do autor (Universidade de Caxias do Sul). 291p. 1991.

MARTIN, J-M. **A economia mundial de energia**. Tradução de Elcio Fernandes. São Paulo. Editora da Universidade Estadual Paulista – UNESP. 1992.

MARTIN, S.; SILVA, J. N.; TINÔCO, I. F. F.; VIEIRA, A. C.; ZANATTA, F. L.; MELO, L. D. **Projeto e construção de um gaseificador de biomassa de fluxo concorrente**. Engenharia na Agricultura. V.14, n.4. Viçosa-MG, 2006.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 1):** overview of biomass. Bioresource Technology, Volume 83, Número 1, maio 2002, p. 37-46, 2002.

MEIRA, A. M. **Gestão de resíduos da arborização urbana**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo USP - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Área de Concentração: Recursos Florestais. Piracicaba, 2010.

MEKHILEF, S.; SAIDUR, A.; SAFARI, R.; MUSTAFFA, W.E.S.B. **Biomass energy in Malaysia: Current state and prospects**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011.

MELLADO, E.C.E.R. **Modelo de transferência de calor e massa na secagem de madeira serrada de Pinus**. 2007. Tese de Doutorado em Ciências Florestais. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

MENDES, L. M.; SILVA; J. R. M.; TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T. **Variação da densidade da madeira de pinus**. Revista da Madeira - Edição Nº83 - agosto de 2004.

MENEZES, L. P.; SCHNEIDER, P. R. **Modelagem e quantificação das perdas no corte *Eucalyptus grandis* em primeira e segunda rotação**. 6º. Congresso Florestal Estadual - Nova Prata - RS. p. 921-928. 1988.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA - MME. **Índice de custo benefício (ICB) de empreendimentos de geração** - Leilões de compra de energia elétrica proveniente de novos empreendimentos de geração, metodologia de cálculo. Empresa de Pesquisa Energética (EPE) n. EPE-DEE-RE-102/2008-r5, setembro de 2013. Acesso em dezembro de 2015. Disponível em http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/editais_geracao/documentos/ANEXO%2009%20Metodologia%20de%20C%3%A1lculo%20de%20ICB.pdf.

Portaria MME nº 101, de 22 de março de 2016. Acesso em junho de 2016. Disponível em <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/prt2016101mme.pdf>.

MORAES NETO, S. P.; TELES, R. F. RODRIGUES, T. O.; VALE A. T.; SOUZA, M. R. **Propriedades mecânicas da madeira de cinco procedências de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* implantadas no cerrado do**

Distrito Federal, DF. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA Cerrados. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Planaltina, 2009.

MOREIRA, J. R. **Mitigation and adaptation strategies for global change. International workshop bioenergy for sustainable rural.** Development - LAMNET workshop. CENBIO – Brazilian Reference Center on Biomass. Viña del Mar, Chile, nov. 2004.

NETO, D. **A cana em tempo bom.** Revista CREA-PR, Curitiba, ano 9, n.41, p. 17-19, out. 2006.

NOGUEIRA, L. A. H.; NOGUEIRA, F. J. H.; ROCHA, C. R. **Eficiência Energética no Uso de Vapor.** Centrais Elétricas Brasileiras, Fupai/Efficientia Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. Disponível em http://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2014/04/22/6281/LivroVapor.pdf. Acesso em março de 2016.

NOGUEIRA, M. F. M. (Org.), OLIVEIRA, J. T. S., FIEDLER, N. C. **Tecnologias aplicadas ao setor madeireiro.** Jerônimo Monteiro: Suprema Gráfica e Editora Ltda., 2007. 1Ed.V.1, 426p.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. **Caracterização Energética da Biomassa Vegetal.** BARRETO, Eduardo José Fagundes (Coord.). Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

OLIVEIRA, J. L.; SILVA, J. N.; PEREIRA, E. G.; OLIVEIRA Fº, D.; CARVALHO, D. R. **Characterization and mapping of waste from coffee and eucalyptus production in Brazil for thermochemical conversion of energy via gasification.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 21, May 2013.

OLIVEIRA, J. T. S.; HELLMEISTER, J. C.; TOMAZELLO, M. **Variação do teor de umidade e da densidade básica na madeira de sete espécies de eucalipto.** Rev. Árvore v. 29 n.1 Viçosa jan/fev 2005.

OYAMA, S.; KASHIHARA, H.; KAZARI, M.; MATSUDA, Y.; SHIMIZU, M.; YAMADA, K.; WATANABE, T. **Development of an Efficient Small-scale Distributed Power Generation System Using Gasification of Woody Biomass.** Proceedings of the International Conference on Power Engineering, 2009 (ICOPE-09), Vol. 1. Pg. 213-218.

PALHANO Jr., N. V. **Dados sobre a poda de árvores na cidade de Pato Branco.** Comunicação pessoal em jun. de 2009. Prefeitura Municipal de Pato Branco, 2009.

PAWLISZYN, J. **Sampling and sample preparation for field and laboratory: fundamentals and new directions in sample preparation.** Netherlands. Elsevier, 1st. ed., 2002.

PEREIRA, H. **The importance of biomass structure and chemical composition for biorefineries.** In: CONFERENCE DIVISION 5 FOREST PRODUCTS, 2012, Estoril, Lisboa – Portugal, IUFRO, International Union of Forestry Research Organizations, 2012. p. 57-62.

PUHL, C. R.; SOUZA, F.; VIERA, P. F.; ALBUQUERQUE JR., S. L. **Plano diretor de arborização urbana Ambiental Costa Oeste, projetos técnicos e consultoria Ltda.** Prefeitura Municipal de Pato Branco, 2012.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. **Poder calorífico da madeira e de materiais ligno-celulósicos.** Revista da Madeira nº 89. Abril 2005, pg. 100-106.

RIOS, E.; ROCHADELLI, R.; OLIVEIRA, A. F. **Consumo de madeira para secagem de grãos no município de Palotina - Safra 2013/2014.** Revista Brasileira de Energias Renováveis, v.5, p. 27- 41, Palotina, 2016.

RODRIGUES, E. C. **Solução energética.** São Paulo: Editoras Unidas, 1983. 361p.

ROSILLO-CALLE, F.; BAJAY, S. V.; ROTHMAN, H. **Industrial uses of biomass energy: the example of Brazil.** Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira. Trad. Rocha, J. D. e Rocha, M. P. D. Editora Unicamp: Campinas, 2008.

SÁNCHEZ, C. G.. **Tecnologia da gaseificação de biomassa.** Faculdade de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, UNICAMP, Editora Átomo Ltda., Campinas-SP 2010.

SANTOS, G. R. V., JANKOWSKY, I. P. e ANDRADE, A. **Curva característica de secagem para madeira de *Eucalyptus grandis*** **Characteristic drying curve for *Eucalyptus grandis* lumber** SCIENTIA FORESTALIS n. 63, p. 214-220, jun. 2003.

SCURLOCK, J. M. O.; HALL, D. O. HOUSE, J. I. **Utilising biomass crops as an energy source: a European perspective**. Division of life sciences, UK, London, 1993.

SEARCY, E; FLYNN, P. C.; GHAFUORI, E.; KUMAR, A. **The Relative Cost of Biomass Energy Transport**. Applied Biochemistry and Biotechnology 639 Vol. 136–140, 2007.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS – SEMA. **Coletânea das Resoluções SEMA**. Casa Civil, Setor Estadual de Legislação do Paraná, 2014. Acesso em março de 2016. Disponível em <http://www.iap.pr.gov.br/pagina-934.html>.

SILVA, J. A. A.; PAULA NETO, F. **Princípios básicos da dendrometria**. Departamento de Ciência Florestal, UFRPE, Imprensa Universitária da UFRPE, 1979.

SILVA, J. P. **Caracterização da casca de café (coffea arábica, L) in natura, e de seus produtos obtidos pelo processo de pirólise em reator mecanicamente agitado**. Dissertação de mestrado, Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2012.

SILVA, J. S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. 2 ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008.

SILVEIRA, S. M. **Aproveitamento das cascas de coco verde para produção de briquete em Salvador – BA**. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo). Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia – Salvador, 2008.

SOARES, T. S.; VALE, A. B.; LEITE, H. G.; MACHADO, C. C. **Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais**. Revista Árvore, Vol. 27. Viçosa, nov./dez. 2003.

SOLIDDA. **Microturbinas a vapor, sistemas para geração termoelétrica e cogeração**. Solidda Energia, turbinas e microturbinas a vapor Acesso em junho de 2016. Disponível em <http://solidda.com.br/projetos-executados>.

SOUZA, A.; CLEMENTE, A. **Decisões financeiras e análises de investimentos: conceitos, técnicas e aplicações**. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008. 186p.

STRANDMAN, J.; KELLOMÄKI, S.; STRANDMAN, H. **Effects of forest management on total biomass production and CO₂ emissions from use of energy biomass of norway Spruce and Scots pine**. Bioenergy Research, Scots, p.733-747, 21 fev. 2012.

SZYMCZAK, D. A. **Manejo dos resíduos da colheita de *Pinus taeda* L. e sua relação com compactação do solo, exportação de nutrientes e potencial energético**. Tese de doutorado. UFSM, Santa Maria, RS, 2015.

TAHVANAINEN, T., ANTTILA, P. **Supply chain cost analysis of long-distance transportation of energy wood in Finland**. Biomass and Bioenergy, Volume 35, Issue 8, August 2011, Finland. Elsevier Ltd. Disponível em https://www.academia.edu/17271496/Supply_chain_cost_analysis_of_long-distance_transportation_of_energy_wood_in_Finland?auto=download. Acesso em julho de 2014.

TRINK T.; SCHMID, C.; SCHINKO, T.; STEININGER, K.W.; LOIBNEGGER, T.; KETTNER, C.; PACK, A.; TÖGLHOFER C. **Regional economic impacts of biomass based energy service use: A comparison across crops and technologies for East Styria, Austria**. Energy Policy, Volume 38, out. 2010.

TYAGI, S. K.; PANDEY, A. K.; SAHU, S.; BAJALA, V.; RAJPUT, J. P. S. **Experimental study and performance evaluation of various cook stove models based on energy and exergy analysis**. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2012.

TORQUATI B., MARINO D., VENANZI S., PORCEDDU P. R., CHIORRI M. **Using tree crop pruning residues for energy purposes: A spatial analysis and an evaluation of the economic and environmental**

sustainability. Biomass and Bioenergy 95, 2016. 124 a 131. Disponível na página <http://www.elsevier.com/locate/biombioe>. Acessado em outubro de 2016.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION - EIA. **World total energy consumption by region and fuel**: Reference case, 2006-2035 Independent Statistics & Analysis – International Energy Outlook 2011.

UDOP - União dos Produtores de Bioenergia. **Pirólise de biomassa chama a atenção da Embrapa**. Acessado em janeiro de 2013. jul. 2012. Disponível na página: <http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1089512#nc>.

UTTA, T.; GOEPFERT, K.; FREY, C. **Energy-from-waste plants: Siemens steam turbines handle inconsistent steam parameters**. A specific look at the Italian waste market. Siemens Turbomachinery Equipment GmbH. POWER-GEN Europe, Milano/Italy, 2016. Disponível em http://www.energy.siemens.com/br/pool/hq/energy-topics/publications/Technical%20Papers/TP-16-002-PA_Waste%20Italy.pdf. Acesso em julho de 2016.

VELÁZQUEZ-MARTÍ, B.; ANNEVELINK E. **GIS application to define biomass collection points as sources for linear programming of delivery networks**. Transactions of ASABE, 52 (2009), pp. 1069–1078.

WANG, G.; LI, W.; LI, B.; CHEN, H. **TG study on pyrolysis of biomass and its three components under syngas**. Fuel n. 87, p. 552–558. Science Direct: 2007. Acesso em junho de 2016. Disponível em www.sciencedirect.com.

WEBER, E. A. **Armazenagem agrícola**. Porto Alegre: Kepler Weber Industrial, 1995.

WILAIPON, P. **Physical characteristics of maize cob briquette under moderate die pressure**. American Journal of Applied Sciences. v. 4, n.12 p. 995-998, 2007.

WILAIPON, P. **The effects of briquetting pressure on banana-peel briquette and the banana waste in northern Thailand**. American Journal of Applied Sciences. v. 6, n. 1, p. 167-171, 2009.

WISNIEWSKI, J.; SAMPSON, N. **Terrestrial biospheric carbon fluxes quantification of sinks and sources of CO₂**. Springer Science, London, 1993.

WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E.; BORGNACKE, C.. **Fundamentos da termodinâmica clássica**, 8.ed. Série Van Wylen. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2013.

YANIK J.; STAHL, R.; TROEGER, N.; SINAG, A. **Pyrolysis of algal biomass**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. Volume 103, September 2013.

YANLI, Y.; PEIDONG, Z.; WENLONG, Z.; YONGSHENG, T.; YONGHONG, Z.; LISHENG, W. **Quantitative appraisal and potential analysis for primary biomass resources for energy utilization in China**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010.

YOSHIOKA T.; ARUGAB, K.; NITAMIC, T.; SAKAID, H.; KOBAYASHIC, H. **A case study on the costs and the fuel consumption of harvesting, transporting, and chipping chains for logging residues in Japan**. Biomass and Bioenergy, Vol. 30, 4 Ed., p. 342-348, abr. 2006.

APÊNDICE 1 TABELAS

TABELA A1 - FICHA DE CAMPO PARA QUANTIFICAR OS RESÍDUOS DE PODA URBANA

ESPÉCIE de árvore	%	Quantidade	Porte abaixo da fiação		Porte circunferencial (CAP)					
			Médio	Grande	Muito pequeno (0 a 20cm)	Pequeno (20 a 40cm)	Médio (40 a 80cm)	Grande (80 a 160cm)	Outros	
Espécie 1										
Espécie 2										
Espécie 3										
Espécie n										

Continua

Continuação

ESPÉCIE de árvore	%	Diâmetro da copa		Altura total		Idade aproximada				
		Médio (até 5m)	Grande (de 5 a 10m)	Médio (até 5m)	Grande (de 5 a 10m)	Menos que 2 anos	De 2 a 5 anos	De 5 a 10 anos	De 10 a 30 anos	Mais que 30 anos
Espécie 1										
Espécie 2										
Espécie 3										
Espécie n										

Continua

Continuação

ESPÉCIE de árvore	%	Retirada ou não				Ver porcentagem
		Fica	Retirar	Manejo	Substituir	
Espécie 1						
Espécie 2						
Espécie 3						
Espécie n						

FONTE: O autor (2016), adaptado de PUHL ET AL. (2014).

TABELA A2 - FICHA DE CAMPO COM DETALHAMENTO DE CADA INDIVÍDUO PARA QUANTIFICAR OS RESÍDUOS DE PODA URBANA

ESPÉCIE de árvore	%	Diâmetro da copa	Porte circunferencial (CAP)	Altura total	Porte abaixo da fiação	Idade aprox.	Quant. de galhos	Comprim. dos galhos	Diâm. dos galhos	Retirada ou não	
										Fica	Retirar
Indivíduo 1											
Indivíduo 2											
Indivíduo 3											
Indivíduo n											

FONTE: O autor (2016).

QUADRO A1 - DADOS DA TAXA DE DECRÉSCIMO DA UMIDADE NAS AMOSTRAS DE *Ligustrum lucidum* (LIGUSTRO)

LIGUSTRO				
TEMPO		GALHOS (%)		FOLHAS
dias	horas	LP1	LP2	(%)
0,0	0	100	100	100
2,5	59	89,5	89	
3,5	85	87,3	87	
8,5	203	76,8	76	78,4
9,5	227	75,1	74	73,3
10,5	251	73,3	71	69,3
15,5	373	70,6	69	62,1
16,5	395	70,3	69	61,1
17,8	427	69,5	68	58,3
22,5	539	67,6	66	47,0
23,5	565	66,8	65	44,2
25,8	620	66,1	65	42,9

FONTE: O autor (2015).

QUADRO A2 - DADOS DA TAXA DE DECRÉSCIMO DA UMIDADE NAS AMOSTRAS ENFARDADAS DE GALHOS COM CASCA, FOLHAS E SEMENTES DE *Ligustrum lucidum* (LIGUSTRO)

LIGUSTRO				
Tempo entre monitoramentos		Massa remanescente	Massa remanescente	Perda de umidade
dias	horas	Kg	%	%
0	0	107,8	100	0
1	24	103,9	96,38	3,62
8	192	93,7	86,92	13,08
13	308	77,8	72,17	27,83
21	501	73,9	68,55	31,45
24	574	70,8	65,68	34,32
34	810	66,4	61,6	38,4
37	881	67,6	62,71	37,29
43	1033	62,9	58,35	41,65
58	1387	61,8	57,33	42,67
64	1531	59,1	54,82	45,18
72	1728	59	54,73	45,27
80	1921	56,2	52,13	47,87
125	2994	53,8	49,91	50,09

FONTE: O autor (2015).

QUADRO A5 - DADOS DA TAXA DE DECRÉSCIMO DA UMIDADE NAS AMOSTRAS DE *Pinus sp.*
(PINUS)

PINUS										
TEMPO		GALHOS (%)					GALHOS	CASCA	FOLHAS (%)	
dias	horas	PP1	PS2	PP3	PP4	PP5	FINOS (%)	(%)	1	2
0,0	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100
0,7	17		98,8	98	98	98,5				
1,3	32	90,8								
2,0	49	85,6								
2,3	56		95,1	93,5	92,3	94,5				
3,3	78		93,5	91,4	89,6	92,6				
3,7	88									
3,8	92		92,2	89,7	87,4	90,9	98,1			
4,6	110									
5,2	124	65,9								
5,7	137		90,4	87,4	84,6	88,8				
6,8	163		89,5	86,3	83,1	87,9				
7,0	169	61,2								
8,1	195	60,5								
10,3	248			80,9						
11,1	266			80,1						
11,7	280									
11,7	281		84,3	78,4	75,4	82,4	85,1			
12,4	298							84,4	84,5	96,2
12,7	305		83,4	77,1	74,0	81,2	83,5			
13,0	313	58,3						81,8	81,5	95,3
13,7	329		82,4	75,8	72,5	80,0	82,2			
14,0	337	58,0						79,6	80,5	94,3
15,0	361	57,8								
15,8	378			74,1						
17,1	410							77,0	78,1	95,1
18,8	451		80,2	70,9	69,6	77,4	81,2			
19,7	473		79,9	70,6	69,2	76,9	81,0			
20,1	483	58,4						76,6	77,6	95,2
21,0	505	58,4						76,6	77,6	95,2
21,0	505		79,1		68,2	76,0	80,3			
21,8	522			68,9						
22,4	537	58,2						75,2	76,2	95,0
23,1	554									
23,3	559			68,6						
24,6	591									
24,8	595			67,6						
25,7	617		76,8	66,8	65,4	73,1	78,8			
26,1	627									
26,8	643		76,0	65,7			78,8			
27,0	649	57,8						72,8	73,8	94,6
28,1	675	57,6						71,3	72,3	94,1
29,1	698		74,9	65,1	63,3	70,5	78,5			
30,4	730	57,8						71,6	73,0	93,9

FONTE: O autor (2015).

QUADRO A6 - DADOS DA TAXA DE DECRÉSCIMO DA UMIDADE NAS AMOSTRAS DO FARDO DE *Cupressus sempervirens* (CIPRESTE)

CIPRESTE				
Tempo entre monitoramentos		Massa remanescente	Massa remanescente	Perda de umidade
dias	horas	Kg	%	%
0	0	50,3	100	0
1	24	48,4	96,22	3,78
8	192	46,7	92,84	7,16
13	308	39,4	78,33	21,67
21	501	37,4	74,35	25,65
24	574	37,1	73,76	26,24
34	810	32,3	64,21	35,79
37	881	35	69,58	30,42
43	1033	28,2	56,06	43,94
58	1387	27,1	53,88	46,12
64	1531	25,6	50,89	49,11
72	1728	26,3	52,29	47,71
80	1921	24,5	48,71	51,29
125	2994	24,6	48,91	51,09

FONTE: O autor (2015).

TABELA A3 - ANÁLISE DE VARIÂNCIA PARA MASSA SECA DE BIOMASSA EM t/ha

Fator de variação	G.L.	S.Q.	Q.M.	F calculado	<i>p</i> -valor
Espaçamento (E)	1	284,94	284,94	130,34	0,0001*
Dose (D)	1	36,7	36,70	16,79	0,0001*
Biomassa (B)	2	5225,52	2612,76	1195,20	0,0001*
E x D	1	17,38	17,38	7,95	0,007*
E x B	2	432,5	216,25	98,92	0,0001*
D x B	2	76,09	38,04	17,40	0,0001*
E x D x B	2	24,77	12,38	5,67	0,006*
Resíduos	48	104,93	2,19		
Total	59	6202,82			

FONTE: O autor (2015).

QUADRO A7 – RESULTADOS DOS CÁLCULOS DA ESTIMATIVA FUTURA DE BIOMASSA

Número do indivíduo	Galhos		Número do indivíduo	Galhos		Número do indivíduo	Galhos	
	Peso unitário (kg)	Peso total (kg)		Peso unitário (kg)	Peso total (kg)		Peso unitário (kg)	Peso total (kg)
<i>Ligustrum lucidum</i>			<i>Tipuana tipu</i>			<i>Lagerstroemia indica</i>		
1	42,1	280,9	1	19,2	102,1	1	11,5	383,0
2	38,3	229,8	2	23,0	306,4	2	7,7	255,3
3	46,0	214,5	3	23,0	122,6	3	11,5	306,4
4	19,2	255,3	4	30,6	204,3	4	7,7	204,3
5	38,3	306,4	5	57,5	38,3	5	3,8	102,1
6	23,0	107,2	6	30,6	81,7	6	11,5	383,0
7	23,0	214,5	7	30,6	183,9	7	11,5	459,6
8	23,0	168,5	8	23,0	76,6	8	15,3	510,7
9	26,8	107,2	9	15,3	30,6	9	15,3	612,8
10	38,3	306,4	10	19,2	76,6	10	11,5	383,0
n.	23,0	91,9	11	19,2	102,1	11	11,5	459,6
12	23,0	137,9	12	23,0	122,6	12	11,5	459,6
13	11,5	383,0	13	11,5	76,6		Subtotal	
14	19,2	19,2	14	15,3	61,3	<i>Bauhinia forficata</i>		
15	7,7	7,7	15	23,0	137,9			
16	7,7	306,4	16	30,6	183,9	1	11,5	153,2
17	11,5	612,8	17	34,5	137,9	2	11,5	153,2
18	11,5	1149,1	18	38,3	153,2	3	11,5	1149,1
19	30,6	183,9	19	38,3	102,1	4	11,5	306,4
20	11,5	30,6	20	30,6	183,9	5	11,5	306,4
21	15,3	40,9		Subtotal		6	11,5	306,4
22	15,3	817,1	<i>Schinus terebinthifolius</i>			7	19,2	2553,5
23	23,0	1225,7				8	15,3	1532,1
24	15,3	1021,4	1	30,6	245,1	9	11,5	38,3
25	19,2	1021,4	2	46,0	245,1	10	15,3	51,1
26	19,2	893,7	3	23,0	107,2	11	11,5	38,3
27	15,3	408,6	4	15,3	1021,4		Subtotal	
28	11,5	229,8		Subtotal				
29	11,5	612,8						
30	15,3	1021,4						
31	11,5	459,6						
32	11,5	383,0						
33	11,5	459,6						
34	15,3	1021,4						
35	23,0	76,6						
36	26,8	107,2						
37	23,0	46,0						
38	26,8	89,4						
39	23,0	76,6						
40	23,0	122,6						
42	38,3	229,8						
	Subtotal							

FONTE: O autor (2016).

APÊNDICE 2 FOTOGRAFIAS

FIGURA A1 - MEDIÇÃO DOS DIÂMETROS DOS GALHOS E TRONCOS PARA QUANTIFICAR A BIOMASSA EM CADA INDIVÍDUO



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A2 - MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DOS GALHOS E DA LARGURA DA COPA.



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A3 - PESAGEM DE AMOSTRAS APÓS O CORTE E APÓS A SECAGEM



FONTE: O autor (2016).

FIGURA A4 – DENSÍMETRO PARA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO CAVACO



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A5 - AMOSTRA DE FOLHAS E FLORES DE DIVERSAS ESPÉCIES DE ÁRVORES PARA SECAGEM TOTAL NA ESTUFA



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A6 – CALORÍMETRO UTILIZADO PARA AVALIAR O POTENCIAL CALORÍFICO DAS AMOSTRAS



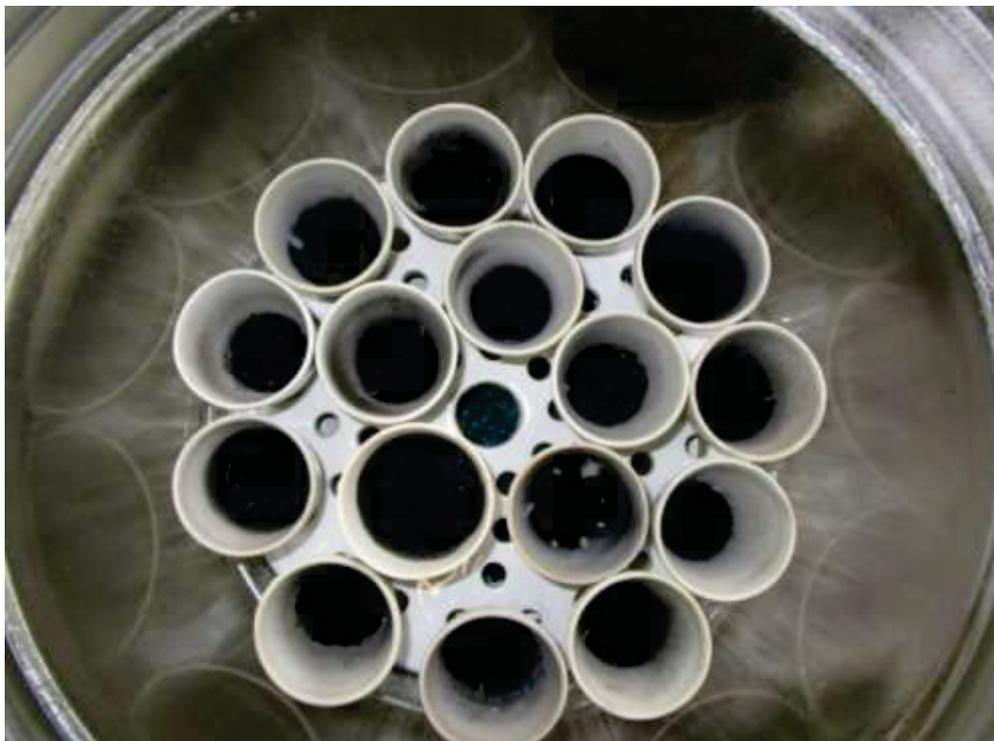
FONTE: O autor (2015).

FIGURA A7 – PESAGEM DE AMOSTRAS EM BALANÇA DE PRECISÃO



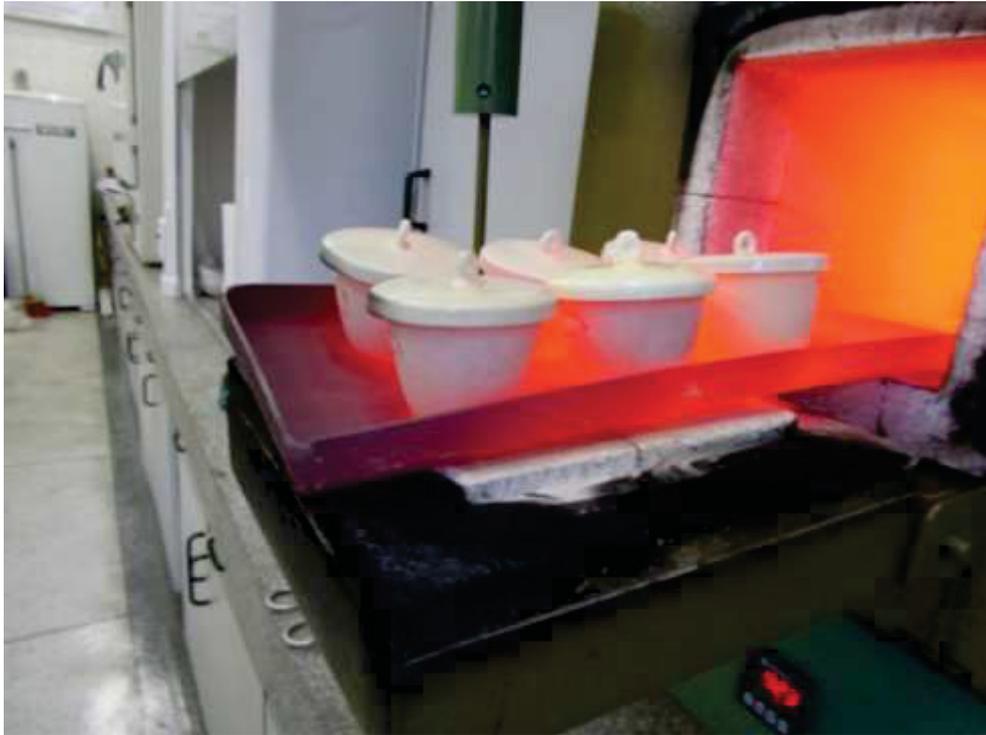
FONTE: O autor (2015).

FIGURA A8 – CARBONO FIXO DAS AMOSTRAS APÓS A QUEIMA NO FORNO



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A9 - AMOSTRAS APÓS QUEIMA NO FORNO PARA DETERMINAR O CARBONO FIXO



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A10 – CINZAS REMANESCENTES DAS AMOSTRAS APÓS A QUEIMA NO FORNO



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A11 – TORQUÍMETRO ACOPLADO À ELETROSSERRA PARA REALIZAR OS TESTES DE RESISTÊNCIA AO CORTE DAS AMOSTRAS



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A12 - LOCAL DE SECAGEM E PESAGEM DE GALHOS DE *Ligustrum lucidum*



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A13 - FARDOS DE *Ligustrum lucidum* APÓS O CORTE E PESAGEM



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A14 – TRITURADOR PARA TRANSFORMAR OS GALHOS E FOLHAS EM CAVACO



FONTE: O autor (2016).

FIGURA A15 - LEIRAS DE DEPÓSITO DE CAVACO E COLETA DE AMOSTRAS PARA ESTUDO



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A16 – RECIPIENTES COM CAVACO PARA SECAGEM NATURAL À SOMBRA



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A17 – COLETA DE AMOSTRAS DE CAVACO DA PARTE EXTERNA E INTERNA DA LEIRA PARA DETERMINAR O TEOR DE UMIDADE



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A18 – LEIRA DE CAVACO INDICANDO A CAMADA EXTERNA DA LEIRA EXPOSTA AO SOL, CHUVA E VENTOS, ÚMIDA, E SEU INTERIOR, SECO



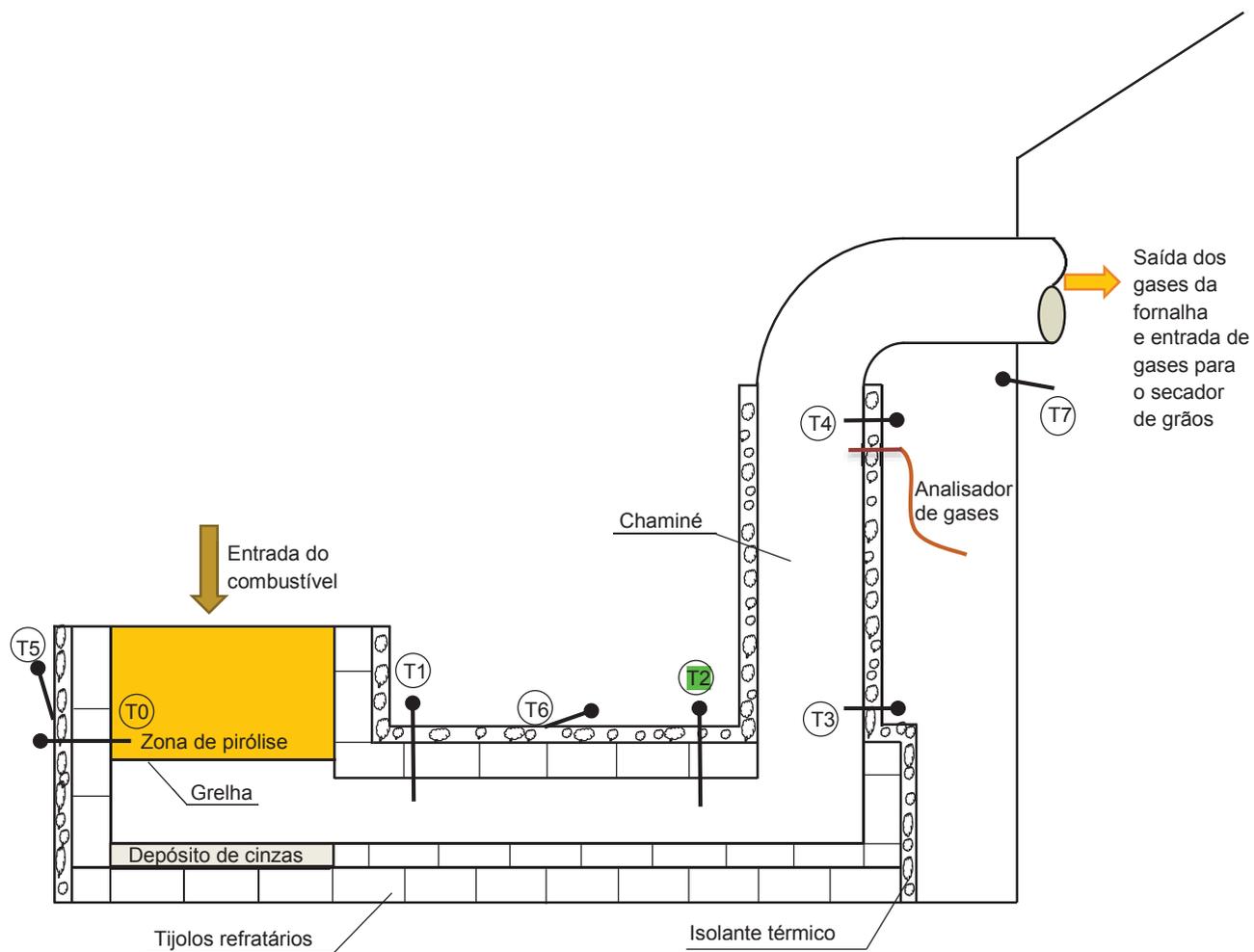
FONTE: O autor (2015).

FIGURA A19 – CAÇAMBAS PARA SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA DE CAVACOS PARA A FORNALHA



FONTE: O autor (2015).

FIGURA A20 - IDENTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS TERMOPARES NA FORNALHA



FONTE: O autor (2016).

FIGURA A21 – ANALISADOR DE GASES UTILIZADO NAS CORRIDAS DA FORNALHA



FONTE: O autor (2015).

APÊNDICE 3 - DIMENSIONAMENTO DA FORNALHA

Partindo de uma potência nominal estimada de 154 kW, um poder calorífico inferior médio da biomassa de 15.310 kJ/kg, de acordo com a TABELA 33, na Seção 4.3.1, a vazão mássica de lenha foi calculada pela equação (A3.1), e obteve um resultado de até 25 kg/h.

$$\dot{m}_{lenha} = P_n / PCI \text{ (kg/s)} \quad (A3.1)$$

Com a vazão mássica de lenha, utilizando uma taxa de combustão (N_c) de 110 kg/h.m², valor utilizado para combustão de lenha em grelha fixa de acordo com BAZZO (1995), foi calculada a área da grelha pela equação (A3.2), obtendo um resultado de 0,13 m².

$$A_g = \dot{m}_{lenha} / N_c \text{ (m}^2\text{)} \quad (A3.2)$$

Onde:

- A_g : área da superfície da grelha (m²);
- N_c : taxa de combustão (kg/h.m²);
- PCI: poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg).

As dimensões da zona de pirólise e da câmara de combustão foram adaptadas do trabalho experimento de Verhaart (1990), sobre uma fornalha a lenha de fluxo cocorrente. A FIGURA 27 na Seção 3.3 apresenta as dimensões da fornalha construída neste trabalho.

ANEXO 1 EQUAÇÕES DE CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DA FORNALHA

A eficiência média temporal da fornalha foi calculada pela equação (A4.1):

$$\eta = \frac{\bar{Q}_{util}}{\bar{Q}_{nominal}} \quad (A4.1)$$

Onde a energia nominal foi calculada pela equação (A4.2):

$$Q_{nominal} = \dot{m}_{biomassa} PCI_{biomassa} \quad (A4.2)$$

Onde:

- $\bar{m}_{biomassa}$: vazão mássica média da biomassa (kg/s);
- $PCI_{biomassa}$: poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg), calculado pela equação (A4.3), recomendada por Jenkins (1990):

$$PCI = \left(\frac{1}{1+W_s} \right) (PCS - h_{lv}(W_s + 9h)) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (A4.3)$$

Onde:

- $PCS_{biomassa}$: poder calorífico superior do combustível (kJ/kg);
- h_{lv} : calor latente de vaporização da água, 2440 kJ/kg a 25 °C;
- h : fração mássica de hidrogênio no combustível em base seca;
- W_s : umidade do combustível em base seca.

A energia útil foi calculada pela equação (A4.4):

$$\bar{Q}_{util} = \bar{m}_{gas\ comb} \bar{\Delta h}_{gas\ comb} \quad (A4.4)$$

Onde:

- $\bar{\Delta h}_{gas\ comb}$: variação de entalpia média dos gases de combustão à temperatura da saída da chaminé (kJ/kg);
- $\bar{m}_{gas\ comb}$: vazão mássica média dos gases de combustão na saída da chaminé (kg/s), calculada pela equação (A4.5):

$$\bar{m}_{gas\ comb} = m_{gas\ comb} \bar{m}_{lenha} \text{ (kg/s)} \quad (\text{A4.5})$$

Onde:

- $m_{gas\ comb}$: razão de massa dos produtos da combustão ($kg_{gas\ comb}/kg_{comb}$).

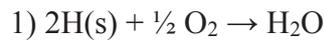
A razão de massa dos produtos da combustão ($m_{gas\ comb}$) foi calculada segundo a relação estequiométrica conforme a TABELA A4:

TABELA A4 - CÁLCULO ESTEQUIOMÉTRICO DOS GASES DA COMBUSTÃO

COMPOSIÇÃO DO AR	O ₂	N ₂
Volumétrica	0,21	0,79
Mássica	0,233	0,767

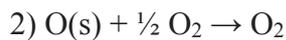
FONTE: JENKINS (1990).

4A.1 REAÇÕES DA COMBUSTÃO



O consumo de ar para esta reação será dada pela equação (A4.6):

$$\frac{0,5 \text{ kmol O}_2}{2 \text{ kmol H}} \frac{32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \text{O}_2}{1,008 \frac{\text{kg H}}{\text{kmol H}}} \frac{1 \text{ kg ar}}{0,233 \text{ kg O}_2} = 34,062 \frac{\text{kg ar}}{\text{kg H}} \quad (\text{A4.6})$$



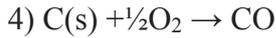
O consumo evitado de ar em decorrência da presença de oxigênio no combustível será dada pela equação (A4.7):

$$\frac{0,5 \text{ kmol O}_2}{0,5 \text{ kmol O}_2} \frac{32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \text{O}_2}{32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \text{O}_2} \frac{1 \text{ kg ar}}{0,233 \text{ kg O}_2} = 4,292 \frac{\text{kg ar}}{\text{kg O}} \quad (\text{A4.7})$$



O consumo de ar para esta reação será dada pela equação (A4.8):

$$\frac{1 \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol C}} \frac{32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \text{O}_2}{12 \frac{\text{kg C}}{\text{kmol C}}} \frac{1 \text{ kg ar}}{0,233 \text{ kg O}_2} = 11,445 \frac{\text{kg ar}}{\text{kg Cco}_2} \quad (\text{A4.8})$$



O consumo de ar para esta reação será dada pela equação (A4.9):

$$\frac{0,5 \text{ kmol O}_2}{1 \text{ kmol C}} \frac{32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} \text{O}_2}{12 \frac{\text{kg C}}{\text{kmol C}}} \frac{1 \text{ kg ar}}{0,233 \text{ kg O}_2} = 5,722 \frac{\text{kg ar}}{\text{kg C}_{CO}} \quad (\text{A4.9})$$

Define-se o α como sendo a razão entre o número de moles de CO e o número de moles de CO₂ e, β como a razão entre a massa do carbono que se transforma em fuligem e a quantidade total de carbono no combustível conforme as equações (A4.10) e (A4.11) (BORGES, 1994).

$$\alpha \equiv \frac{n_{C_{CO}}}{n_{C_{CO_2}}} \quad (\text{A4.10})$$

$$\beta \equiv \frac{m_{C_{ful}}}{m_{C_{total}}} \quad (\text{A4.11})$$

A partir de α , pode-se calcular a razão entre a massa de carbono que reage produzindo CO ($m_{C_{CO}}$) e a massa de carbono que reage produzindo CO₂ ($m_{C_{CO_2}}$) conforme a equação (A4.12):

$$\frac{m_{C_{CO}}}{m_{C_{CO_2}}} = \alpha \left[\frac{\text{kmol CO}}{\text{kmol CO}_2} \right] \left[\frac{12 \text{ kg C}_{CO}}{\text{kmol CO}} \middle/ \frac{12 \text{ kg C}_{CO_2}}{\text{kmol CO}_2} \right] = \alpha \left[\frac{\text{kg C}_{CO}}{\text{kg C}_{CO_2}} \right] \quad (\text{A4.12})$$

Pode-se deduzir que conforme a equação (A4.13):

$$m_{C_{CO_2}} = \frac{m_{C_{CO}}}{\alpha} \quad (\text{A4.13})$$

Partindo da massa de carbono total ($m_{C_{total}}$), pode-se escrever pela equação (A4.14), de onde se construiu as equações (A4.15), (A4.16), (A4.17) e (A4.18):

$$m_{C_{total}} = m_{C_{CO}} + m_{C_{CO_2}} + m_{C_{ful}} \quad (\text{A4.14})$$

Onde:

- $m_{C_{ful}}$: massa de carbono que reage produzindo fuligem.

$$1 = \frac{m_{cCO}}{m_{c_{total}}} + \frac{m_{cCO}}{\alpha m_{c_{total}}} + \frac{m_{c_{ful}}}{m_{c_{total}}} \quad (\text{A4.15})$$

$$1 = \frac{m_{cCO}}{m_{c_{total}}} \left(1 + \frac{1}{\alpha}\right) + \beta \quad (\text{A4.16})$$

Portanto,

$$\frac{m_{cCO}}{m_{c_{total}}} = \left(\frac{1-\beta}{1+\alpha}\right) \alpha \quad (\text{A4.17})$$

$$\frac{m_{cCO_2}}{m_{c_{total}}} = \left(\frac{1-\beta}{1+\alpha}\right) \quad (\text{A4.18})$$

a) massa de ar teórica necessária para a combustão ($m_{ar,t}$)

A massa de ar teoricamente necessária para a combustão foi calculada a partir da composição do combustível e dos valores numéricos das relações estequiométricas apresentadas anteriormente, como mostra a equação (A4.19):

$$m_{ar,t} = \left[5,722 \frac{(1-\beta)\alpha}{1+\alpha} + 11,445 \frac{1-\beta}{1+\alpha}\right] \mathbf{C} + 34,062 \mathbf{H} - 4,292 \mathbf{O} \left[\frac{kg \text{ ar}}{kg \text{ comb}}\right] \quad (\text{A4.19})$$

Onde:

- C, H e O: concentrações em base mássica do carbono, hidrogênio e oxigênio presentes no combustível, respectivamente.

Como na combustão teórica não há formação de CO nem de fuligem, para o cálculo da massa de ar teórica as razões α e β assumem o valor zero.

Com o valor da massa de ar teórica calculado, foi necessário saber a concentração de cada gás produto da combustão. Para isso será apresentado a seguir o balanço estequiométrico da combustão do cavaco.

Balanço estequiométrico da reação de combustão da biomassa

Assumindo que a combustão da biomassa lignino-celulósica leva somente a produtos gasosos, excluindo gases residuais de combustão incompleta, e assumindo também que as condições de inflamabilidade dos gases da pirólise são asseguradas e não há carbono flutuante passando através do sistema, pode-se escrever a estequiometria da combustão da biomassa, com

inclusão da umidade do combustível, como na equação (A4.20), apresentado uma forma simplificada da equação dada por Jenkins *et al.* (1998).



As equações de conservação das espécies foram escritas pelas equações (A4.21), (A4.22) e (A4.23):

- conservação do carbono

$$a_1 + a_2 = 1 \quad (A4.21)$$

- conservação do hidrogênio

$$b_1 + b_2 = y/2 + z \quad (A4.22)$$

- conservação do oxigênio

$$2a_0 + a_1 + 2a_2 + b_2 = 2w + x + z \quad (A4.23)$$

Da equação (A4.22) pode-se deduzir b_2 , dado pela equação (A4.24):

$$b_2 = y/2 + z - b_1 \quad (A4.24)$$

Combinando as equações (A4.23) e (A4.24), b_2 e z foram eliminados, que leva à equação (A4.25):

$$b_1 - 2a_0 - a_1 - 2a_2 + 2w = y/2 - x \quad (A4.25)$$

Os coeficientes estequiométricos a_0 , a_1 , a_2 , b_1 e w foram relacionados como a seguir com as frações volumétricas dos respectivos gases dados pela equação (A4.26):

$$[O_2] = \frac{a_0}{\Sigma} \quad [CO] = \frac{a_1}{\Sigma}, \quad [CO_2] = \frac{a_2}{\Sigma}, \quad [H_2] = \frac{b_1}{\Sigma}, \quad [N_2] = \frac{3,76w}{\Sigma} \quad (A4.26)$$

Onde gerou a equação (A4.27):

$$-\Sigma = a_0 + a_1 + a_2 + b_1 + 3,76w \quad (\text{A4.27})$$

Assim se deduziu as equações (A4.28) e (A4.29):

$$[CO] + [CO_2] = \frac{1}{\Sigma} \quad (\text{A4.28})$$

$$[H_2] - [CO] - 2[CO_2] - 2[O_2] + \frac{2}{3,76}[N_2] = \frac{y-2x}{2\Sigma} \quad (\text{A4.29})$$

Da equação (A4.28) se deduziu a equação (A4.30):

$$\Sigma = \frac{1}{[CO] + [CO_2]} \quad (\text{A4.30})$$

Eliminando o Σ e substituindo o $[N_2]$ na equação (A4.29) gerou a equação (A4.31):

$$[N_2] = 1 - [O_2] - [CO] - [CO_2] - [H_2] \quad (\text{A4.31})$$

Assim, obtém-se a equação estequiométrica da combustão da biomassa lignocelulósica levando em consideração as frações volumétricas dos gases obtidos, equação (A4.32):

$$4,76[O_2] + \left(2,88 + 3,76 \frac{y-2x}{4}\right)[CO] + \left(4,76 + 3,76 \frac{y-2x}{4}\right)[CO_2] - 0,88[H_2] = 1 \quad (\text{A4.32})$$

Considerando que as espécies gasosas CO, H₂, CO₂ e H₂O só existem localmente em altas temperaturas sem O₂, o seguinte equilíbrio químico pode ser levando em conta, conforme a equação (A4.33):



A constante de equilíbrio se mantém constante no valor 2 quando a temperatura está abaixo de 850 °C (MARTIN, 2007), conforme a equação (A4.34).

$$\frac{[CO][H_2O]}{[CO_2][H_2]} \approx 2 \quad (A4.34)$$

Considerando os coeficientes a_1 e b_1 muito pequenos em consideração a a_2 e b_2 , podem ser feitas as seguintes aproximações das equações (A4.21) e (A4.22), gerando a equação (A4.35):

$$a_2 \cong 1 \text{ e } b_2 \cong y/2 + z \quad (A4.35)$$

O que leva às equações (A4.36) e (A4.37):

$$\frac{[CO][H_2O]}{[CO_2][H_2]} = \frac{a_1 b_2}{a_2 b_1} \cong \left(\frac{y}{2} + z\right) \frac{a_1}{b_1} = \left(\frac{y}{2} + z\right) \frac{[CO]}{[H_2]} \cong 2 \quad (A4.36)$$

$$[H_2] = \frac{y+2z}{4} [CO] \quad (A4.37)$$

Fazendo a substituição do $[H_2]$, a estequiometria da reação da combustão da biomassa fica uma relação entre os três parâmetros independentes $[O_2]$, $[CO_2]$ e $[CO]$, conforme a equação (A4.38):

$$4,76[O_2] + \left(2,88 + 3,76 \frac{y-2x}{4} - 0,88 \frac{y+2z}{4}\right) [CO] + (4,76 + 3,76 \frac{y-2x}{4}) [CO_2] = 1 \quad (A4.38)$$

O analisador de gases mede diretamente as concentrações volumétricas de O_2 e CO e a partir da equação (A4.38) pode-se calcular a concentração volumétrica de CO_2 .

ii) excesso de ar (E)

A relação entre o coeficiente de ar w da estequiometria real da combustão e o coeficiente de ar $\left(1 + \frac{y-2x}{4}\right)$ da estequiometria teórica da combustão é o excesso de ar, definido com E conforme a equação (A4.39).

$$E \equiv \frac{w}{\left(1 + \frac{y-2x}{4}\right)} \quad (A4.39)$$

Da mesma maneira, um coeficiente de oxidação parcial é definido como k conforme a equação (A4.40).

$$k \equiv \frac{[CO]}{[CO]+[CO_2]} = \frac{a_1}{a_1+a_2} \quad (A4.40)$$

Assim, pode-se recalculer os coeficientes estequiométricos.

Os valores de a_1 e a_2 foram definidos a partir da equação (A4.40) gerando a equação (A4.41):

$$a_2 = 1 - a_1 \therefore a_2 = 1 - k \quad (A4.41)$$

Da equação (A4.36) definiu-se b_1 , conforme a equação (A4.42).

$$\frac{y}{2} + z \left(\frac{a_1}{b_1} \right) = 2 \therefore b_1 = \frac{y}{4} + \frac{z}{2} a_1 \therefore b_1 = \left(\frac{y+2z}{4} \right) k \quad (A4.42)$$

Da equação (A4.25) definiu-se a_0 , conforme a equação (A4.43).

$$a_0 = \frac{k}{2} \left(\frac{y+2z}{4} + 1 \right) + (\lambda - 1) \left(1 + \frac{y-2x}{4} \right) \quad (A4.43)$$

Da equação (A4.21) define-se b_2 , conforme a equação (A4.44):

$$b_2 = \left(1 - \frac{k}{2} \right) \left(\frac{y+2z}{2} \right) \quad (A4.44)$$

Assim, pode-se reescrever a equação geral (A4.45):

$$\begin{aligned} & CH_yO_x + zH_2O + \lambda \left(1 + \frac{y-2x}{4} \right) (O_2 + 3,76 N_2) \rightarrow \\ \rightarrow & kCO + (1-k)CO_2 + k \left(\frac{y+2z}{4} \right) H_2 + \left[(E-1) \left(\frac{y+2x}{4} \right) + \frac{k}{2} \left(1 + \frac{y+2z}{4} \right) \right] O_2 + \\ & + \left(1 - \frac{k}{2} \right) \left(\frac{y+2z}{2} \right) H_2O + 3,76 \lambda \left(1 - \frac{k}{2} \right) N_2 \end{aligned} \quad (A4.45)$$

Da equação (A4.45) pode-se definir a seguinte equação (A4.46):

$$\frac{[O_2]}{[CO_2]+[CO]} = (E-1) \left(1 + \frac{y-2x}{4} \right) + \frac{k}{2} \left(1 + \frac{y+2z}{4} \right) \quad (A4.46)$$

A equação (A4.46) pode ser reescrita substituindo o coeficiente k , conforme a equação (A4.47):

$$E - 1 = \frac{[O_2] - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{y+2z}{4}\right) [CO]}{\left(1 + \frac{y-2x}{4}\right) ([CO_2] + [CO])} \quad (A4.47)$$

iii) massa de ar real utilizada na combustão ($m_{ar,r}$)

A massa de ar realmente utilizada na combustão foi calculada pela equação (A4.47), gerou a equação (A4.48).

$$m_{ar,x} = m_{ar,t} E \quad [kg_{ar}/kg_{comb}] \quad (A4.48)$$

iv) massa de água nos produtos da combustão (m_{H_2O})

A massa de água contida nos gases da combustão será a soma da massa de água contida no combustível, água q se forma como produto da combustão do hidrogênio, e a massa de água contida na umidade do ar conforme a equação (A4.49).

$$m_{H_2O} = w_u + 9H(1 - w_u) + m_{ar,x} UA \quad [kg_{H_2O}/kg_{comb}] \quad (A4.49)$$

Onde:

- 2 kg de H produzem 18 kg de H₂O → 1 kg de H produz 9 kg de H₂O;
- w_u : umidade do combustível;
- UA: umidade absoluta do ar em $kg_{vapor\ água}/kg_{ar\ seco}$, calculada pela equação (A4.50):

$$U.A = 0,622 P_v/P_a \quad (\text{e.g. VAN WYLEN, 1998}) \quad (A4.50)$$

Onde:

- P_v : pressão do vapor saturado em kPa, calculado a partir da temperatura ambiente e umidade relativa;
- P_a : pressão parcial do ar, em kPa.

v) Massa de N₂ nos produtos da combustão (m_{N_2})

Supondo que não há quantidade significativa de N_2 no combustível e o nitrogênio molecular presente no ar não reage, a massa de N_2 nos produtos da combustão foi calculada pela equação (A4.51):

$$m_{N_2} = 0,767 m_{ar,x} [kg_{N_2}/kg_{comb}] \quad (A4.51)$$

vi) Massa de CO_2 nos produtos da combustão (m_{CO_2})

A concentração volumétrica CO_2 nos produtos da combustão foi calculada em função da concentração volumétrica de O_2 e CO medidos diretamente pelo analisador de gases, a partir da equação (A4.38). E sua concentração mássica foi calculada pela equação (A4.52)

$$m_{CO_2} = \% \left[\frac{m_{CO_2}^3}{m_{gas\ comb}^3} \right] V_{gas\ comb} \left[\frac{m_{gas\ comb}^3}{kg_{comb}} \right] \rho_{CO_2} \left[\frac{kg_{CO_2}}{m_{CO_2}^3} \right] \quad kg_{CO_2}/kg_{comb} \quad (A4.52)$$

Onde:

- ρ_{CO_2} : densidade do CO_2 na temperatura dos gases em $\left[\frac{kg_{CO_2}}{m_{CO_2}^3} \right]$

vii) Massa de O_2 nos produtos da combustão (m_{O_2})

A concentração de O_2 nos gases de combustão foi medida diretamente pelo analisador de gases em porcentagem (%) (base volumétrica). Assim, a massa de O_2 nos produtos da combustão foi calculada pela equação (A4.53):

$$m_{O_2} = \% \left[\frac{m_{O_2}^3}{m_{gas\ comb}^3} \right] V_{gas\ comb} \left[\frac{m_{gas\ comb}^3}{kg_{comb}} \right] \rho_{O_2} \left[\frac{kg_{O_2}}{m_{O_2}^3} \right] \quad \left[\frac{kg_{O_2}}{kg_{comb}} \right] \quad (A4.53)$$

Onde:

- ρ_{O_2} : densidade do O_2 na temperatura dos gases em $\left[\frac{kg_{O_2}}{m_{O_2}^3} \right]$

viii) Massa de CO nos produtos da combustão

Assim como o O_2 , a concentração de CO nos gases de combustão foi medida diretamente pelo analisador de gases em porcentagem (%) (base volumétrica). Assim, a massa de CO nos produtos da combustão foi calculada pela equação (A4.54):

$$m_{CO} = \frac{ppm}{1000} = \% \left[\frac{m_{CO}^3}{m_{gas\ comb}^3} \right] V_{gas\ comb} \left[\frac{m_{gas\ comb}^3}{kg_{comb}} \right] \rho_{CO} \left[\frac{kg_{CO}}{m_{CO}^3} \right] \quad kg_{CO}/kg_{comb} \quad (A4.54)$$

O volume total dos gases de combustão ($V_{gas\ comb}$) foi definido como a variável X e foi calculado resolvendo o seguinte sistema de equações (A4.55), (A4.56), (A4.57) e (A4.58):

$$V_{gas\ comb} = X \left[\frac{m_{gas\ comb}^3}{kg_{comb}} \right] \quad (A4.55)$$

$$\begin{cases} [CO_2]X = a \left[\frac{m_{CO_2}^3}{kg_{comb}} \right] \\ [O_2]X = b \left[\frac{m_{O_2}^3}{kg_{comb}} \right] \\ [CO]X = c \left[\frac{m_{CO}^3}{kg_{comb}} \right] \end{cases} \quad (A4.56)$$

$$V_{H_2O} \left[\frac{m_{H_2O}^3}{kg_{comb}} \right] + V_{N_2} \left[\frac{m_{N_2}^3}{kg_{comb}} \right] + a + b + c = X \quad (A4.57)$$

Assim,

$$X = \frac{V_{H_2O} + V_{N_2}}{1 - ([O_2] + [CO] + [CO_2])} \quad (A4.58)$$

Com o valor de X , pode-se calcular a concentração mássica de O_2 , CO_2 e CO . E a massa total dos produtos da combustão foi dada pela equação (A4.59):

$$m_{gas\ comb} = m_{H_2O} + m_{N_2} + m_{O_2} + m_{CO_2} + m_{CO} \left(\frac{kg_{gas\ comb}}{kg_{comb}} \right) \quad (A4.59)$$

ix) Variação de entalpia dos gases de combustão

A entalpia ($\Delta h_{gás_comb}$) dos produtos da combustão foi calculada a partir das equações (A4.60) e (A4.61):

$$\Delta h = \bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0 \quad (A4.60)$$

$$\Delta h_{gas\ comb} = \frac{\sum_1^n \Delta h_i m_i}{m_{gas\ comb}} \quad (A4.61)$$

Onde:

- \bar{h} : entalpia específica do gás na temperatura de operação;
- $\bar{h}_{f,298}^0$: entalpia de formação (a 25 °C e pressão de 0,1 MPa);
- m_i : massa do gás i ($kg_{gas\ i} / kg_{comb}$);
- $m_{gas\ comb}$: massa total dos gases de combustão ($kg_{gas\ comb} / kg_{comb}$).

O valor de Δh foi consultado do QUADRO A8:

QUADRO A8 – VARIAÇÃO DE ENTALPIA DOS GASES DE COMBUSTÃO

T (K)	Δh (kJ/kg)				
	N ₂	O ₂	H ₂ O	CO ₂	CO
298	0	0	0	0	0
300	1,927676436	1,687553	3,441576464	1,5678255	1,9278829
400	106,0579017	94,59671	191,5070774	90,956601	106,28347
500	211,0091743	190,1934	384,2353594	188,70711	211,781507
600	317,4954485	288,9153	582,7921177	293,25153	319,243127
700	426,1235855	390,606	787,6769359	403,40832	429,168154
800	537,1077714	494,8905	999,2783791	518,20041	541,735095
900	650,5194017	601,3000	1217,707466	636,9007	656,801142
1000	766,1799879	709,4909	1443,241743	758,85026	774,223492
1100	883,8753436	819,1506	1675,825701	883,54919	893,645127
1200	1003,426980	930,0603	1915,40383	1010,5203	1014,88754
1300	1124,585014	1042,064	2161,587566	1139,4683	1137,70082
1400	1247,135259	1154,974	2414,154871	1270,0523	1261,79936

FONTE: VAN WYLEN (1998).

4.3 Equações do balanço de energia

4a) Q_{ar}

A energia fornecida pelo ar primário foi dada pela equação (A4.62).

$$\dot{Q}_{ar\ primario} = \bar{m}_{ar} \bar{h}_{ar} \text{ (kW)} \quad (\text{A4.62})$$

Onde:

- \bar{h}_{ar} : entalpia média do ar à temperatura ambiente (kJ/kg);
- \bar{m}_{ar} : vazão mássica média do ar real da combustão (kg/s), calculada pela equação (A4.63).

$$\bar{m}_{ar} = \bar{m}_{ar,r} \dot{m}_{lenha} \quad (A4.63)$$

Onde:

- \dot{m}_{lenha} : vazão mássica de lenha (kg/s);
- $\bar{m}_{ar,r}$: massa de ar real média da combustão (kg_{ar}/kg_{comb}), já calculada pela equação (A4.48), anteriormente citada.

4b) Q_{lenha}

A energia fornecida pela lenha é a energia nominal ($Q_{nominal}$) calculada pela equação (A4.2), anteriormente citada.

4c) Q_{gas_comb}

A energia liberada pelos gases de combustão é a energia útil (Q_{util}), também já calculada anteriormente conforme a equação (A4.4).

4d) Q_{cinzas}

O calor perdido pelas cinzas foi calculado pela equação (A4.64).

$$\dot{Q}_{cinzas} = \bar{m}_{cinzas} h_{cinzas} \text{ (kJ/s)} \quad (A4.64)$$

Onde:

- \bar{m}_{cinzas} : vazão mássica média de cinzas (kg/s), calculada pela equação (A4.65);
- h_{cinzas} : entalpia das cinzas na temperatura de operação (kJ/kg), calculada pela equação (A4.66).

$$\bar{m}_{cinzas} = \frac{m_{cinzas\ total}}{\text{tempo\ corrida}} \text{ (kg/s)} \quad (A4.65)$$

$$h_{cinzas} = c_{p\ cinzas} (T_{cinzas} - T_{amb}) \text{ (kJ/kg)} \quad (A4.66)$$

Onde:

- tempo corrida: tempo total da corrida (s);
- $c_{p\ cinzas}$: calor específico das cinzas à temperatura de operação (kJ/kg.K) (BAZZO, 1995);

- T_{cinzas} : temperatura média das cinzas durante o período em regime (K);
- T_{amb} : temperatura ambiente (K).

4e) $Q_{carvão}$

A energia perdida pelo carvão que passou direto pela grelha (carbono não queimado) foi dado pela equação (A4.67).

$$Q_{carvão} = \bar{m}_{carvão} h_{carvão} \text{ (kW)} \quad (\text{A4.67})$$

Onde:

- $\bar{m}_{carvão}$: vazão mássica média de carvão (kg/s), dado pela equação (A4.68);
- $h_{carvão}$: entalpia do carvão na temperatura de operação (kJ/kg), dado pela equação (A4.69).

$$\bar{m}_{carvão} = \frac{m_{carvão}}{\text{tempo corrida}} \text{ (kW)} \quad (\text{A4.68})$$

Onde:

- $m_{carvão}$: massa de carvão (kg carvão/kg combustível);
- tempo corrida: tempo total da corrida (s).

$$h_{carvão} = c_{p_{carvão}} (T_{carvão} - T_{amb}) \quad (\text{A4.69})$$

Onde:

- $c_{p_{carvão}}$: calor específico do carvão à temperatura de operação (kJ/kg/K) (BAZZO, 1995);
- $T_{carvão}$: temperatura do carvão (estimada pela temperatura da zona de pirólise).

4f) $Q_{paredes}$

O cálculo da perda de energia pelas paredes inclui a zona de pirólise, a câmara de combustão e o duto da chaminé.

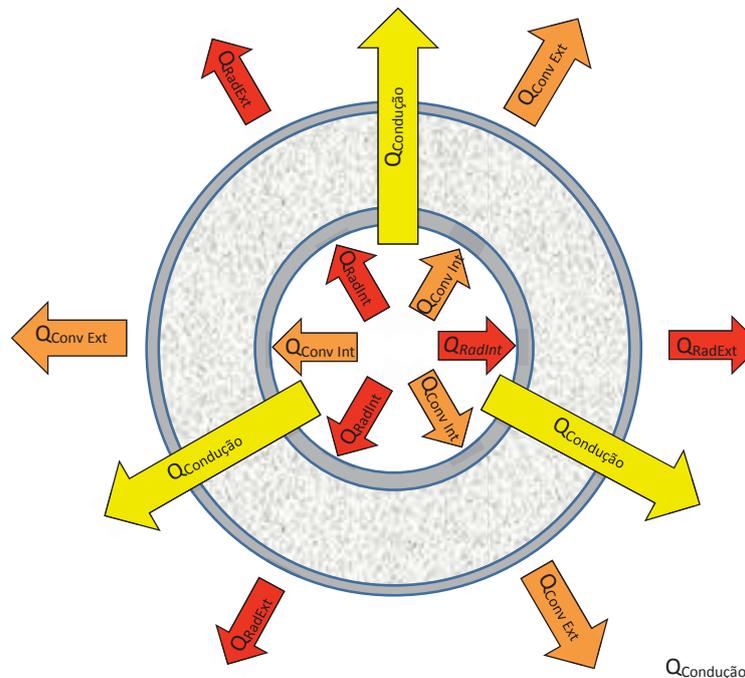
Os processos de transferência de calor que ocorrem nas paredes da fornalha são condução e convecção atuando em série; de radiação e convecção em paralelo, na superfície

interna da fornalha, isto é, do gás para as paredes e da superfície externa da fornalha para o ar ambiente.

Primeiramente, será apresentado o cálculo das perdas de energia radiante das superfícies interna e externa da fornalha. Para a superfície interna, o fluxo de calor radiante será calculado separadamente para cada parte da fornalha (câmara de combustão, zona de pirólise e chaminé), para a superfície externa, o fluxo de calor radiante será calculado englobando toda a fornalha como uma só unidade. Em seguida, será apresentado o cálculo da perda de energia por convecção e condução em série, analisando separadamente as partes componentes da fornalha.

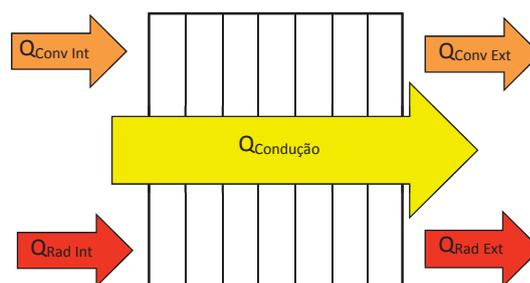
As FIGURAS A22 e A23 apresentam um desenho esquemático dos fluxos de calor que atuam na fornalha.

FIGURA A22 – FLUXO DE CALOR NA CHAMINÉ (VISTA SUPERIOR)



FONTE: O autor (2016), adaptado de KLAUTAU (2008).

FIGURA A23 – FLUXO DE CALOR NAS PAREDES DA FORNALHA (VISTA SUPERIOR)



FONTE: O autor (2016) adaptado de KLAUTAU (2008).

4.f.1) Radiação

i) Radiação interna

O fluxo de calor radiante dos gases para a parede interna da fornalha foi calculado separadamente em cada parte componente da fornalha, de acordo com as equações (A4.70), (A4.71) e (A4.72).

Câmara de combustão

$$Q_{rad\ int} = \varepsilon\sigma A_s F(T_g^4 - T_s^4) \quad (A4.70)$$

Onde:

- ε : emissividade dos gases na câmara de combustão;
- σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);
- A_s : área da superfície (m^2);
- T_g : temperatura dos gases no interior da fornalha (K);
- T_s : temperatura da parede interna da câmara de combustão (K);
- F: fator de forma.

O fator de forma para superfícies fechadas foi igual a 1 (INCROPERA, 2003).

Zona de Pirólise

$$Q_{rad\ int} = \varepsilon\sigma A_s F(T_g^4 - T_s^4) \quad (A4.71)$$

Onde:

- ε : emissividade da chama;
- σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);
- A_s : área da superfície (m^2);
- T_g : temperatura dos gases no interior da fornalha (K);
- T_s : temperatura da parede interna da zona de pirólise (K);
- F: fator de forma (1) (INCROPERA, 2003).

Chaminé

$$Q_{rad\ int} = \varepsilon\sigma A_s F (T_g^4 - T_s^4) \quad (A4.72)$$

Onde:

- ε : emissividade dos gases na chaminé;
- σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);
- A_s : área da superfície (m^2);
- T_g : temperatura dos gases no interior da chaminé (K);
- T_s : temperatura da superfície interna da chaminé (K);
- F : Fator de forma (1) (INCROPERA, 2003).

ii) Radiação externa

O fluxo de calor radiante de superfície externa da fornalha para o ambiente foi dada pela equação (A4.73).

$$Q_{rad\ int} = \varepsilon\sigma A_s F (T_g^4 - T_{viz}^4) \quad (A4.73)$$

Onde:

- ε : emissividade da superfície (adimensional) – 0,07 (INCROPERA, 2003);
- σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);
- A_s : área da superfície (m^2);
- T_s : temperatura da superfície externa da fornalha (K);
- T_{viz} : temperatura da vizinhança (K).

F: Fator de forma

Nesse caso, o fator de forma para o conjunto da zona de pirólise e da câmara de combustão foi calculado pela equação (A4.74) (INCROPERA, 2003).

$$F = \frac{1 + \left(\frac{L}{C}\right) - \left[1 + \left(\frac{L}{C}\right)^2\right]^{1/2}}{2} \quad (A4.74)$$

Onde:

- L e C são respectivamente a largura e o comprimento da fornalha (m).

Para a chaminé, foi dada pela equação (A4.75) (INCPROPERA, 2003).

$$F = \frac{2\pi L}{\ln(4L/D)} \quad (\text{A4.75})$$

Onde:

- L e D são respectivamente o comprimento e o diâmetro da chaminé.

4f.2) Convecção e condução

A convecção dos gases ocorre do interior da fornalha para a parede interna e da superfície externa para o ar ambiente. A condução ocorre entre os demais componentes e entre as paredes da fornalha.

Os fluxos de calor por condução e convecção atuam em série nas paredes da fornalha e serão calculados separadamente em cada parte, devido às camadas das paredes não serem as mesmas ao longo do corpo da fornalha.

Câmara de combustão

Paredes laterais

A FIGURA A24 apresenta um esquema do fluxo de calor que atravessa as paredes laterais da câmara de combustão.

Como as resistências condutiva e convectiva encontram-se em série, puderam ser somadas, e a resistência térmica total foi dada pela equação (A4.76).

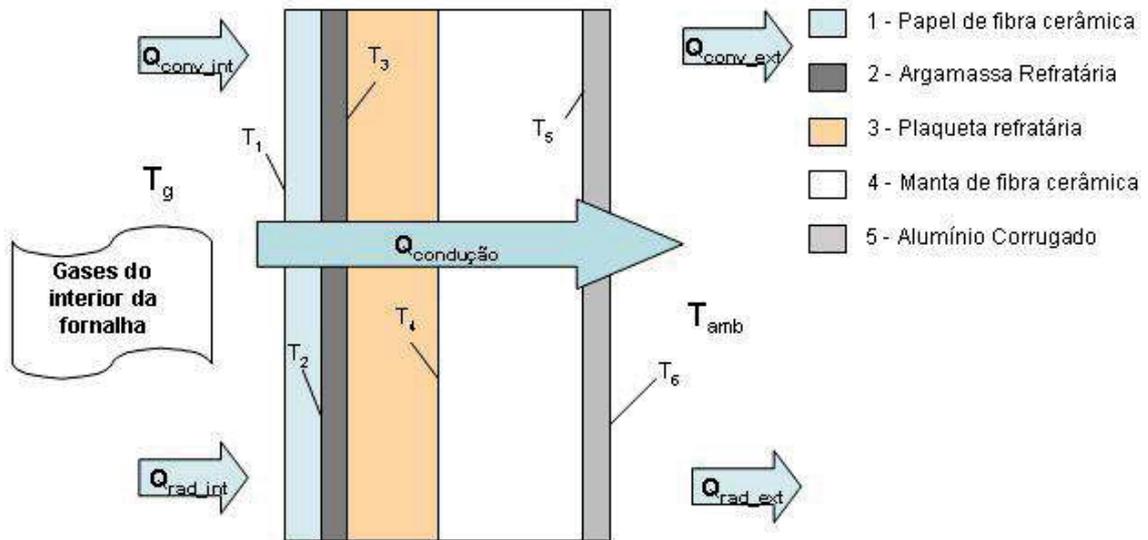
$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_s} + \frac{1}{h_e A_s} + \frac{L_1}{k_1 A_s} + \frac{L_2}{k_2 A_s} + \frac{L_3}{k_3 A_s} + \frac{L_4}{k_4 A_s} + \frac{L_5}{k_5 A_s} + R_{cont_{56}} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{k/W}) \quad (\text{A4.76})$$

Onde:

- L_i : espessura do componente i (m);
- A_s : área da superfície da parede lateral da câmara de combustão (m^2);
- k_i : condutividade térmica do componente i (W/m.K);
- h_i : coeficiente de convecção interno (W/ m^2 .K)(INCROPERA, 2003);
- h_e : coeficiente de convecção externo (W/ m^2 .K)(INCROPERA, 2003);
- $R_{cont_{56}}$: resistência térmica de contato entre a manta cerâmica e o alumínio corrugado ($\text{m}^2 \cdot \text{k/W}$).

As demais resistências térmicas de contato foram consideradas desprezíveis por não haver espaçamentos significativos entre as paredes da fornalha que possam ser preenchidos com ar.

FIGURA A24 – PAREDE LATERAL DA CÂMARA DE COMBUSTÃO



FONTE: KLAUTAU (2008).

Assim, o fluxo de calor que atravessava as paredes laterais da câmara de combustão (conv_cond1 Q) foi calculado pela equação (A4.77):

$$Q_{conv\ cond_1} = \frac{T_g - T_1}{(1/h_i)As} + \frac{T_1 - T_2}{(L_1/k_1)As} + \dots + \frac{T_5 - T_{amb}}{(1/h_e)As} \quad (\text{W}) \quad (\text{A4.77})$$

Com sistemas compostos, foi conveniente trabalhar com o coeficiente global da troca de calor (U), e como as áreas foram as mesmas, este foi calculado pela equação (A4.78).

$$U = \frac{1}{R_{total} As} = \frac{1}{[(1/h_i) + (L_1/k_1) + \dots + (1/h_e)]} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (\text{A4.78})$$

Substituindo na fórmula (A4.76), o fluxo de calor que atravessava as paredes laterais da câmara de combustão da fornalha foi dado pela equação (A4.79):

$$Q_{conv\ cond_1} = UAs\Delta T \text{ (W)} \quad (A4.79)$$

Onde:

- ΔT : diferença de temperatura entre a temperatura dos gases no interior da fornalha (T_g) e a temperatura ambiente (T_{amb}).

Parede superior

A FIGURA A25 apresenta um esquema do fluxo de calor que atravessa a parede superior da câmara de combustão.

Como as resistências condutiva e convectiva encontravam-se em série, puderam ser somadas, e a resistência térmica total foi dada pela equação (A4.80).

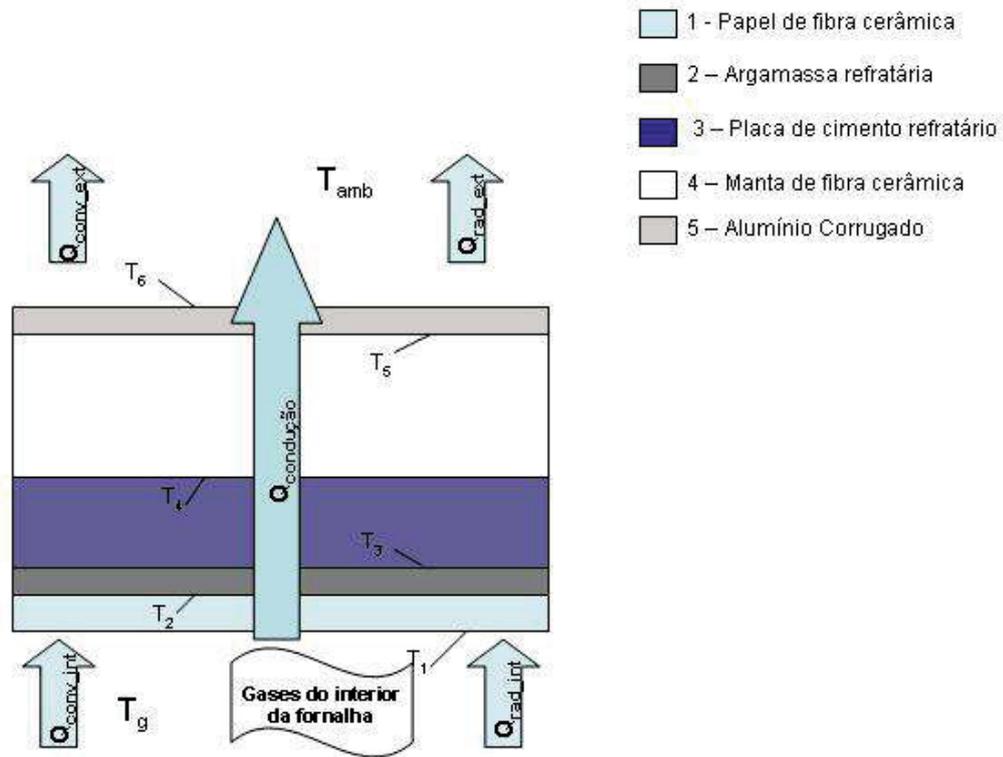
$$R_{total} = \frac{1}{h_i As} + \frac{1}{h_e As} + \frac{L_1}{k_1 As} + \frac{L_2}{k_2 As} + \frac{L_3}{k_3 As} + \frac{L_4}{k_4 As} + \frac{L_5}{k_5 As} + R_{cont_{45}} \text{ (m}^2\text{.K/W)} \quad (A4.80)$$

Onde:

- L_i : espessura do componente i (m);
- As : área da superfície da parede superior da câmara de combustão (m^2);
- K_i : condutividade térmica do componente i (W/m.K);
- h_i : coeficiente de convecção interno (W/ m^2 .K);
- h_e : coeficiente de convecção externo (W/ m^2 .K);
- $R_{cont_{45}}$: resistência térmica de contato entre a manta cerâmica e o alumínio corrugado (m^2 .k/W).

As demais resistências térmicas de contato foram consideradas desprezíveis por não haver espaçamentos significativos entre as paredes da fornalha que possam ser preenchidos com ar.

FIGURA A25– TAMPA SUPERIOR DA CÂMARA DE COMBUSTÃO



FONTE: KLAUTAU (2008).

Assim, o fluxo de calor que atravessava as paredes laterais da câmara de combustão (Q_{conv_cond2}) foi calculado pela equação (A4.81)

$$Q_{conv_cond1} = \frac{T_g - T_1}{(1/h_i)As} + \frac{T_1 - T_2}{(L_1/k_1)As} + \dots + \frac{T_8 - T_{amb}}{(1/h_e)As} \quad (W) \quad (A4.81)$$

Como se trata de sistemas compostos, será utilizado o coeficiente global da troca de calor (U), calculado pela equação (A4.82).

$$U = \frac{1}{R_{total} As} = \frac{1}{[(1/h_i) + (L_1/k_1) + \dots + (1/h_e)]} \quad (W/m^2.K) \quad (A4.82)$$

Assim, o fluxo de calor que atravessava a parede superior da câmara de combustão da fornalha foi dado por (equação 4f.14) (A4.83).

$$Q_{conv_cond1} = UAs\Delta T \quad (A4.83)$$

Onde:

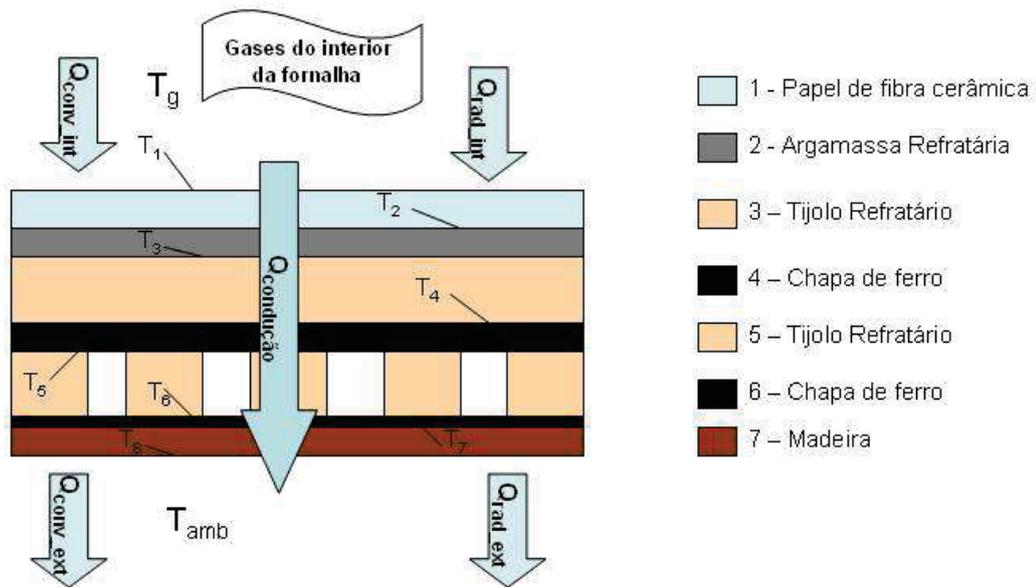
- ΔT : diferença de temperatura entre a temperatura dos gases no interior da fornalha (T_g) e a temperatura ambiente (T_{amb}).

Base

A FIGURA A26 apresenta um esquema do fluxo de calor que atravessa a base da câmara de combustão.

A transferência de calor pela base da fornalha na câmara de combustão dos gases foi calculada de forma similar à anterior. A mudança estava na composição da parede inferior em relação às outras (equação 4f.15).

FIGURA A26 - BASE DA CÂMARA DE COMBUSTÃO



FONTE: KLAUTAU (2008).

A resistência térmica total foi dada pela equação (A4.84):

$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_s} + \frac{1}{h_e A_s} + \frac{L_1}{k_1 A_s} + \frac{L_2}{k_2 A_s} + \frac{L_3}{k_3 A_s} + \frac{L_4}{k_4 A_s} + \frac{L_5}{k_5 A_s} + \frac{L_6}{k_6 A_s} + \frac{L_7}{k_7 A_s} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}) \quad (\text{A4.84})$$

O coeficiente global da transferência de calor foi dado pela equação (A4.85)

$$U = \frac{1}{[(1/h_i) + (L_1/k_1) + \dots + (1/h_e)]} \quad (\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}) \quad (\text{A4.85})$$

Calculado como anteriormente, o fluxo de calor que atravessava a base da câmara de combustão da fornalha foi dado pela equação (A4.86):

$$Q_{conv\ cond_1} = UAs\Delta T \text{ (W)} \quad (A4.86)$$

Onde:

- A: área de superfície da base da câmara de combustão.

Assim, o fluxo de calor que atravessava a câmara de combustão foi dado pela soma das equações (A4.79), (A4.83) e (A4.86).

Zona de Pirólise

Paredes laterais

A FIGURA A27 apresenta um esquema do fluxo de calor que atravessa as paredes laterais da zona de pirólise.

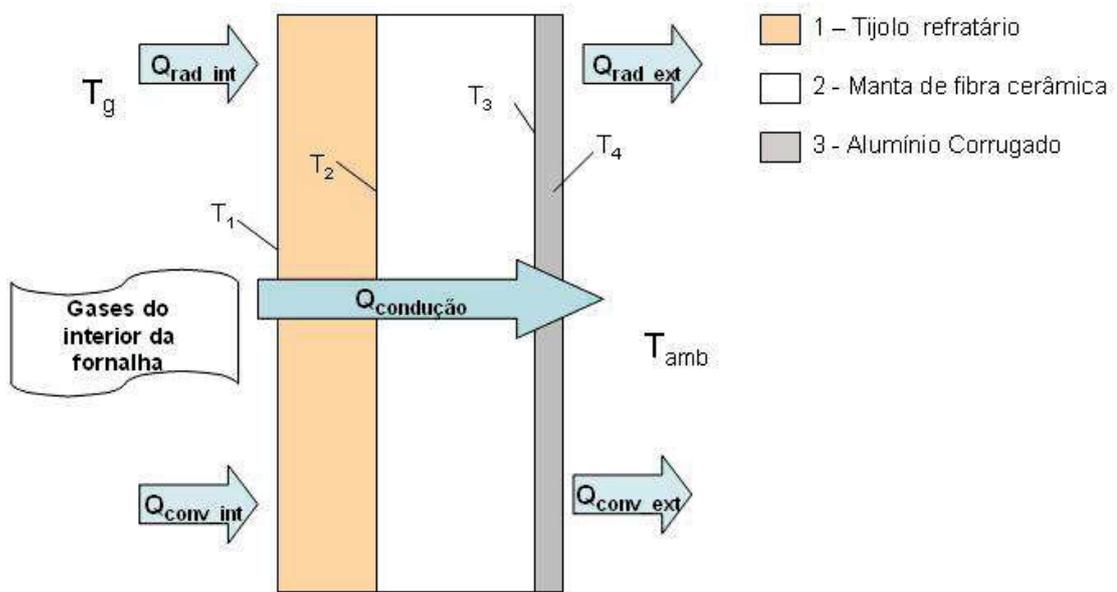
A resistência térmica total das paredes laterais da zona de pirólise foi dada pela equação (A4.87):

$$R_{total} = \frac{1}{h_iAs} + \frac{1}{h_eAs} + \frac{L_1}{k_1As} + \frac{L_2}{k_2As} + \frac{L_3}{k_3As} + R_{cont_{2\ 3}} \text{ (m}^2\text{.K/W)} \quad (A4.87)$$

Onde:

- $R_{cont_{2\ 3}}$: resistência térmica de contato entre a manta cerâmica e o alumínio corrugado (m².K/W).

FIGURA A27 – PAREDE LATERAL DA ZONA DE PIRÓLISE



FONTE: KLAUTAU (2008).

O coeficiente global da transferência de calor foi calculado pela equação (A4.88)

$$U = \frac{1}{[(1/h_i) + (L_1/k_1) + \dots + (1/h_e)]} \text{ (W/m}^2\text{.K)} \quad (\text{A4.88})$$

Assim, o fluxo de calor que atravessa as paredes laterais da zona de pirólise da fornalha é dado pela equação (A4.89):

$$Q_{conv\ cond_1} = UAs\Delta T \text{ (W)} \quad (\text{A4.89})$$

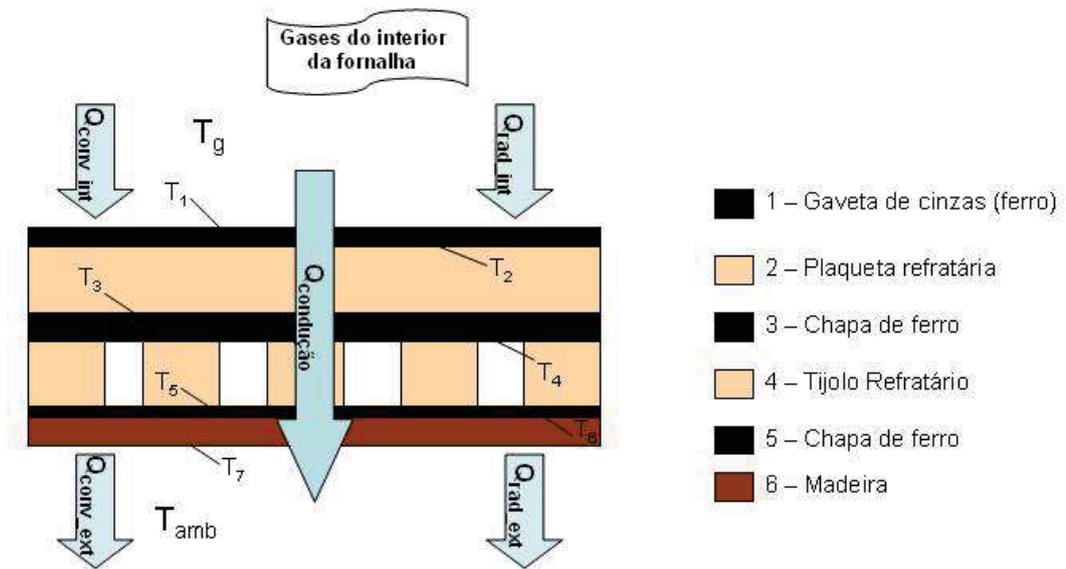
Onde:

- A: área de superfície das paredes laterais da zona de pirólise, em m^2 .

Base

A FIGURA A28 apresenta o fluxo de calor na base da zona de pirólise.

FIGURA A28 - BASE DA ZONA DE PIRÓLISE



FONTE: KLAUTAU (2008).

A transferência de calor por condução e convecção em série pela base da fornalha na zona de pirólise dos gases foi calculada como anteriormente. A mudança estava na composição da parede inferior em relação às outras, conforme equação (A4.90).

$$R_{total} = \frac{1}{h_i AS} + \frac{1}{h_e AS} + \frac{L_1}{k_1 AS} + \frac{L_2}{k_2 AS} + \frac{L_3}{k_3 AS} + \frac{L_4}{k_4 AS} + \frac{L_5}{k_5 AS} + \frac{L_6}{k_6 AS} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K/W}) \quad (\text{A4.90})$$

O coeficiente global da transferência de calor foi calculado como pela equação (A4.91).

$$U = \frac{1}{[(1/h_i) + (L_1/k_1) + \dots + (1/h_e)]} \quad (\text{A4.91})$$

Calculado como anteriormente, o fluxo de calor que atravessava a base da zona de pirólise da fornalha foi dado pela equação (A4.92).

$$Q_{conv\ cond_2} = UAS\Delta T \quad (\text{A4.92})$$

Assim, o fluxo de calor que atravessa a zona de pirólise foi dado pela soma das equações (A4.89) e (A4.92).

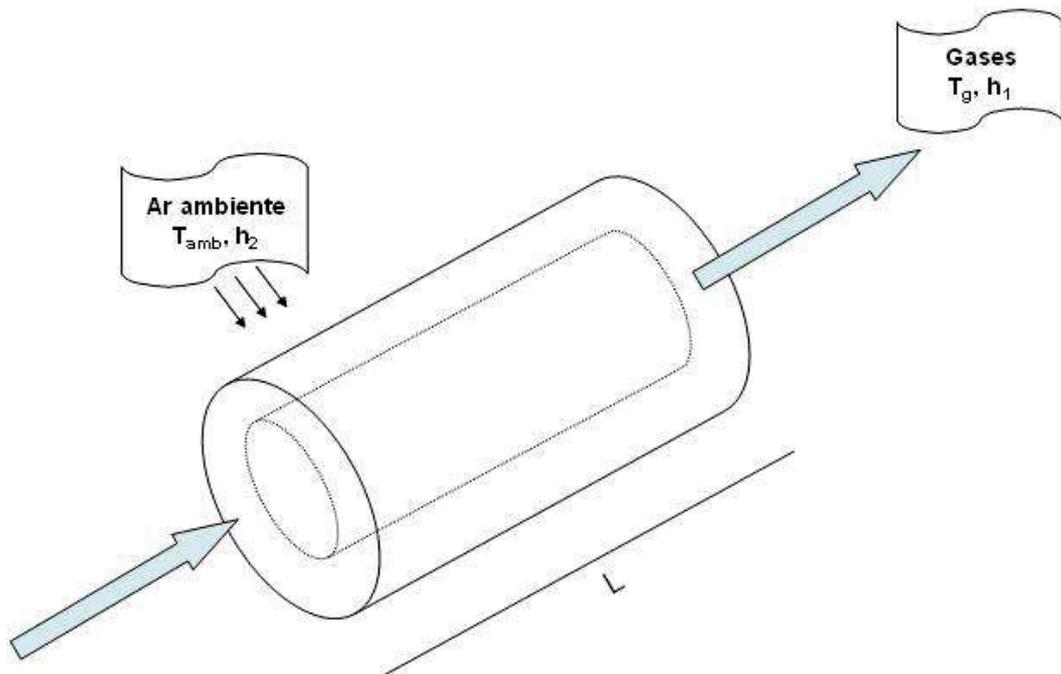
A perda de calor total por convecção e condução em série foi dada pela equação (A4.93).

$$Q_{conv\ cond} = \sum_{i=1}^4 Q_{conv\ cond_i} \quad (A4.93)$$

Chaminé

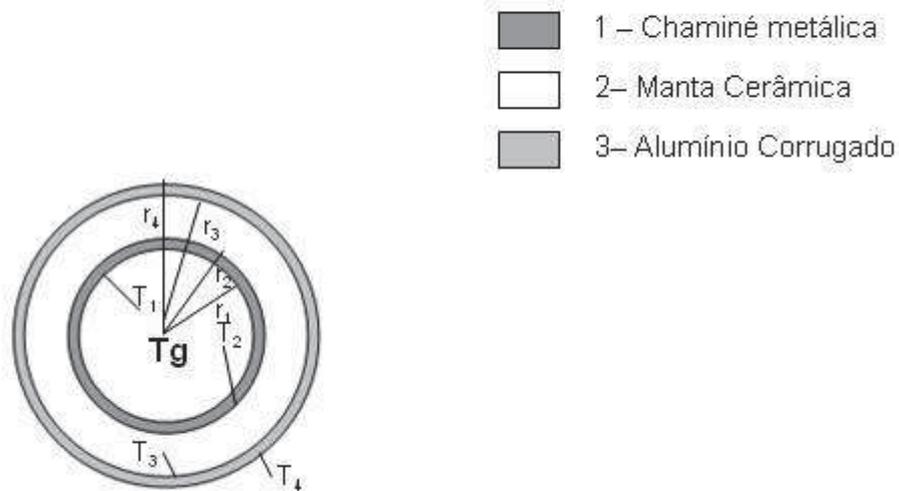
Sistemas cilíndricos e esféricos muitas vezes apresentam o gradiente e temperatura apenas na direção radial e podem portanto ser tratados como unidimensionais. A FIGURA A29 apresenta o esquema do fluxo de calor pelo cilindro e a FIGURA A30 o corte transversal da chaminé cilíndrica da fornalha.

FIGURA A29– FLUXO DE CALOR EM SISTEMAS CILÍNDRICOS



FONTE: KLAUTAU (2008).

FIGURA A30 – CORTE TRANSVERSAL DA CHAMINÉ



FONTE: KLAUTAU (2008).

Para o cálculo da energia perdida por condução e convecção em série, desprezando as resistências de contato das interfaces, a resistência térmica total foi dada pela equação (A4.94).

$$R_{total} = \frac{1}{h_i 2\pi r_1 L} + \frac{1}{h_e 2\pi r_4 L} + \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi k_2 L} + R_{cont_{23}} \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi k_3 L} \quad (\text{K.s/kJ}) \quad (\text{A4.94})$$

Onde:

- L: altura da chaminé (m), como mostrado na FIGURA 27 na Seção 3.3;
- R_i : raio da camada i (m)
- k_i : condutividade térmica do componente i (W/m.K);
- h_i : coeficiente de convecção interno (W/m².K);
- h_e : coeficiente de convecção externo (W/m².K);
- $R_{cont_{23}}$: resistência térmica de contato entre a manta cerâmica e o alumínio corrugado (m².K/W).

O fluxo de calor que atravessava a parede da chaminé, expresso em termos de coeficiente global de transferência (U) foi dado pela equação (A4.95).

$$Q_{chamine} = \frac{\Delta T}{R_{total}} = UAs(T_g - T_{amb}) \quad (\text{W}) \quad (\text{A4.95})$$

Onde:

- A_s : área total da superfície da chaminé (m^2);
- T_g : temperatura dos gases no interior da chaminé (K).

ANEXO 2

Resolução SEMA 016/2014 sobre a geração de calor ou energia utilizando derivados de madeira como combustível

“IV - Geração de calor ou energia utilizando derivados de madeira como combustível:

a) Condição referencial de oxigênio para fontes de combustão externa:

1. Para caldeiras e demais casos: 11%, conforme os QUADROS A9 e A10.

QUADRO A9 - PADRÕES PARA FONTES NOVAS DE COMBUSTÃO EXTERNA

Potência Térmica Nominal ¹⁾ MW	Densidade colorimétrica	MP-total mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento – Amostragem	
						Parâmetros	Frequência
Até 0,05	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann ²⁾	560 ¹⁾	5.000 ¹⁾	NA	NA	CO ou MP-total, O ₂	Anual
Entre 0,05 e 0,15		560 ¹⁾	2.500 ¹⁾				Anual
Entre 0,15 e 1,0		560 ¹⁾	1.300 ¹⁾	NA	NA		Anual
Entre 1,0 e 10		560 ¹⁾	1.000 ¹⁾	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 30		400	2.000 ⁵⁾ 1.000 ³⁾		NA		Semestral
Entre 30 e 50		200	2.000 ⁵⁾ 1.000 ³⁾	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Semestral
Entre 50 e 70		200	1.000	500	NA		Semestral
Entre 70 e 100		100	1.000				Semestral
Acima de 100		100	500	500	NA		Contínuo

FONTE: Resolução SEMA 016/2014.

Notas:

- 1) Na faixa até 10 MW, o controle das emissões poderá ser comprovado através do atendimento ao padrão de MP-total ou atendimento ao padrão de CO a critério do órgão ambiental licenciador;
 - 2) exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramonagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia;
 - 3) válido a partir de 26/12/2016;
 - 4) padrões de CO aplicáveis para operação de plena carga;
 - 5) válido até 25/12/2016.
- NA: Não aplicável

QUADRO A10 - PADRÕES PARA FONTES EXISTENTES DE COMBUSTÃO EXTERNA

Potência Térmica Nominal ¹⁾ MW	Densidade colorimétrica	MP-total mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento – Amostragem		
						Parâmetros	Frequência	
Até 0,5	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann ²⁾	560 ¹⁾	6.000 ¹⁾	NA	NA	CO ou MP-total, O ₂	Anual	
Entre 0,5 e 2,0		560 ¹⁾	3.000 ¹⁾	NA	NA		Anual	
Entre 2,0 e 10		560 ¹⁾	2.500 ¹⁾	NA	NA		Semestral	
Entre 10 e 50		400	2.000	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Semestral	
Entre 50 e 100		200	1.000	500	NA		Semestral	
Acima de 100		100	500	500	NA		O ₂	Contínuo

FONTE: Resolução SEMA 016/2014.

Notas:

- 1) Na faixa até 10 MW, o controle das emissões poderá ser comprovado através do atendimento ao padrão de MP-total ou atendimento ao padrão de CO a critério do órgão ambiental licenciador e definido no Programa de Automonitoramento.
 - 2) exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramonagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia.
 - 3) padrões de CO aplicáveis para operação de plena carga
- NA: Não aplicável

b) Condição referencial de oxigênio para fontes de combustão não externa conforme o QUADRO A11:

1. para processos onde há contato dos gases de combustão com os produtos processados: 17% ou, quando comprovada a sua impossibilidade técnica, outra concentração de oxigênio que melhor caracteriza a condição de boa queima.

QUADRO A11 - PADRÕES PARA FONTES NOVAS E EXISTENTES DE COMBUSTÃO NÃO EXTERNA

Potência Térmica Nominal ¹⁾ MW	Densidade colorimétrica	MP-total mg/Nm ³	CO mg/Nm ³	NO _x mg/Nm ³	SO _x mg/Nm ³	Automonitoramento – Amostragem	
						Parâmetros	Frequência
Até 0,5	20% equivalente ao Padrão 1 da Escala Ringelmann ²⁾	560 ¹⁾	6.000 ¹⁾	NA	NA	CO ou MP-total, O ₂	Anual
Entre 0,5 e 2,0		560 ¹⁾	3.000 ¹⁾	NA	NA		Anual
Entre 2,0 e 10		560 ¹⁾	3.000 ¹⁾	NA	NA		Semestral
Entre 10 e 50		400	3.000	500	NA	MP-total, CO, NO _x e O ₂	Semestral
Entre 50 e 100		200	3.000	500	NA		Semestral
Acima de 100		100	2.000	500	NA		Contínuo

FONTE: Resolução SEMA 016/2014.

Notas:

- 1) Na faixa até 10 MW, o controle das emissões poderá ser comprovado através do atendimento ao padrão de MP-total ou atendimento ao padrão de CO a critério do órgão ambiental licenciador.
 - 2) exceto nas operações de aquecimento, modulação e ramonagem, por um período que totalize 10 minutos, ao longo das 24 horas do dia.
 - 3) padrões de CO aplicáveis para operação de plena carga
- NA: Não aplicável”