

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KARINE ANDRESSA PELANDA

**EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA
COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO PARANÁ**

CURITIBA

2016

KARINE ANDRESSA PELANDA

**EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA
COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO PARANÁ**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal, Área de Concentração de Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Coorientadora: Prof^a. Dra. Mayara Elita Carneiro

CURITIBA

2016

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Pelanda, Karine Andressa

Emissões atmosféricas provenientes do consumo de madeira como biocombustível no Paraná / Karine Andressa Pelanda. – Curitiba, 2016.
84 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Dimas Agostinho da Silva

Coorientadora: Profa. Dra. Mayara Elita Carneiro

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 24/03/2016.

Área de concentração: Tecnologia e Utilização de Produtos Florestais.

1. Biomassa vegetal - Paraná. 2. Madeira como combustível - Paraná. 3. Impacto ambiental. 4. Biocombustíveis - Paraná. 5. Teses. I. Silva, Dimas Agostinho da. II. Carneiro, Mayara Elita. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.548(816.2)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor CIÊNCIAS AGRÁRIAS
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL
Código CAPES: 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **KARINE ANDRESSA PELANDA**, intitulada: "**EMISSIONES ATMOSFÉRICAS PROVENIENTE DO CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO PARANÁ**", após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO.

Curitiba, 24 de Março de 2016.


Prof DIMAS AGOSTINHO DA SILVA (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)


Prof PABLO GEORGIO DE SOUZA (PUC/PR)


Prof UMBERTO KLOCK (UFPR)



AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, por todos aqueles que ele colocou em meu caminho e por prover a força necessária para superar mais esta etapa chamada mestrado.

À minha família, pelo carinho e suporte incondicional ao longo de todos os meus anos de estudo.

Ao meu orientador, Professor Dr. Dimas Agostinho da Silva, pelos ensinamentos, explicações, compressão e pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

À minha coorientadora, Professora Dra. Mayara Elita Carneiro, pela atenção, palavras incentivadoras e sugestões.

Ao Instituto Ambiental do Paraná (IAP), e em especial a Dirlene Cavalcanti e Silva, do Departamento de Tecnologia Ambiental (DTA), por disponibilizar os dados e, assim, tornar possível a realização deste trabalho.

À Universidade Federal do Paraná pela formação acadêmica e por toda estrutura disponibilizada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante o Mestrado.

Ao Laboratório de Energia de Biomassa (LEB) e aos amigos que aqui encontrei, em especial, a Daniele, Sandra, Clarice, Rodrigo, Fernando e Renata, estes que foram muito importantes, ora pelo auxílio oferecido, ora pelas risadas e cafés compartilhados.

Agradeço também a todos aqueles que, mesmo não tendo sido citados, colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho.

“Nesses tempos de céus de cinzas e chumbos,
nós precisamos de árvores desesperadamente verdes.”

(Mário Quintana)

RESUMO

Uma das principais preocupações na geração de energia térmica e elétrica são os impactos ambientais decorrentes das emissões atmosféricas que causam danos à saúde e ao meio ambiente. Entretanto, no Brasil, são poucos os trabalhos que avaliam os impactos ambientais do consumo industrial e agropecuário da madeira como biocombustível, de maneira desagregada por Estado e sob o enfoque de indicadores ambientais. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi estimar as emissões atmosféricas provenientes do consumo de madeira como biocombustível, no Estado do Paraná, e avaliar o seu impacto ambiental por meio do uso de indicadores ambientais. Com base nos dados disponibilizados pelo Instituto Ambiental do Paraná, foi calculado o consumo anual de madeira, em fontes fixas de combustão licenciadas no Estado, e identificadas as fontes fixas de combustão que utilizam esse biocombustível. As emissões do poluente sólido, material particulado e dos poluentes gasosos: óxido de nitrogênio (NO_x), óxido de enxofre (SO_x) e monóxido de carbono (CO), foram estimadas considerando os fatores de emissão do biocombustível madeira. A avaliação dos impactos ambientais das emissões atmosféricas foi realizada por meio dos seguintes indicadores ambientais: coeficiente de dióxido de carbono equivalente, indicador de poluição e eficiência ecológica. De acordo com os resultados obtidos, foram consumidos aproximadamente 21 milhões de toneladas de madeira como biocombustível, em fontes fixas de combustão, no Estado do Paraná. As fontes fixas de combustão identificadas se dividem, principalmente, entre fornos, fornalhas, caldeiras e secadores; e o consumo da madeira ocorre na forma de lenha, cavacos e resíduos florestais e madeireiros, como a serragem. Nas fontes fixas consideradas, destacaram-se as emissões de material particulado ($25921 \text{ ton.ano}^{-1}$), NO_x ($15603 \text{ ton.ano}^{-1}$) e CO ($69694 \text{ ton.ano}^{-1}$). Não foram identificados equipamentos de controle de poluição do ar (ECP) em 68% das fontes fixas licenciadas no Estado do Paraná. Nas que possuem ECP, observou-se que os mais utilizados são os coletores mecânicos e os lavadores de gases, que possuem eficiências de redução de poluição mais baixas, quando comparados aos precipitadores eletrostáticos e aos filtros de manga, que podem atingir até 99% de eficiência de redução, porém a um custo mais elevado e por isto, sendo menos utilizados. Com base nos indicadores ambientais avaliados, os impactos ambientais gerados a partir do consumo do biocombustível madeira podem ser minimizados consideravelmente com o uso de madeira proveniente de plantios florestais manejados sustentavelmente, com o consumo de madeira com teores de umidade mais baixos, e por meio do uso de processos de combustão mais modernos, com uma eficiência de conversão energética mais alta.

Palavras-chave: Bioenergia. Eficiência ecológica. Fontes fixas. Poluição do ar.

ABSTRACT

One of the major concerns about the thermal and power generation is the environmental impact of air emissions that cause serious health and environmental damages. However, in Brazil, there are only a few studies evaluating the environmental impacts of industrial and agricultural consumption of wood as biofuel, in a disaggregated way and from the standpoint of environmental indicators. The aim of this study was to estimate air emissions from the consumption of wood as biofuel in Paraná State and evaluate their environmental impact through the use of environmental indicators. Based on data provided by the Instituto Ambiental do Paraná the annual consumption of wood in licensed stationary sources in Paraná State was calculated and identified the energy conversion processes that consume this biofuel. The emissions of particulate matter, nitric oxides (NO_x), sulfur oxides (SO_x) and carbon monoxide (CO) were estimated by emission factors for wood as biofuel. The evaluation of the environmental impacts of air emissions was carried out through the following environmental indicators: carbon dioxide equivalent, pollution indicator and ecologic efficiency. According to the results were consumed approximately 21 million tons of wood as biofuel in stationary sources of combustion in the State of Paraná. The stationary sources identified are divided mainly between ovens, furnaces, boilers and dryers. The wood for energy is consumed as firewood, wood chips, forest and industrial wood wastes, like sawdust. Among the estimated air emissions from the wood combustion stood out the particulate matter (25921 ton.year⁻¹), NO_x (15603 ton.year⁻¹) and CO (69694 ton.year⁻¹). The most used pollution control devices are mechanical collectors and wet scrubbers which have a lower pollution reduction efficiency when compared to electrostatic precipitators and bag filters, both less used as pollution control device due to them higher cost. It was identified that 68% of licensed stationary sources in Paraná State didn't have any pollution control device. Based on the evaluation of the environmental indicators, the environmental impacts generated from wood consumption as biofuel can be minimized by the use of wood from sustainably managed forests plantations, by the consumption of biofuel with low moisture content and by using more efficiency combustion processes.

Keywords: Bioenergy. Ecological efficiency. Stationary sources. Air pollution.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – MESORREGIÕES GEOGRÁFICAS DO ESTADO DO PARANÁ, DE ACORDO COM A LEI ESTADUAL N.º 15.825/08.....	33
FIGURA 2 – NÚMERO DE FONTES FIXAS QUE UTILIZAM MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ E O SEU CONSUMO ANUAL POR PROCESSO.	43
FIGURA 3 – PERFIL DAS FONTES FIXAS LICENCIADAS QUE COMSOMEM MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL, QUANTO AO USO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO, NO ESTADO DO PARANÁ.	48
FIGURA 4 – PORCENTAGEM DE FONTES FIXAS, NO ESTADO DO PARANÁ, QUE POSSUEM EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR EM RELAÇÃO AO TOTAL DE UNIDADES CORRESPONDENTES AO PROCESSO EM QUE ESTÁ INSERIDA.	51
FIGURA 5 – INFLUÊNCIA DO CICLO DE CARBONO NO INDICADOR DE POLUIÇÃO DA MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL.....	62
FIGURA 6 – RELAÇÃO ENTRE O INDICADOR DE POLUIÇÃO (ΠG) E A EFICIÊNCIA ECOLÓGICA E A INFLUÊNCIA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI).....	65

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 – LISTA DE RESOLUÇÕES DO CONAMA RELACIONADAS A POLUIÇÃO DO AR GERADA POR FONTES FIXAS.....	25
QUADRO 2 – PADRÕES DE EMISSÕES PARA FONTES NOVAS DE COMBUSTÃO EXTERNA UTILIZANDO MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL, DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO N.º 016/2014-SEMA.....	26
QUADRO 3 – PADRÕES DE EMISSÕES PARA FONTES EXISTENTES DE COMBUSTÃO EXTERNA UTILIZANDO MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO N.º 016/2014-SEMA.....	27
QUADRO 4 – TIPOS DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA (ECP) INDICAÇÃO DE USO CONFORME O POLUENTE E DESCRIÇÃO DE FUNCIONAMENTO DE CADA UM.	29

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS, CONFORME RESOLUÇÃO N.º 016/2014-SEMA, DO ESTADO DO PARANÁ.....	35
TABELA 2 – FATORES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA, POR POLUENTE, REFERENTES À MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL.....	37
TABELA 3 – EFICIÊNCIA MÉDIA DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR.	37
TABELA 4 – CONCENTRAÇÕES MÉDIAS PERMITIDAS POR POLUENTE.	38
TABELA 5 – PODER CALORÍFICO INFERIOR.....	39
TABELA 6 – NÚMERO DE FONTES FIXAS LICENCIADAS E CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL, NO ESTADO DO PARANÁ, POR TIPO DE PROCESSO.....	41
TABELA 7 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS TOTAIS PROVENIENTES DE FONTES FIXAS NO ESTADO DO PARANÁ COM E SEM EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR REFERENTES À FEVEREIRO DE 2015.	47
TABELA 8 – NÚMERO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR EM FONTES FIXAS LICENCIADAS, POR PROCESSOS, NO ESTADO DO PARANÁ.	50
TABELA 9 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS ANUAIS DE MATERIAL PARTICULADO (MP) PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ EM FONTES FIXAS.	54
TABELA 10 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS ANUAIS DE NO _x PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ EM FONTES FIXAS.....	56
TABELA 11 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS ANUAIS DE SO _x PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ EM FONTES FIXAS.....	58
TABELA 12 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS ANUAIS DE CO PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ EM FONTES FIXAS.....	60

TABELA 13 – VALORES DO COEFICIENTE DE DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE (CO ₂) _E E INDICADORES DE POLUIÇÃO (PG), COM E SEM O CICLO DE CARBONO (CC) DA MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL, PARA DISTINTOS PODERES CALORÍFICOS INFERIORES (PCI).....	61
TABELA 14 – EFICIÊNCIA ECOLÓGICA DE FONTES FIXAS QUE CONSOMEM MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL, PARA DISTINTOS PODERES CALORÍFICOS INFERIORES (PCI).....	64

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
3 REVISÃO DE LITERATURA	16
3.1 MADEIRA COMO FONTE DE ENERGIA	16
3.1.1 Produção Florestal.....	16
3.1.2 Cadeia produtiva da madeira como biocombustível	17
3.1.3 Combustão da madeira.....	18
3.2 POLUIÇÃO DO AR	20
3.2.1 Poluentes do ar e suas fontes	21
3.2.2 Tipos de poluentes do ar e seus impactos ambientais	22
3.2.3 Padrões de qualidade do ar e de emissões.....	23
3.2.4 Regulamentação do uso de madeira como biocombustível em fontes fixas...25	
3.2.5 Equipamentos de controle de poluição do ar.....	27
3.3 CICLO DE CARBONO DA MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL.....	29
3.4 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA COMO INDICADOR AMBIENTAL	30
4 MATERIAL E MÉTODOS	33
4.1 ÁREA DE ESTUDO	33
4.2 MÉTODOS.....	34
4.2.1 Levantamento de dados	34
4.2.2 Tratamento dos dados.....	35
4.2.3 Emissões atmosféricas	36
4.2.4 Cálculo do indicador de eficiência ecológica	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	41
5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES FIXAS QUE CONSOMEM MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ.....	41
5.2 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ	47
5.2.1 Emissões atmosféricas totais	47
5.2.2 Emissões atmosféricas por poluente	52
5.3 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA.....	61
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	67
REFERÊNCIAS	69
ANEXO	77

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação de movimentos da sociedade, relacionada às questões ambientais e econômicas, principalmente no que tange as mudanças climáticas e a segurança energética, tem pressionado os governos a buscar matrizes energéticas menos poluentes e menos dependentes de fontes fósseis. Uma das principais opções apontadas para viabilizar esta mudança reside no aumento do uso de fontes energéticas renováveis.

De acordo com a *International Energy Agency* (IEA) (2015) a produção global de fontes renováveis cresceu no período entre 1990 e 2013, a uma taxa média de 2,2% ao ano, enquanto que o crescimento da produção total das fontes primárias foi de 1,9% ao ano, no mesmo período. Ainda, de acordo com a mesma agência, em 2013, as fontes renováveis corresponderam a 13,5% da produção total de energia primária sendo a biomassa responsável por 73,4% da produção global de fontes renováveis, e por 10,4% da produção total primária, quando consideramos fontes renováveis e não renováveis. No Brasil, as fontes renováveis representam 43,5% da matriz energética do País, sendo que a madeira corresponde a 9,1% da produção total das fontes renováveis e a 6,3% do consumo final por fonte (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), 2015).

Os últimos dados oficiais sobre o consumo energético do Estado do Paraná, publicados no Balanço Energético do Paraná, são referentes ao ano de 2009, e apesar de estarem defasados, eles revelam que o consumo de madeira como fonte de energia ocupou o terceiro lugar (18,2%) entre os combustíveis mais consumidos no Estado. O primeiro lugar foi ocupado pelo petróleo e derivados (42,8%), o segundo pela cana-de-açúcar (20,3%), também uma fonte renovável como a madeira, e em quarto lugar pela energia hidráulica (12%). Se considerarmos toda a biomassa florestal consumida pelo Estado (madeira, lixívia (licor negro) e carvão vegetal), a participação sobe para 21% do total consumido, assumindo o segundo lugar. No mesmo ano, o consumo de madeira como fonte de energia no Estado do Paraná, representou 13,1% de toda madeira consumida, com a mesma finalidade, no Brasil (EPE, 2010; COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL), 2011).

O uso da madeira como fonte energética está atrelado ao processo de evolução da humanidade, pois, desde o princípio, ela tem sido usada para cocção, proteção e aquecimento da população. Práticas silviculturais modernas, de produção

industrial e transformação, ampliaram o uso da madeira para a geração de calor, força motriz e eletricidade, principal forma de uso dessa fonte energética no Estado do Paraná, onde a maior parte da madeira consumida como biocombustível ocorre no setor industrial (TOLMASQUIM, 2016).

Do ponto de vista econômico, recentemente, o uso da madeira para geração elétrica com a finalidade de comercialização tem apresentado uma tendência de crescimento. Do ponto de vista socioambiental, o consumo de madeira como biocombustível possibilita a utilização dos resíduos oriundos de toda a cadeia de produção da madeira para energia, evitando a disposição inadequada desses materiais, além da geração de empregos e renda ao longo desta cadeia, gerando uma série de benefícios não apenas aos indivíduos envolvidos, mas para a sociedade como um todo (TOLMASQUIM, 2016).

Ainda, do ponto de vista ambiental, um dos principais impactos provenientes do consumo de biocombustíveis são as emissões antrópicas de gases e partículas, que tendem a se intensificar, um dos ônus resultantes do crescimento econômico visto nos últimos tempos, resultando no aumento das suas concentrações na atmosfera. Alguns desses gases e partículas possuem impactos comprovados na saúde humana e no meio ambiente. Além de reduzirem a capacidade das plantas realizarem a fotossíntese, por meio da deposição de poluentes, gerando queda na produtividade agrícola, outros impactos ambientais como a acidificação das águas da chuva contaminando os recursos hídricos e o solo, também já foram observados (SANTANA et al., 2012). Ainda segundo os mesmos autores, para mitigar os impactos da poluição atmosférica, vários fatores devem ser levados em conta, como identificar, nos principais poluentes, os níveis de emissões minimamente seguros de proteção à saúde da população, e em quais concentrações estes poluentes são emitidos na atmosfera.

A poluição do ar constitui um problema de múltiplas causas e consequências e o seu enfrentamento pressupõe uma visão multidisciplinar. Pois, além da aplicação dos conceitos de gestão ambiental, é necessário um entendimento em conjunto sobre o tema, envolvendo diversas áreas, como a saúde, o planejamento urbano e a geração de energia, foco do presente trabalho. O controle da poluição do ar deve ser implementado por meio de medidas que conduzam a uma melhoria gradual e constante da atmosfera. Essas estratégias devem ser baseadas conforme a

dimensão do impacto e, especialmente, conforme os níveis de emissões de poluentes atmosféricos de cada fonte.

Sendo assim, informações sobre o consumo dos combustíveis e as emissões atmosféricas decorrentes da geração de energia, geralmente formatadas na forma de inventários, são uma ferramenta fundamental para a elaboração de toda política energética e/ou ambiental, pois auxiliam no planejamento da redução das emissões e cumprimento dos seus níveis máximos permitidos, visando à qualidade do ar e monitorando o progresso de diversas iniciativas de mitigação de poluição do ar (MOHAN et al., 2012). Além disto, buscando extrair o máximo dos dados sobre o consumo de madeira como biocombustível, há a busca por implementar formas de avaliação do seu impacto ambiental por meio de indicadores ambientais, baseados não apenas nas emissões provenientes do seu consumo, mas em todo o processo de combustão, desde a escolha do biocombustível até o tipo de processo de conversão.

2 OBJETIVOS

Estimar as emissões atmosféricas anuais provenientes do consumo de madeira como biocombustível em fontes fixas no Estado do Paraná e avaliar o seu impacto ambiental.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar as fontes fixas de emissões atmosféricas, provenientes do consumo de madeira como biocombustível, localizadas no Estado do Paraná;
- calcular o consumo de madeira como biocombustível nas fontes fixas localizadas no Estado do Paraná;
- estimar as emissões atmosféricas provenientes do consumo de madeira como biocombustível no Estado do Paraná;
- avaliar os impactos ambientais causados pelas emissões atmosféricas, de acordo com a eficiência ecológica do biocombustível madeira.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 MADEIRA COMO FONTE DE ENERGIA

3.1.1 Produção Florestal

Segundo dados da Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ) (2015), em 2014, dos 851 milhões de hectares que compõem o território brasileiro, 66,1% estavam cobertos por habitats naturais; 23,3% ocupados por pastagens; 6,2% pela agricultura; 3,5% por redes de infraestrutura e áreas urbanas e apenas 0,9% cobertos por plantios florestais para fins industriais.

A produtividade florestal brasileira é considerada uma das mais elevadas do mundo, devido às condições edafoclimáticas favoráveis e aos estudos técnico/científicos realizados pela academia e por empresas do setor florestal. A produtividade florestal brasileira chega a apresentar ciclos de produção, de 7 a 8 anos mais curtos, em comparação aos de outros países (IBÁ, 2015; TOLMASQUIM, 2016).

Os dois principais gêneros plantados no Brasil são o *Eucalyptus* e o *Pinus*. O percentual relativo à área de árvores plantadas no País é composto por 7,74 milhões de hectares, onde os plantios do gênero *Eucalyptus* ocupam 5,56 milhões de hectares (71,9%) e estão localizados, por ordem decrescente, nos Estados de Minas Gerais (25,2%), São Paulo (17,6%) e Mato Grosso do Sul (14,5%). Os plantios do gênero *Pinus* ocupam 1,59 milhão de hectares e concentram-se principalmente no Paraná (42,4%) e em Santa Catarina (34,1%). Outras espécies, como a acácia, teca, seringueira e o paricá, também estão entre as espécies plantadas no País (IBÁ, 2015).

De acordo com o Mapeamento dos Plantios Florestais do Estado do Paraná (EISFELD; NASCIMENTO, 2015), as áreas de plantios florestais somam 1,06 milhão de hectares, as quais representam, aproximadamente, 5,4% da área total do Estado, sendo 65,8% da área plantada composta pelo gênero *Pinus* e 34,2% por plantios do gênero *Eucalyptus*. Isto porque no Estado estão instaladas numerosas indústrias de produtos de madeira sólida e de painéis reconstituídos, principais segmentos que utilizam como matéria-prima a madeira de *Pinus* (STCP, 2015).

3.1.2 Cadeia produtiva da madeira como biocombustível

A cadeia produtiva da madeira utilizada como biocombustível gera dois produtos finais: a madeira *in natura* (fonte primária) e o carvão vegetal (fonte secundária). Esses podem ser provenientes de vegetações nativas ou de florestas plantadas, seja na forma de florestamentos ou reflorestamentos (FONTES, 2005). Alguns autores, como é o caso do IBGE, em sua metodologia, divide a origem como sendo de extrativismo vegetal ou silvicultural (IBGE, 2002). As espécies comerciais mais utilizadas são as do gênero *Eucalyptus* e o *Pinus* (STCP, 2015).

O Paraná, em 2014, foi o maior produtor de madeira para energia na forma de lenha, proveniente de florestas plantadas, entre todos os estados, representando 23,4% da produção nacional, de 56,1 milhões de m³. Ao somar o estado do Rio Grande do Sul (22%) e de Santa Catarina (16%), segundo e terceiro colocados, respectivamente, aos números paranaenses, é possível afirmar que mais de 60% da produção nacional de madeira para energia, proveniente de florestas plantadas, estão localizadas na Região Sul do País. Já a participação do Estado na produção de madeira para energia, de origem extrativista, é sensivelmente menor, não chegando a 4% da produção nacional, de 29 milhões de m³ de lenha. A maior parte da madeira produzida para energia, a partir de vegetação nativa, origina-se na Região Nordeste do País (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE), 2015).

Com relação ao carvão vegetal, em 2014, a produção paranaense, a partir de vegetação nativa, foi de aproximadamente 19 mil toneladas, e de 23 mil toneladas de carvão vegetal produzido com madeira de florestas plantadas (IBGE, 2015). Estes valores estão muito abaixo da produção nacional, em ambos os casos, conferindo uma participação de 1,8% (nativas) e 0,4% (floresta plantada) ao Estado na produção de carvão vegetal.

A madeira utilizada como fonte primária de energia costuma ser denominada como lenha ou cavaco. Geralmente, a lenha é o material obtido dos galhos e troncos das árvores, com diâmetros abaixo de 8 cm (IBGE, 2002; SCTP, 2015). Os cavacos são o resultado da transformação mecânica de toras, toretes, lenha e galhos em material picado de pequenas dimensões, para produção de energia, por meio da utilização do equipamento conhecido como picador, de acordo com o Procedimento Operacional Padrão, o POP 10, estabelecido pelo Instituto Ambiental do Paraná

(IAP) (PARANÁ, 2008), para a produção de cavacos. Além da lenha e do cavaco, tem aumentado o uso de resíduos de madeira para geração de energia (COPEL, 2011). Esses resíduos podem ser classificados em resíduos do manejo florestal e de tratamentos silviculturais, da colheita florestal e, também, do beneficiamento da madeira (CANTO, 2009).

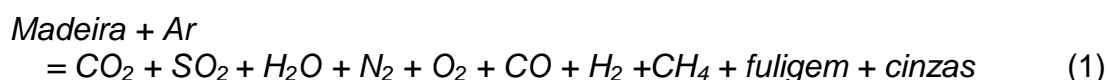
A produção de madeira para energia é integralmente absorvida pelo mercado interno nacional e o seu consumo é, principalmente, direcionado aos setores residencial, comercial, agropecuário e industrial. No setor residencial, ela é utilizada para a cocção de alimentos; no setor comercial, o consumo ocorre em hotéis, pizzarias e restaurantes com a finalidade de aquecer a água e alimentar os fornos; no agropecuário, a madeira é utilizada para secagem de grãos e aquecimento de aves e no setor industrial, o consumo ocorre majoritariamente nas indústrias de papel e celulose, alimentos e bebidas e cerâmica, para geração de energia térmica e elétrica (FONTES, 2005). Em quantidades menores, a madeira é consumida nos centros de transformação, visando à produção de carvão vegetal e energia elétrica (bioeletricidade).

De acordo com estudos realizados por Tolmasquim (2016), a demanda de madeira para bioeletricidade está em processo de expansão no País. Até 2020, ela deverá alcançar 70 milhões de m³, valor baseado em empreendimentos que já comercializaram energia nos leilões, e que se equipará ao volume utilizado atualmente para a fabricação de papel e celulose, ou de carvão vegetal. De acordo com o mesmo estudo, em 2050, o volume de madeira estimado para bioeletricidade será de quase 250 milhões de m³.

3.1.3 Combustão da madeira

As substâncias capazes de reagir com o oxigênio e liberar energia térmica são denominadas combustíveis (VLASSOV, 2001). Ainda de acordo com o mesmo autor, a madeira é considerada um combustível orgânico ou hidrocarboneto, pois a sua composição contém uma fração orgânica, composta pelos elementos químicos carbono (C) e hidrogênio (H), que são os elementos combustíveis, além de oxigênio (O), enxofre (S) e nitrogênio (N), e uma fração mineral, considerada não combustível, denominada cinzas.

Entre as diversas tecnologias empregadas para iniciar a conversão termoquímica da madeira, as mais básicas são: pirólise, gaseificação e combustão (NUSSBAUMER, 2010). A combustão, ou queima direta, é a forma de conversão de energia mais antiga e também a mais utilizada, sendo que a combustão do biocombustível madeira em caldeiras, fornos e fornalhas, possui dois objetivos principais, a obtenção de energia e calor, e a eliminação de resíduos sólidos. De acordo com Nogueira et al. (2000), a reação de combustão da madeira com o ar é representada na equação (1) abaixo.



O dióxido de carbono (CO_2), o dióxido de enxofre (SO_2) e o vapor d'água (H_2O) são produtos da oxidação completa. O ar, quando em excesso na combustão, é representado pelo gás nitrogênio (N_2) e gás oxigênio (O_2). O monóxido de carbono (CO), o gás hidrogênio (H_2) e o metano CH_4 , mais a fuligem, são os produtos indesejáveis em uma combustão, pois identificam que a mesma é incompleta. Ao final do processo de conversão, resta a fração mineral não combustível da madeira, na forma de cinzas.

A combustão direta da madeira em processos industriais geralmente ocorre em fornos ou caldeira. Segundo Nogueira et al. (2000), os fornos, geralmente, requerem temperaturas elevadas, porque o calor produzido é transferido diretamente ao material durante o processo de fabricação, como para a fabricação de cerâmica, por exemplo. As caldeiras visam à produção de vapor, que é utilizada como fonte de energia térmica, além da possibilidade para a produção de eletricidade, mediante o uso de turbinas a vapor, processo conhecido como cogeração.

A combustão da madeira em caldeiras pode apresentar várias configurações, sendo a mais comum a de caldeiras operando com fornalhas de grelhas, que queimam o biocombustível com altos teores de umidade. A caldeira de combustão em leito fluidizado é considerada o tipo mais moderno e é mais utilizada em grandes operações. Trata-se de um leito fluidizado de partículas inertes, por meio das quais o ar é soprado, podendo ser utilizados combustíveis com umidade de até 70% (UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), 2001). Em um leito fluidizado, a combustão da madeira ocorre de forma mais rápida do que em uma grelha, devido ao imediato contato entre o

biocombustível com o material quente do leito, resultando em uma combustão rápida e quase completa da matéria orgânica, que minimiza as emissões de compostos orgânicos não queimados e de material particulado (USEPA, 2001).

O principal poluente emitido pelas fontes que utilizam madeira como biocombustível é o material particulado, porém, o monóxido de carbono (CO) e os óxidos de nitrogênio (NO_x), também podem ser emitidos em quantidades significativas quando certos tipos de resíduos de madeira são queimados ou quando as condições de combustão não são adequadas. Essas emissões dependem principalmente da composição e da forma em que a madeira foi utilizada como combustível e também do equipamento de controle de emissões instalado na fonte de combustão (COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB), 2015). O SO_x emitido na combustão da madeira é resultado do enxofre presente na composição elementar do combustível (FERREIRA, 2012).

3.2 POLUIÇÃO DO AR

De acordo com a Resolução n.º 016/2014, de 26 de março de 2014, definida pela Secretaria do Meio Ambiente e Recursos Hídricos (SEMA), a poluição do ar pode ser definida como:

A degradação da qualidade da atmosfera resultante de atividades que direta ou indiretamente:

- a) Prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- b) criem condições adversas às atividades sociais e econômicas;
- c) afetem desfavoravelmente a biota;
- d) afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;
- e) lancem matérias ou energias em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos (PARANÁ, 2014a, p.6).

Essa definição está de acordo com o conceito de poluição estabelecido pela Lei n.º 6.938/81, Artigo 3º, inciso III, que dispõe sobre a Política Nacional de Meio Ambiente Nacional (BRASIL, 1981).

A poluição do ar pode ainda ser definida como a alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas da atmosfera, causada por substâncias ou energia introduzidas, diretamente ou não, pelo homem, que tragam perigo real ou potencial à saúde humana, aos ecossistemas e aos materiais, além de prejudicar ou interferir nas atividades normais das pessoas (ASSUNÇÃO; HASEGAWA, 2001;

CAVALCANTI, 2010; UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE (UNECE), 2015).

A atmosfera é composta quase em sua totalidade por moléculas de nitrogênio (78%) e de oxigênio (21%). Moléculas de outras substâncias, como o argônio, dióxido de carbono, metano, hidrogênio e hélio, além de vapores orgânicos, compõem o 1% restante da composição (PIRES, 2005).

3.2.1 Poluentes do ar e suas fontes

De modo geral, os poluentes do ar são caracterizados como substâncias adicionadas a atmosfera e que resultam em um efeito adverso sobre o meio ambiente. Esses poluentes podem ser encontrados na forma de gases, particulados ou, ainda, na forma de aerossóis (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2014).

Quanto à origem dos poluentes do ar, essa pode ser natural, como no caso das emissões decorrentes de vulcões, incêndios florestais e a maresia do oceano. Ou então, antropogênica, que é o resultado das inúmeras atividades humanas, como os processos de combustão, em geral, das indústrias e de substâncias químicas (FELLENBERG, 2007).

Ainda de acordo com a sua origem, os poluentes podem ser classificados em poluentes primários; quando provenientes das emissões diretas, e em poluentes secundários, quando produto de reações químicas ou mesmo fotoquímicas, entre dois ou mais poluentes, ou com a participação de constituintes normais da atmosfera, como é o caso da formação de ozônio no *smog* fotoquímico¹ (CAVALCANTI, 2010). Segundo a mesma autora, as fontes de poluentes podem ainda ser classificadas em fontes fixas ou estacionárias e em fontes móveis.

As fontes fixas são aquelas que ocupam uma área relativamente limitada, como os processos industriais, permitindo uma avaliação direta na fonte. As fontes móveis são as que se dispersam pela atmosfera, não sendo possível a avaliação na base da fonte, como os meios de transporte que utilizam motores à combustão como força motriz (CAVALCANTI, 2010).

¹ *Smog* fotoquímico= combinação de diferentes poluentes gasosos e particulados, e sua produção incorre em uma série de reações. (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2014)

3.2.2 Tipos de poluentes do ar e seus impactos ambientais

Os poluentes emitidos em maior quantidade pelo setor energético são o monóxido de carbono (CO), os óxidos de enxofre (SO_x), o material particulado (MP), os hidrocarbonetos e os óxidos de nitrogênio (NO_x) (GOLDEMBERG; LUCON, 2010). No caso das emissões provenientes de fontes fixas, objeto de estudo deste trabalho, a maior parte delas é produto da combustão que ocorre em instalações que geram vapor e/ou energia elétrica.

Os poluentes, comumente monitorados, são descritos abaixo:

Monóxido de Carbono (CO): É um gás incolor, inodoro e tóxico, produzido por meio da queima incompleta do carbono no combustível de origem orgânica, como os fósseis e a biomassa. Altos índices deste poluente têm sido medidos, principalmente, em áreas com fluxo intenso de veículos. É objeto de preocupação não apenas a concentração, como também a exposição ao CO, isto porque os efeitos da exposição a este gás estão associados à diminuição da capacidade de transporte de oxigênio (O₂) pelo sangue, pois uma vez na corrente sanguínea, ele se liga as hemoglobinas, impedindo-as de carregar o oxigênio dos pulmões. Pode causar tontura, dor de cabeça e distúrbios visuais (HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2014; BRASIL. Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2015a).

Óxidos de Enxofre (SO_x): Na forma de SO₂ é um gás incolor, com odor bastante forte. Resulta, principalmente, de fontes antropogênicas como a queima de combustíveis que contêm enxofre (óleo diesel, óleo combustível industrial e gasolina) e de fontes naturais, como vulcanismos, ações bacterianas e descargas elétricas. O SO₂ na atmosfera é prejudicial não apenas à saúde humana, como também à vegetação e à resistência dos materiais. A sua inalação pode causar danos ao sistema respiratório, como o agravamento dos sintomas da asma. No ambiente pode levar à formação de chuva ácida, além da formação de *smog* fotoquímico. A chuva ácida é responsável pela corrosão de materiais, acidificação de corpos d'água e destruição de florestas (BRASIL. MMA, 2015a).

Material Particulado (MP): Engloba as Partículas Totais em Suspensão (PTS), Partículas Inaláveis (MP₁₀ e MP_{2,5}) e Fumaça (FMC). É um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo o tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu tamanho diminutivo. Em geral, são provenientes da fumaça emitida pela combustão de veículos automotivos,

da fumaça expelida pelas chaminés das indústrias, da geração de energia, pela queima de biomassa, além da poeira depositada nas ruas e dos resíduos de processos industriais que utilizam material granulado; de obras viárias ou que movimentam terra e/ou areia (CLEMENTE, 2000; CETESB, 2013).

Com relação à saúde humana, o tamanho das partículas está diretamente associado ao seu perigo em potencial, pois quanto menores forem as partículas, maiores os efeitos provocados. Partículas com diâmetro entre 2,5 e 30 μm , são provenientes da combustão descontrolada e da dispersão mecânica do solo ou outros materiais da crosta terrestre. Já as partículas mais finas, com diâmetro menor que 2,5 μm , são derivadas dos processos de combustão, em fontes móveis ou estacionárias, e podem atingir a região mais profunda do sistema respiratório. De modo geral, o MP pode afetar a respiração, provocar agravamento em problemas cardiovasculares e possivelmente prejudicar o sistema imunológico do indivíduo (CETESB, 2013; HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2014).

O material particulado também pode reduzir a visibilidade na atmosfera podendo causar corrosão e sujeira. Além disso, este poluente, na forma de particulado fino, tem a capacidade de aumentar os efeitos fisiológicos dos gases presentes no ar (CLEMENTE, 2000).

Óxidos de Nitrogênio (NO_x): O gás monóxido de nitrogênio (NO) é incolor e o dióxido de nitrogênio (NO_2), por absorver a luz solar, possui uma coloração marrom, característica do *smog*. São formados durante processos de combustão, principalmente em centrais de geração termoelétrica, e em outros processos industriais. Virtualmente, toda emissão de NO_x origina-se como NO, que sob a ação de luz solar se transforma em NO_2 e tem papel importante na formação de oxidantes fotoquímicos, como o ozônio. Dependendo das concentrações, o NO_2 causa prejuízos à saúde. O dióxido de nitrogênio, devido à sua baixa solubilidade, é capaz de penetrar no sistema respiratório, provocando irritações (CLEMENTE, 2000; CAVALVANTI, 2010; CETESB, 2013; HINRICHS; KLEINBACH; REIS, 2014).

3.2.3 Padrões de qualidade do ar e de emissões

O direito de respirar um ar sadio pode ser fundamentado em dois preceitos constitucionais, sendo o primeiro que garante a todos o direito a um meio ambiente ecologicamente equilibrado (Art. 225, da Constituição Federal) e, o segundo,

relacionado ao direito à saúde, garantido a todos (Art. 196, da Constituição Federal). A qualidade do ar, que definirá se o ar está sadio ou não, pode ser determinada por meio da presença de determinados poluentes, considerados como indicadores da qualidade do ar (CLEMENTE, 2000).

É de fundamental importância a determinação de limites máximos para a concentração desses poluentes. E os padrões de qualidade do ar determinam legalmente os limites máximos para a concentração de determinados componentes atmosféricos. Eles são fixados com o objetivo de preservar a qualidade do ar, mantendo as emissões dentro de níveis que não prejudiquem a saúde.

De acordo com a Constituição Federal (BRASIL, 1988), todas as unidades da federação possuem competência administrativa para praticar atos na esfera da proteção do meio ambiente, incluindo o tema poluição atmosférica. Cabe à União o estabelecimento dos padrões nacionalmente aplicáveis, e estes devem ser tidos como parâmetros mínimos a serem atendidos por todo o País. Os Estados e o Distrito Federal (DF) podem estabelecer padrões de qualidade do ar próprios, desde que mais restritivos do que os nacionais, conforme Art. 24, inciso VI, da Constituição Federal /88.

Isso acontece porque, com relação aos limites das emissões industriais, a participação dos órgãos ambientais estaduais, na edição das resoluções, é muito importante, tendo em vista a sua atuação no licenciamento e na fiscalização destas atividades, e o conhecimento empírico que estes detêm sobre a realidade de seus territórios. Além disso, participam também das discussões os representantes das indústrias, dos governos municipais e da sociedade civil, buscando resoluções de acordo com a realidade na qual será aplicada (BRASIL. MMA, 2015b).

A Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981 (BRASIL, 1981), criou o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e lhe conferiu competências para estabelecer padrões e métodos ambientais, entre eles os padrões da qualidade do ar. Ela é considerada a pedra angular da Política Nacional do Meio Ambiente nacional (CLEMENTE, 2000).

A Resolução n.º 005, de 15 de junho de 1989, do CONAMA, instituiu o Programa Nacional de Qualidade do Ar (PRONAR) e determinou a classificação dos padrões em dois tipos (BRASIL. MMA, 2015b):

- Padrões primários: são entendidos como níveis máximos toleráveis de concentração de poluentes.

- Padrões secundários: são entendidos como os níveis desejados de concentração de poluentes.

Em 1990, foram definidos, pela Resolução n.º 003 do CONAMA, os valores medidos em concentração de poluentes, dos padrões nacionais de qualidade do ar para Partículas Totais em Suspensão (PTS), Fumaça, Partículas Inaláveis (MP₁₀), Dióxido de Nitrogênio (NO₂), Dióxido de Enxofre (SO₂), Monóxido de Carbono (CO) e Ozônio (O₃). O Estado do Paraná aceitou tais padrões por meio da Resolução n.º 041/2002-SEMA, atualmente revisada e substituída pela Resolução n.º 016/2014 da mesma secretaria, igualando os padrões paranaenses aos nacionais.

3.2.4 Regulamentação do uso de madeira como biocombustível em fontes fixas

Compete ao CONAMA, a nível nacional, a definição e revisão dos padrões de qualidade do ar. No Estado do Paraná o órgão responsável pela fiscalização de fontes poluidoras, e pelo controle da qualidade do ar, bem como pela divulgação diária dos dados de qualidade do ar é o Instituto Ambiental do Paraná (IAP).

Conforme divulgado pelo Ministério do Meio Ambiente (BRASIL. MMA, 2015b), as Resoluções do CONAMA relativas a fontes fixas estão descritas no QUADRO 1.

QUADRO 1 – LISTA DE RESOLUÇÕES DO CONAMA RELACIONADAS A POLUIÇÃO DO AR GERADA POR FONTES FIXAS.

RESOLUÇÃO	DESCRIÇÃO
Resolução n.º 5, de 15 de junho de 1989	Criou o Programa Nacional de Controle da Poluição do Ar – PRONAR.
Resolução n.º 3, de 28 de junho de 1990	Dispôs sobre os padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Define os padrões de qualidade do ar e as concentrações de poluentes atmosféricos que, ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral.
Resolução n.º 8, de 6 de dezembro de 1990	Estabeleceu os limites máximos de emissão de poluentes no ar para processos de combustão externa de fontes de poluição
Resolução n.º 382, de 26 de dezembro de 2006	Estabeleceu os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas.
Resolução n.º 436, de 22 de dezembro de 2011.	Estabelece os limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas instaladas ou com pedido de licença de instalação anteriores a 2 de janeiro de 2007, complementando assim a Resolução n.º 436/2006, impondo às fontes antigas novos limites.

FONTE: BRASIL. MMA, (2015b).

O Estado do Paraná, por meio da Resolução n.º 042/2008 e 016/2014-SEMA, estabelece os critérios para a queima de resíduos em caldeiras e os padrões de emissão para processos industriais, assim como critérios de automonitoramento das emissões, respectivamente. Esta última define: “*padrões de emissão e critérios de atendimento para fontes industriais, comerciais e de serviços; II. padrões de condicionamento; III. metodologias a serem utilizadas para determinação de emissões*” (PARANÁ, 2014a).

Os padrões definidos pela Resolução n.º 016/2014-SEMA, no Estado do Paraná, diferem entre as fontes consideradas como novas e existentes, definição esta adotada com base na data em que a licença de operação da fonte foi solicitada. Do ponto de vista legal, conforme especificado na Resolução n.º 016/2014-SEMA, Artigo 2º, inciso X (PARANÁ, 2014a), o consumo de madeira como biocombustível se refere ao material na forma de lenha, e também “na forma de cavacos, serragem, pó de lixamento, casca, aglomerado, compensado ou MDF e assemelhados, desde que não tenham sido tratados com produtos halogenados, revestidos com produtos polimerizados, tintas ou outros revestimentos”.

De acordo com a mesma Resolução, os padrões estabelecidos para as emissões atmosféricas de fontes fixas no Estado do Paraná estão descritos no QUADRO 2 e no QUADRO 3 .

QUADRO 2 – PADRÕES DE EMISSÕES PARA FONTES NOVAS DE COMBUSTÃO EXTERNA UTILIZANDO MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL, DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO n.º 016/2014-SEMA.

POTÊNCIA TÉRMICA NOMINAL (MW)	MP _{TOTAL} mg.Nm ⁻³	CO ³⁾ mg.Nm ⁻³	NO _x mg.Nm ⁻³	SO _x mg.Nm ⁻³	AUTOMONITORAMENTO – AMOSTRAGEM	
					PARÂMETROS	FREQUÊNCIA
Até 0,05	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⁾	NA	NA		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 ⁴⁾ 1.000 ²⁾	500	NA	MP _{total} , CO, NO _x e O ₂	Semestral
Entre 30 e 50	200	2.000 ⁴⁾ 1.000 ²⁾	500	NA		Semestral
Entre 50 e 70	200	1.000	500	NA		Semestral
Entre 70 e 100	100	1.000	500	NA		Semestral
Acima de 100	100	500	500	NA		Contínuo

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) válido a partir de 26/12/2016; 3) padrões de CO aplicáveis para operação de plena carga; 4) válido até 25/12/2016; NA: Não aplicável.

FONTE: PARANÁ (2014a)

QUADRO 3 – PADRÕES DE EMISSÕES PARA FONTES EXISTENTES DE COMBUSTÃO EXTERNA UTILIZANDO MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL DE ACORDO COM A RESOLUÇÃO n.º 016/2014-SEMA.

POTÊNCIA TÉRMICA NOMINAL (MW)	MP _{total} mg.Nm ⁻³	CO ² mg.Nm ⁻³	NO _x mg.Nm ⁻³	SO _x mg.Nm ⁻³	AUTOMONITORAMENTO – AMOSTRAGEM	
					PARÂMETROS	FREQUÊNCIA
Até 0,5	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		Contínuo

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) padrões de CO aplicáveis para operação de plena carga; NA: Não aplicável

FONTE: PARANÁ (2014a)

A Lei Estadual Paranaense n.º 13.806/2002 dispõe sobre as atividades pertinentes ao controle da poluição atmosférica, padrões e gestão da qualidade do ar, conforme específica e adota outras providências (SILVEIRA, 2010).

3.2.5 Equipamentos de controle de poluição do ar

Os controles de redução de poluição do ar, na combustão da madeira como biocombustível, inclui tecnologias que podem ser empregadas na pré-combustão, combustão ou pós-combustão. A tecnologia escolhida depende das exigências legais, da composição do biocombustível utilizado e da fonte de geração de energia (TOLMASQUIM, 2016).

A redução das emissões de poluentes atmosféricos na pré-combustão envolve a qualidade do biocombustível, começando pela seleção de matéria-prima com baixos teores de impurezas, ou então com a separação das impurezas. Na combustão, ela envolve a escolha da tecnologia da fonte fixa para geração de energia, método de combustão e condições operacionais mais adequados (TOLMASQUIM, 2016).

Na pós-combustão, segundo a USEPA (2001), agência ambiental dos Estados Unidos, os equipamentos de controle mais utilizados para reduzir as emissões de material particulado, em fontes fixas de combustão da madeira e

derivados, são os coletores mecânicos (ciclones e multiciclones), os lavadores de gases, os precipitadores eletrostáticos (EPS) e os filtros de manga.

Ainda, de acordo com a USEPA (2001), o uso de coletores mecânicos fornece o controle de partículas para muitas caldeiras a lenha. A eficiência desse arranjo varia entre 25% e 65%, valores considerados baixos para os padrões atuais de controle. Entre os lavadores de gases, os do tipo Venturi, chegam a atingir 85% ou mais de eficiência na coleta de material particulado, porém, o uso de lavadores de gases é aconselhado desde que esteja associado ao uso de coletores mecânicos. Os precipitadores eletrostáticos (ESP) são indicados quando é requerida uma eficiência maior que 90% no controle das emissões, podendo chegar a 99% quando utilizados em conjunto com os coletores mecânicos, esses que removem partículas de maior tamanho. O filtro de manga tem a desvantagem de oferecer risco de incêndio decorrente das faíscas e cinzas volantes provenientes da combustão do combustível, entretanto, esse risco é mitigado com a instalação de um coletor mecânico usado mais uma vez para remover partículas maiores de cinzas volantes, na forma de faíscas, resultando em uma eficiência maior do que 80%.

Citando exemplos relacionados à realidade dos Estados Unidos, em áreas onde a emissão de NO_x deve ser mitigada ao menor nível requerido, caldeiras com leito fluidizado e fornalhas automáticas têm cumpridos os padrões com a aplicação de redução catalítica seletiva (SCR) e redução não catalítica seletiva (SNCR) (USEPA, 2001).

De acordo com o Guia de Melhor Tecnologia Prática Disponível para fontes de combustão, proposto pela CETESB (2015), os equipamentos de controle de poluição mais indicados, para reduzir a emissão de material particulado são: lavador de gases, lavador de gases tipo Venturi, precipitadores eletrostáticos e filtro de manga. Para a redução das emissões de NO_x são indicados os sistemas de controle como pré-aquecimento do ar de combustão, recirculação dos gases, redução catalítica seletiva (SCR) e redução não catalítica seletiva (SNCR), conforme descreve o QUADRO 4.

QUADRO 4 – TIPOS DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA (ECP) INDICAÇÃO DE USO CONFORME O POLUENTE E DESCRIÇÃO DE FUNCIONAMENTO DE CADA UM.

ECP	POLUENTE	DESCRIÇÃO
Filtro de manga	MP	Os filtros de mangas são feitos de tecido poroso ou feltro através do qual os gases são forçados a passar para que as partículas sejam removidas. Requer a seleção de um material de filtração adequado às características dos gases residuais e à temperatura máxima de operação.
Lavador de gases	MP e SO _x	As emissões são dissolvidas num líquido adequado (água ou solução alcalina). A jusante do lavador, os gases libertados são saturados com água e é necessária uma separação das gotículas antes de descarregar os gases libertados. O líquido resultante tem que receber tratamento.
Lavador de gases tipo Venturi	MP e SO _x	O Lavador tipo Venturi é concebido para utilizar a energia a partir do fluxo de entrada de gás para atomizar o líquido a ser usado para absorver e abater os poluentes. Um lavador venturi consiste em três secções: uma secção convergente, uma secção de garganta, e uma secção divergente. Partículas e remoção de gás ocorrem na secção da garganta, onde o fluxo do gás se mistura com a névoa da solução.
Precipitador Eletrostático	MP	Os precipitadores eletrostáticos funcionam de modo que as partículas são carregadas e separadas por influência de um campo elétrico. Podem funcionar numa gama variada de condições.
Pré-aquecimento do ar	NO _x	O ar de combustão passa por um pré-aquecimento, por meio de trocadores de calor, antes de ser inserido na câmara de combustão.
Recirculação dos gases de combustão	NO _x	Reinjeção dos gases do forno na chama, para reduzir o teor de oxigênio e, conseqüentemente, a temperatura da chama.
Redução catalítica seletiva (SCR)	NO _x	Redução do NO _x para nitrogênio em um leito catalítico, por meio de reação com amoníaco. Podem ser aplicadas uma ou duas camadas de leito catalítico a fim de se obter uma redução maior de NO _x .
Redução não catalítica seletiva (SNCR)	NO _x	Redução de NO _x para nitrogênio, por meio de uma reação com amônia ou ureia à alta temperatura. Para otimizar a reação, a temperatura deve ser mantida entre 900 a 1050 °C.

FONTE: CETESB (2015)

3.3 CICLO DE CARBONO DA MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL

A acumulação de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera tem sido uma das principais causas do fenômeno conhecido como aquecimento global (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO), 2003). O CO₂ é emitido em altas concentrações durante o processo de combustão.

Quando o biocombustível madeira é utilizado de maneira sustentável, no lugar de combustíveis fósseis, o impacto do CO₂ liberado na atmosfera é considerado menor, isto porque, ao queimar combustíveis fósseis, libera-se também o carbono estocado no subsolo e o transfere para a atmosfera como CO₂. A combustão da madeira, entretanto, recicla o carbono já presente no ciclo natural de carbono do vegetal, não liberando CO₂ adicional na atmosfera, desde que a floresta que forneceu a madeira utilizada como biocombustível continue sendo manejada de forma sustentável (BIOMASS ENERGY RESOURCE CENTER (BERC), 2008).

A madeira, como a maioria dos biocombustíveis, é considerada um componente ativo no ciclo global de carbono, processo este que transporta o carbono de várias maneiras ao longo dos sistemas naturais da Terra. Quantidades significativas de CO₂ são absorvidas pelas plantas, por meio da fotossíntese² e, depois, liberadas por meio da decomposição das mesmas (FAO, 2003).

Ao consumir, como biocombustível, apenas a madeira proveniente de florestas que utilizam práticas de manejo sustentáveis, entende-se que a quantidade de CO₂ emitido na combustão é a mesma que foi absorvida da atmosfera no processo de fotossíntese realizado pela planta, assumindo um balanço nulo de emissões de CO₂ e contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC), 2006).

3.4 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA COMO INDICADOR AMBIENTAL

Os indicadores, de modo geral, representam simplificada e uma realidade complexa, organizada na forma de informações quantificadas e que servem como ferramentas de avaliação e decisão, de modo a facilitar a capacidade de entendimento de determinados fenômenos ao longo do tempo (BRASIL. MMA, 2014). Os indicadores podem estar relacionados a questões sociais, econômicas, ambientais, entre outros.

Os indicadores ambientais, de acordo com o Painel Nacional de Indicadores Ambientais (BRASIL. MMA, 2014), são estatísticas que representam ou sintetizam alguns aspectos do estado do meio ambiente, dos recursos naturais e de atividades humanas relacionadas. Eles são considerados um instrumento fundamental para a

² O vegetal clorofilado absorve o CO₂ presente na atmosfera, integrando o carbono a moléculas orgânicas complexas que são então utilizados pelo próprio vegetal (FAO, 2003).

governança referente a questões ambientais, bem como para disponibilizar, a um público amplo e diversificado, informações resumidas sobre fatos, processos e tendências complexas, observáveis e mensuráveis, ainda que de forma indireta ou por aproximação.

Entre os indicadores ambientais, existem os que são referentes ao tema atmosfera e mudanças climáticas. Os mais conhecidos são as Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), por Fontes Antrópicas, que é medido em toneladas de dióxido de carbono (CO_2), gás metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), entre outros, e que pode ser apresentado na forma de dióxido de carbono equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$). Esse indicador ambiental surgiu com a preocupação relacionada ao aquecimento global, tema que ganhou visibilidade a partir da Conferência de Kyoto, em 1997, cujo objetivo foi o de conter o acúmulo de CO_2 na atmosfera, objetivando a redução do efeito estufa, e que culminou na redação do Tratado de Kyoto (COSTA, 2011). Os países signatários deste Tratado se responsabilizaram em diminuir a poluição causada pelo seu desenvolvimento socioeconômico, principalmente, o do setor industrial (VILELLA, 2007).

O Brasil oficializou o seu compromisso voluntário de redução de emissões de gases de efeito estufa, junto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, por meio da Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), na qual ficou estabelecida a meta de redução entre 36,1% e 38,9% das emissões projetadas até 2020 (BRASIL. MMA, 2016). Segundo os dados do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG) (2015), o Brasil emitiu em 2014, aproximadamente 1,56 bilhão de toneladas de gás carbônico equivalente ($\text{CO}_{2\text{eq}}$), sendo que o setor de energia emitiu 479,1 milhões de toneladas de $\text{CO}_{2\text{eq}}$, e foi a principal fonte de gases GEE, junto com o setor de mudança de uso da terra. O crescimento nas emissões do setor energético foi impulsionado, principalmente, pelo subsetor de geração de eletricidade, que teve um aumento de 23%, decorrente do acionamento de usinas termelétricas fósseis.

De acordo com o Inventário de Emissões GEE do Paraná (PARANÁ, 2014b), o setor de energia é o maior responsável pelas emissões antrópicas por gases de efeito estufa no Estado. O inventário estadual faz parte da Política Estadual de Mudança do Clima, regulamentada pelo Decreto n.º 9.085/2013.

A geração de energia, bem como outras atividades industriais, são fontes de emissões atmosféricas prejudiciais ao meio ambiente. Cârdú e Baica (1999a)

desenvolveram uma nova metodologia de avaliação do impacto ambiental das usinas termelétricas (UTE's), por meio de uma abordagem integral e levando em consideração o valor total das emissões de gases nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, como também a relação entre a quantidade desses gases e a energia útil produzido pelas referidas UTE's. Segundo a metodologia proposta pelos autores acima, define-se como eficiência ecológica o indicador que permite a avaliar de desempenho termelétrico no que tange as emissões dos gases CO₂, SO_x, e NO_x, por meio da comparação das emissões de poluentes hipoteticamente integrados com os padrões de qualidade do ar existentes.

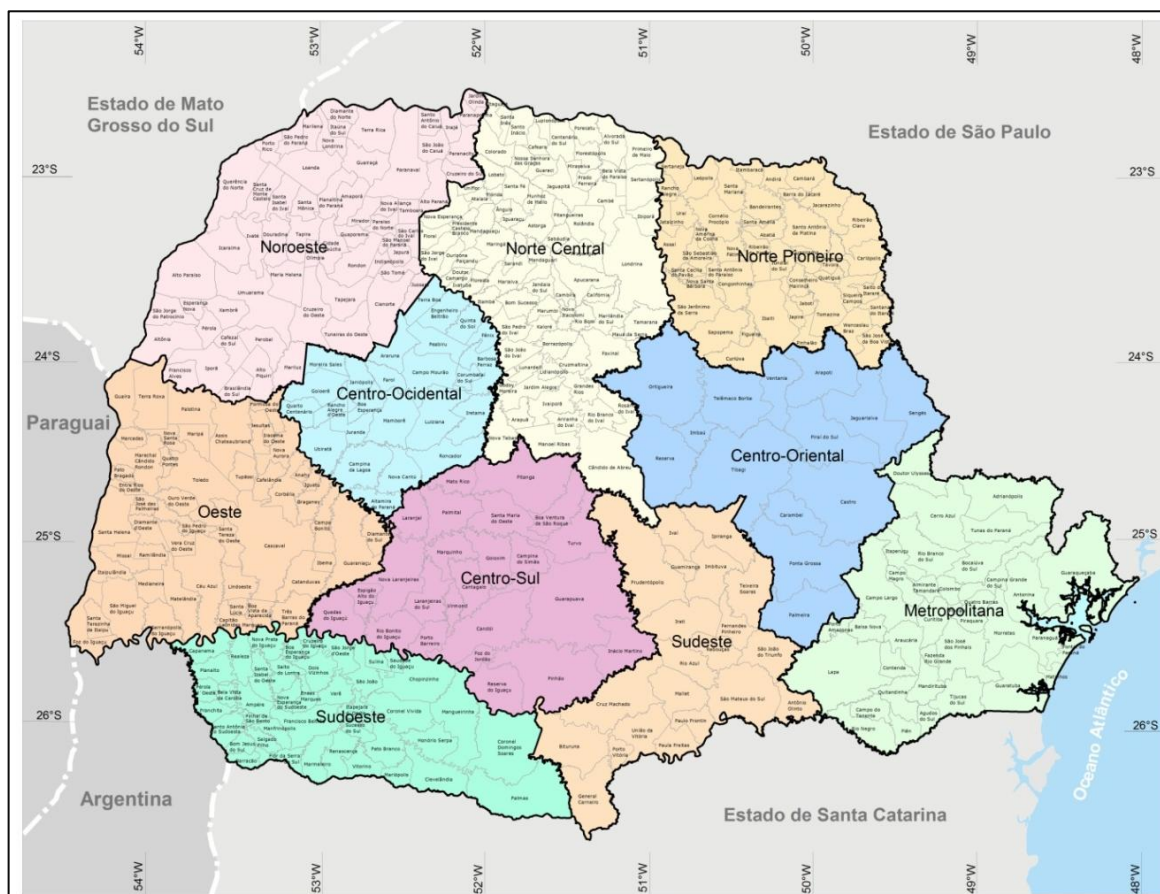
Lora e Salomon (2005) ampliaram a abrangência e o campo de aplicação da eficiência ecológica adicionando aos cálculos o efeito das emissões de material particulado, não inclusos na proposta original, possibilitando assim a aplicação do referido indicador ambiental em processos de combustão que consomem biomassa, e não apenas combustíveis fósseis, como o carvão mineral.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreendeu o Estado do Paraná, situado na Região Sul do Brasil, entre os paralelos de latitude $22^{\circ}29'30''$ e $26^{\circ}42'39''$ S e longitude $48^{\circ}02'24''$ e $54^{\circ}37'38''$ W. Com uma área de 199.880 km^2 , que corresponde a 2,35% do território brasileiro, o Paraná faz divisa, ao norte, com o estado de São Paulo; a oeste, com o estado do Mato Grosso do Sul; ao sul, com o estado de Santa Catarina; a leste, faz limite com o Oceano Atlântico; e a oeste, também faz fronteira com Paraguai e Argentina (FIGURA 1). O clima paranaense apresenta diferenças, variando de tropical úmido ao norte a temperado úmido ao sul (SANTOS et al., 2008; INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (IPARDES), 2016).

FIGURA 1 – MESORREGIÕES GEOGRÁFICAS DO ESTADO DO PARANÁ, DE ACORDO COM A LEI ESTADUAL n.º 15.825/08.



FONTE: IPARDES (2010).

Ainda de acordo com a FIGURA 1, os limites das regiões apresentados no mapa, coincidem com os limites das mesorregiões do IBGE, salvo no caso dos municípios de Palmas, Clevelândia, Honório Serpa, Coronel Domingos Soares e Mangueirinha, que foram incluídos na Região Sudoeste e não na Centro-Sul, conforme se aplica a Lei Estadual n.º 15.825/08.

O Estado do Paraná conta com uma população de aproximadamente 10.444.526 habitantes, e, em 2013, tornou-se a quarta maior economia do País, com um Produto Interno Bruto (PIB) estadual de R\$ 332,84 bilhões, a preços correntes. Este montante correspondeu a 6,3% do PIB nacional (IPARDES, 2016).

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Levantamento de dados

A base de dados utilizada no presente trabalho foi disponibilizada pelo Departamento Tecnologia Ambiental, do Instituto Ambiental do Paraná (IAP), no formato *Excel*, atualizada até o mês de fevereiro de 2015.

Os dados disponibilizados pelo IAP foram fornecidos pelos próprios empreendimentos responsáveis pelas fontes fixas monitoradas, na forma de Relatórios de Automonitoramento, conforme prevê o Art. 72, da Resolução n.º 016/2014-SEMA, e contemplando no mínimo os critérios da Portaria n.º 001/2008 do IAP (em ANEXO), que define as diretrizes para apresentação de relatórios de automonitoramento de emissões atmosféricas.

Os parâmetros a serem avaliados, e a frequência de apresentação do Relatório de Automonitoramento, bem como outros critérios a serem considerados, são definidos no Programa de Automonitoramento de cada fonte fixa.

Foram considerados os seguintes dados: o código do processo, a descrição do tipo da fonte fixa, horas trabalhadas por semana e semanas por ano, caso houvesse; o tipo de equipamento de controle de poluição, o consumo de combustível anual, a descrição do mesmo e a potência nominal instalada.

4.2.2 Tratamento dos dados

Foi necessário realizar um ajuste nos dados fornecidos pelo IAP, para se chegar ao número final de fontes fixas a serem estudadas, uma vez que existiam campos não preenchidos ou, então, preenchidos de forma inadequada para o uso das informações. Foram consideradas apenas as fontes fixas que utilizavam madeira como biocombustível. Destas, foram desconsideradas as fontes fixas identificadas como desativadas.

As fontes fixas selecionadas foram identificadas conforme metodologia empregada pelo IAP, que as separa por tipo de processo de combustão, conforme TABELA 1.

TABELA 1 – DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS, CONFORME RESOLUÇÃO n.º 016/2014-SEMA, DO ESTADO DO PARANÁ.

CÓD.	TIPOS DE PROCESSOS	SEMA/PR n.º 016/2014	DESCRIÇÃO
5	Combustão de lenha em caldeira		
6	Combustão de derivados de madeira em forno de cerâmica		
12	Combustão de biomassa diversa em caldeira	Art. 22, inciso IV	Geração de calor ou energia utilizando derivados de madeira como combustível.
18	Combustão de resíduos de madeira em caldeira		
148	Combustão de cavaco em caldeira		
165	Combustão de derivados de madeira em fornalhas		
26	Secagem de grãos	Art. 46	Para as atividades de recebimento, secagem, limpeza e expedição de produtos agrícolas não industrializados.
47	Secador de <i>chips</i> (cepilho)	Art. 48	Fabricação de Placas de Aglomerado, de MDP ou de MDF.
83	Forno de Pirólise	Art. 22	Para as fontes estacionárias com a utilização dos processos de geração de calor ou energia tais como caldeiras ou fornos.
135	Secador de Erva Mate/Chá		
140	Torrefação de folha de erva mate		
144	Sapecagem de Erva Mate		
155	Secador de Alimentos	Art. 65	Material Particulado Total

FONTE: Adaptado de PARANÁ (2014a) e IAP (2015)

O cálculo do consumo anual de madeira utilizada como combustível, nas fontes fixas do Estado do Paraná, foi realizado de acordo com o somatório dos valores de consumo total anual fornecido pelo IAP, por fonte fixa, conforme a equação (2).

$$\text{Consumo de madeira}_{total} = \sum \text{Consumo de madeira}_{processo} \quad (2)$$

Na equação, determinou-se como unidade a tonelada por ano. Os valores fornecidos em toneladas foram considerados na forma como foram preenchidos. As fontes fixas, cujo consumo total de madeira, em tonelada, estava por dia ou mês, tiveram o seu consumo convertido para ano. Tais valores foram identificados por meio da descrição do combustível fornecida pelo responsável da fonte fixa.

Os valores de consumo fornecidos em m³ foram convertidos para tonelada, por meio da equação matemática do *algoritmo do produto cruzado*, conforme também foi utilizada por Ferreira (2012). Foi considerada a densidade básica de 0,570 ton.m⁻³ (CETESB, 2009).

A madeira como biocombustível foi classificada de acordo com a nomenclatura empregada pela CETESB (2009), e o método de classificação da USEPA (2001) em: lenha (teor de umidade ≥ 20%), cavacos (teor de umidade < 20%) e lenha e cavacos.

4.2.3 Emissões atmosféricas

As emissões atmosféricas provenientes da combustão do biocombustível madeira, no Estado do Paraná, foram estimadas conforme a metodologia adotada pela USEPA (1995) e apresentada na equação 3:

$$E = A \times EF \times (1 - ER/100) \quad (3)$$

Onde:

E = emissão do poluente, em ton.ano⁻¹;

A = consumo de combustível, em ton.ano⁻¹;

EF = fator de emissão, em kg.ton⁻¹;

ER = eficiência global de redução das emissões, em função da utilização de equipamentos de controle de poluição do ar (ECP), em %.

Os fatores de emissão são valores representativos que buscam relacionar a quantidade de um poluente liberado para a atmosfera com uma atividade associada à mesma (USEPA, 2001). Foram considerados, nas estimativas, os fatores de emissão de poluentes de atividades sem controle de poluição conforme apresentado na TABELA 2.

TABELA 2 – FATORES DE EMISSÃO ATMOSFÉRICA, POR POLUENTE, REFERENTES À MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL.

FATOR DE EMISSÃO	LENHA	CAVACOS	LENHA E CAVACOS	FONTE
MP (kg.ton ⁻¹)	1,84	2,23	3,13	USEPA (2001)
NO _x (kg.ton ⁻¹)	0,75	0,75	0,75	CETESB (2015)
SO _x (kg.ton ⁻¹)	0,14	0,14	0,14	USEPA (2001)
CO (kg.ton ⁻¹)	3,35	3,35	3,35	USEPA (2001)
CO ₂ (ton.ton ⁻¹)	1,4474	1,4474	1,4474	CETESB (2009)

NOTA – Os dados da USEPA (2001) foram convertidos considerando que 1 lb/MMBtu = 4.3E-10kg/J. Foi considerado o poder calorífico inferior (PCI) de 3100 kcal.kg⁻¹ (EPE, 2015).

FONTE: Adaptado de USEPA (2001) e CETESB (2009, 2015).

As eficiências dos equipamentos de controle da poluição do ar, utilizadas nos cálculos para estimar as emissões reais no Estado do Paraná, estão descritas na TABELA 3. Elas foram definidas de acordo com os valores definidos por USEPA (2001), Lisboa e Schirmer (2007) e CETESB (2015).

TABELA 3 – EFICIÊNCIA MÉDIA DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR.

ECP	EFICIÊNCIA (%)
Câmara de sedimentação	22
Ciclone	50
Multiciclone	54
Filtro de manga	95
Lavador de gases	90
Precipitador Eletrostático	99
Ciclone/Mult + Precipitador	99
Ciclone/Mult + Filtro de Manga	99

FONTE: Adaptado de USEPA (2001), Lisboa e Schirmer (2007) e CETESB (2015).

4.2.4 Cálculo do indicador de eficiência ecológica

Dióxido de Carbono equivalente (CO₂)_e

O coeficiente de dióxido de carbono equivalente (CO₂)_e é um poluente hipotético e foi calculado a partir da razão entre a concentração máxima permitida de CO₂ e as concentrações máximas permissíveis dos poluentes MP, NO_x e SO_x no ar (TABELA 4), conforme metodologia proposta por Cârdu e Baica (1999a, 1999b), para o cálculo da eficiência ecológica. As concentrações médias dos poluentes consideradas seguiram os estudos propostos por Cârdu e Baica (1999a, 1999b) e Lora e Salomon (2005).

TABELA 4 – CONCENTRAÇÕES MÉDIAS PERMITIDAS POR POLUENTE.

POLUENTE	CONCENTRAÇÃO MÉDIA PERMITIDA EM 1h (µg.m ⁻³)
NO _x	200
SO _x	125
PM	150
CO ₂	10000

FONTE: Cârdu e Baica (1999a, 1999b) e Lora e Salomon (2005).

O coeficiente de dióxido de carbono equivalente (CO₂)_e, conforme Cârdu e Baica (1999a, 1999b) e Lora e Salomon (2005), é calculado usando a equação (4).

$$(CO_2)_e = (CO_2) + 80(SO_2) + 50(NO_x) + 67(PM) \quad (4)$$

Onde:

(CO₂)_e = Coeficiente de dióxido de carbono equivalente em kg.kg_{comb}⁻¹;

(SO₂)_e = 80(SO₂) = dióxido sulfúrico equivalente em (CO₂);

(NO_x)_e = 50(NO_x) = óxido de nitrogênio equivalente em (CO₂);

(PM)_e = 67(PM) = material particulado equivalente em (CO₂).

Do ponto de vista ambiental, o melhor combustível será aquele que apresentar a menor quantidade de carbono equivalente durante a sua queima.

Indicador de Poluição

Para quantificar o impacto ambiental da queima de um combustível, definiu-se o indicador de poluição (Π_g), conforme equação (5), indicado por Cârdu e Baica (1999a,1999b):

$$\Pi_g = (\text{CO}_2)_e / \text{PCI} \quad (5)$$

Onde:

$(\text{CO}_2)_e$ = Coeficiente de dióxido de carbono equivalente em $\text{kg.kg}_{\text{comb}}^{-1}$

PCI = Poder calorífico inferior do combustível em MJ.kg^{-1} e,

Π_g = Indicador de poluição em kg.MJ^{-1} .

Os poderes caloríficos inferiores (PCI) considerados nos cálculos são apresentados na TABELA 5.

TABELA 5 – PODER CALORÍFICO INFERIOR

PCI _{>30%} ^a	PCI _{28%} ^b	PCI _{15%} ^c	PCI _{0%} ^d	Unidade
3100	3466	3960	4600	Kcal.kg ⁻¹
12,98	14,51	16,58	19,26	MJ.kg ⁻¹

FONTE: Adaptado de ^a(EPE, 2015), ^b(PEREIRA et al., 2000; NOGUEIRA et al., 2000; QUIRINO et al., 2004) ^c(QUIRINO et al., 2004; SILVA et al., 2015) ^d(NOGUEIRA et al., 2000; QUIRINO et al., 2004; SILVA et al., 2015).

Os poderes caloríficos inferiores foram escolhidos de acordo com o teor de umidade da madeira, conforme pesquisa bibliográfica. Para madeira com teores de umidade acima de 30%, foi considerado o valor médio usado no Balanço Energético Nacional (EPE, 2015). O PCI para madeira com teor de umidade de 28% foi considerado, pois representa a umidade no ponto de saturação das fibras da madeira (PEREIRA et al., 2000; NOGUEIRA et al., 2000; QUIRINO et al., 2004). O teor de umidade de 15% refere-se ao teor de umidade de equilíbrio da madeira, sendo considerado o PCI médio para madeiras de *Eucalyptus* (QUIRINO et al., 2004; SILVA et al., 2015). Por fim, o PCI para madeira com teor de umidade a 0% representa a condição ideal de queima do biocombustível madeira por estar

absolutamente isento de umidade (NOGUEIRA et al., 2000; QUIRINO et al., 2004; SILVA et al., 2015).

Segundo Cârdu e Baica (1999a), como referência dos valores de Π_g e com o propósito de comparar com outros combustíveis, foram escolhidos dois combustíveis virtuais, sendo um considerado como muito limpo (hidrogênio puro) e $\Pi_g = 0$ e o outro extremamente poluidor (enxofre puro) e $\Pi_g = 134 \text{ kg.MJ}^{-1}$.

Eficiência ecológica

A eficiência ecológica (ε) resume em um indicador os aspectos que definem a intensidade do impacto ambiental de uma fonte geradora de calor e eletricidade, a composição do combustível, a tecnologia de combustão (indicador de poluição) e a eficiência de conversão.

Inversamente proporcional ao indicador de poluição, o valor de ε varia entre 0 e 1, sendo considerada uma situação insatisfatória, do ponto de vista ecológico, quando $\varepsilon = 0$, e uma situação ideal quando $\varepsilon = 1$. É calculado, segundo Cârdu e Baica (1990a), conforme a equação 6.

$$\varepsilon = [(0.204 \times \eta) / (\eta + \Pi_g) \times \ln(135 - \Pi_g)]^{0.5} \quad (6)$$

Onde:

ε = eficiência ecológica em %;

Π_g = indicador de poluição em kg.MJ^{-1} ;

η = eficiência de conversão dos processos em %.

Foram utilizados os valores de 20%, 40% e 60% que representam os valores de eficiência para a conversão energética de biocombustível em equipamentos de combustão, conforme Nogueira et al. (2000) e Lora e Salomon (2005).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DAS FONTES FIXAS QUE CONSOMEM MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ.

De acordo com os dados analisados, foram identificadas 1450 fontes fixas, em operação e licenciadas, que consomem madeira como biocombustível no Estado do Paraná (TABELA 6). O processo de combustão que possui o maior número de fontes fixas é o que consome a madeira na forma de lenha, como biocombustível, em caldeiras, para a geração de calor e energia. Esse processo possui quase o dobro de unidades quando comparado ao processo de secagem de grãos, segundo lugar em número de unidades entre as fontes fixas estudadas. O terceiro maior processo de combustão, em unidades de fontes fixas licenciadas no Estado, é o que possui caldeiras que podem ser alimentadas por diferentes tipos de biocombustíveis, ao mesmo tempo, como madeira e bagaço de cana-de-açúcar.

TABELA 6 – NÚMERO DE FONTES FIXAS LICENCIADAS E CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL, NO ESTADO DO PARANÁ, POR TIPO DE PROCESSO.

PROCESSO	N.º	CONSUMO (10 ³ ton.ano ⁻¹)	CONSUMO TOTAL (%)
Combustão de lenha em caldeira	436	2680,3	12,88%
Secador de grãos	265	407,1	1,96%
Combustão de biomassa diversa em caldeira	181	4922,7	23,66%
Combustão de cavaco em caldeira	155	8987,9	43,20%
Combustão de derivados de madeira em forno	149	391,3	1,88%
Combustão de derivados de madeira em fornalhas	106	458,6	2,20%
Combustão de resíduos de madeira em caldeira	76	1399,9	6,73%
Secador de erva-mate/chá	24	9,3	0,04%
Sapecação de erva-mate	23	8,5	0,04%
Secador de <i>chips</i> (cepilho)	18	1532,4	7,37%
Secador de alimentos	9	2,1	0,01%
Forno de pirólise	5	3,7	0,02%
Torrefação de folha de erva-mate	3	0,4	0,00%
TOTAL	1450	20804	100%

FONTE: A autora e adaptado de IAP (2015)

Os processos com as menores quantidades de fontes fixas, em ordem decrescente, são: secador de erva-mate/chá, sapecação de erva-mate, secador de

chips, secador de alimentos, forno de pirólise e de torrefação de folha de erva-mate, que juntos correspondem a menos de 6% das fontes fixas instaladas no Estado do Paraná, que consomem madeira como biocombustível.

Ainda, de acordo com os dados apresentados na TABELA 6, foram consumidos no Estado do Paraná, aproximadamente, 21 milhões de toneladas anuais de madeira para geração de energia térmica e/ou elétrica por meio da combustão direta em fontes fixas licenciadas. O maior consumidor foi o processo de combustão de cavacos em caldeiras, responsável por 43% do total. Já a utilização de madeira como biocombustível, exclusivamente na forma de lenha, representou aproximadamente 15%. Nos demais processos, houve o consumo tanto de lenha, cavaco e outros tipos de resíduos, representando 42% do total.

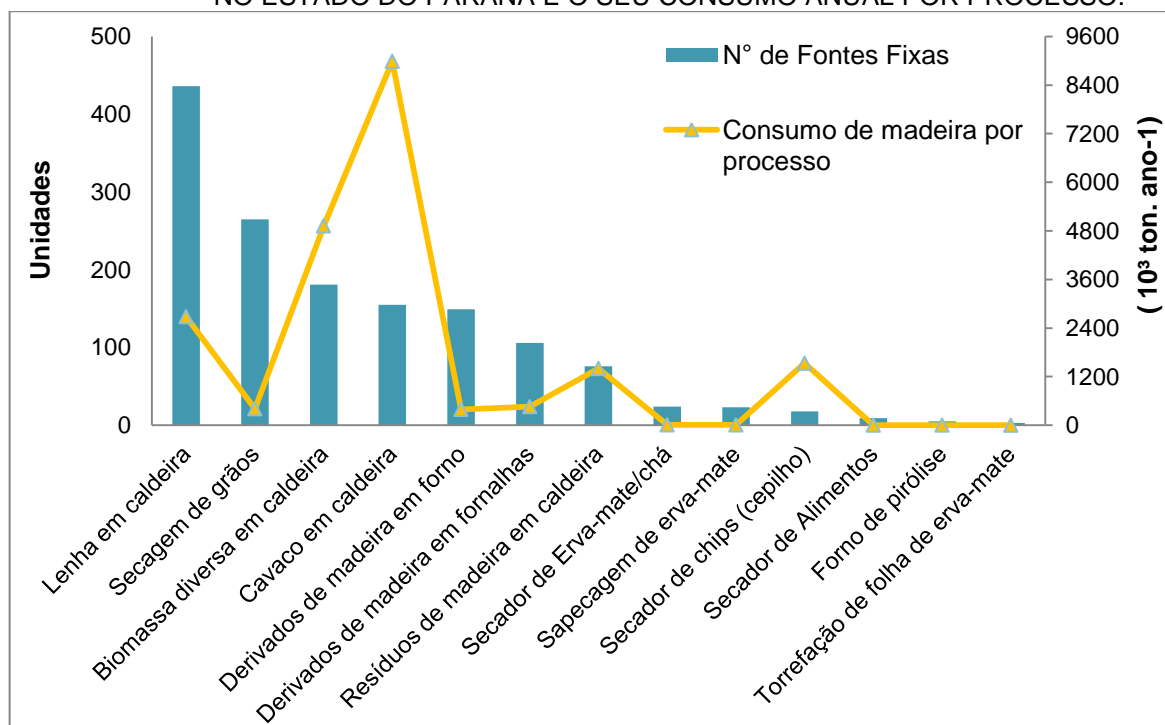
O processo de torrefação de café não foi listado na TABELA 6 por apresentar um consumo muito baixo, de aproximadamente 85 toneladas anuais de madeira, quando comparado aos demais. Nota-se que a grande maioria das fontes fixas licenciadas deste processo, 85% do total, utiliza o gás liquefeito de petróleo (GLP) como combustível.

O consumo de madeira como biocombustível no Estado do Paraná segue o padrão nacional, pois em ambos os casos o seu maior consumidor é o setor industrial. Este padrão de consumo difere da grande maioria dos países do mundo, onde o setor residencial é o maior consumidor deste biocombustível. Quando comparado a outros estados brasileiros, o setor industrial também é o principal consumidor desta fonte renovável, como acontece em São Paulo (SÃO PAULO (ESTADO). Secretaria de Energia, 2015), Santa Catarina (BAZZO et al., 2014) e Minas Gerais (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS (CEMIG), 2015). Entretanto, no Rio Grande do Sul, o maior consumidor de madeira para energia é o setor agropecuário (CAPELETTO; MOURA, 2015).

De acordo com a série histórica do consumo de madeira como biocombustível no Estado do Paraná, apresentada no BEP (COPEL, 2011), entre os anos de 2000 e 2009, os consumos referentes aos setores industrial e agropecuário dobraram de valor, enquanto que o consumo do setor residencial cresceu pouco mais do que 20%. Ainda segundo o mesmo Balanço, estima-se que a participação da madeira e derivados (cavaco e resíduos), como fonte de energia no setor industrial paranaense, ultrapasse os 40%, mesma participação no setor agropecuário, o que reforça a importância desta fonte de energia para o Estado.

Na FIGURA 2 é possível traçar um paralelo entre o número de unidades de fontes fixas por processo e a forma como a madeira está sendo consumida no Estado do Paraná. Do ponto de vista físico, 48% das fontes fixas licenciadas consomem a madeira na forma de lenha, 41% consomem lenha e/ou cavaco, e apenas 11% das unidades consomem exclusivamente cavaco como biocombustível. Entretanto, quando analisados os dados de consumo, o cavaco leva grande vantagem em relação à lenha, sendo responsável por 43% do total consumido, enquanto a lenha responde por 15%.

FIGURA 2 – NÚMERO DE FONTES FIXAS QUE UTILIZAM MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ E O SEU CONSUMO ANUAL POR PROCESSO.



FONTE: Adaptado de IAP (2015)

Nota-se que há uma tendência na substituição do consumo de lenha pelo consumo de cavaco, devido a fatores técnicos, econômicos e ambientais, justificados pelo ganho na eficiência térmica durante o processo de combustão e pela destinação energética de passivos ambientais, como os resíduos industriais. Conforme apresentado no Balanço Energético do Paraná (BEP) (COPEL, 2011), o consumo de resíduos tem apresentado tendência de crescimento no consumo, principalmente, no setor industrial. Ainda segundo o BEP, o consumo dos resíduos florestais e madeireiros, em 2009, foi superior ao ano de 2008 em 3,6%, enquanto a lenha apresentou queda de 1,4%. Os resíduos e cavacos de madeira tendem a

apresentar um poder calorífico mais alto do que o da lenha, quando comparados, contribuindo para esta substituição.

Nascimento e Biaggioni (2010) constataram que a substituição da lenha de *Eucalyptus* pelo cavaco de madeira na caldeira gerou uma redução de 21% no consumo total de energia consumido durante o processo de combustão. Miranda (2015), comparando o uso de cavaco com os demais combustíveis fósseis, para a geração de energia no setor industrial, concluiu que em relação ao custo de produção, a tonelada de vapor utilizando combustível fóssil é no mínimo 34% mais cara do que quando se utiliza o cavaco, revelando haver espaço a ser conquistado pelo biocombustível madeira no mercado de energia térmica para uso industrial, substituindo os combustíveis derivados do petróleo como o gás natural, óleo combustível, diesel e GLP.

O perfil de consumo destas fontes fixas, quanto à forma da madeira utilizada como biocombustível, apresentou uma grande variação. Os únicos processos onde quase 100% das fontes fixas declararam consumir exclusivamente lenha foram o de combustão de lenha em caldeira e o de secadores de grãos. As fontes fixas do processo de combustão de derivados de madeira em fornos e fornalhas declararam consumir além de lenha e cavacos, também, maravalhas, serragem e resíduos diversos de *Pinus* e *Eucalyptus*.

As fontes fixas do processo de combustão de biomassa diversa em caldeira declaram consumir, além de lenha e cavacos, também, resíduos madeireiros, bagaço de cana e resíduos de cereais, porém, a biomassa declarada como não sendo madeira, não foi considerada nos cálculos de consumo e das emissões atmosféricas. As fontes fixas do processo de combustão de resíduos de madeira em caldeira, como o próprio nome informa, declararam consumir os mais diversos tipos de resíduos florestais e madeireiros, como casca, serragem, costaneiras, resíduos de compensado e lâminas, além de lenha e cavacos. O processo de combustão de cavaco em caldeira, além de cavaco, contou com algumas fontes fixas que declararam consumir serragem de madeira como biocombustível.

As fontes fixas dos demais processos apresentaram um consumo parecido, declarando na sua grande maioria consumir lenha e cavaco. Uma ressalva deve ser feita aos secadores de grãos e alimentos, que foram os únicos que declararam consumir além de madeira, também energia elétrica.

Sobre o contexto econômico em que estão inseridos, de maneira geral, os processos que contém como fontes fixas as caldeiras, os fornos e as fornalhas estão localizados nos setores industrial e agropecuário. As atividades industriais que mais consomem madeira no Estado do Paraná, na forma de lenha, cavaco e/ou resíduos florestais e madeireiros, são a de papel e celulose (35%), de alimentos e bebidas (32%), cerâmica e cal, com 7% cada (COPEL, 2011). Impulsionados pelos crescentes custos dos insumos energéticos, as indústrias de grande porte tendem a se tornar cada vez mais autossuficientes quanto à geração de energia, conforme apontou o estudo realizado pela empresa de consultoria STCP (2015).

A madeira é largamente utilizada na indústria de papel e celulose, tanto como matéria-prima, como fonte energética. Em relação ao consumo de energia, muito embora seja o licor negro o biocombustível mais utilizado e não a madeira, como fonte primária de energia, a participação de fontes renováveis na matriz energética dessas indústrias pode ultrapassar os 77% (COPEL, 2011), resultando em um baixo consumo de energia elétrica proveniente da rede de distribuição. Nesta indústria, a cogeração de energia é realizada a partir do vapor gerado por caldeiras da linha e, em turbogeradores, a energia térmica é transformada em elétrica para atender a demanda da planta e a sua venda a rede, caso excedente (STCP, 2015).

Na indústria da cerâmica vermelha paranaense, os fornos mais utilizados são o do tipo abóbada (47%), seguido pelo forno caipira (23%), forno corujinha (14%), túnel (4%), Hoffman (3%) e garrafão (2%), com índices de eficiência térmica variando entre 20% e 50%. Entre os biocombustíveis utilizados por esta indústria, destacam-se a lenha, o cavaco e os resíduos madeireiros e a participação de cada um varia conforme a oferta local de energéticos (INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA (INT), 2012). Ainda, segundo o mesmo estudo, a partir do início da década de 90, com a diminuição da oferta de lenha, os biocombustíveis como a serragem, a maravalha, o bagaço de cana e a casca de arroz passaram a ganhar espaço. Porém, nos últimos anos, a lenha, proveniente de florestas plantadas, voltou a ser empregada na indústria de cerâmica paranaense, sendo estimado um consumo específico de 1,249 m³ de lenha por milheiro (INT, 2012).

A madeira, com finalidade energética, consumida pelo setor agropecuário é empregada na geração de energia térmica para secagem de grãos e aquecimento de granjas e aviários (COPEL, 2011). No Estado do Paraná, maior produtor nacional de grãos (IPARDES, 2016), a madeira na forma de lenha é o principal

biocombustível utilizado para secagem de grãos nas cooperativas agrícolas e nos produtores rurais conforme observaram Bell (2012) e Madalena, Oliveira e Rochadelli (2013).

Segundo Bell (2012), a quantidade de madeira necessária para a secagem de grãos varia em função de várias propriedades, como umidade e poder calorífico do combustível, eficiência energética da caldeira e o teor de umidade inicial do grão a ser secado. Ainda de acordo com a mesma autora, em estudo realizado em cooperativas do Paraná, a quantidade de madeira necessária para secar milho, soja e trigo é, respectivamente, de $0,078 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$; $0,043 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$ e $0,060 \text{ m}^3 \cdot \text{ton}^{-1}$.

Na produção animal paranaense, destaca-se a avicultura, segmento responsável por 29,2% do total dos abates realizados no país (IPARDES, 2016). O consumo de madeira na avicultura é considerado expressivo, pois para que o animal apresente crescimento adequado, é necessário que seja mantido o conforto térmico das aves, por meio de sistemas de aquecimento. A madeira é preferencialmente consumida como lenha, na forma de toras e pedaços (MADALENA; OLIVEIRA; ROCHADELLI, 2013).

O secador de erva-mate/chá e os processos de sapecagem de erva-mate e de torrefação de folha de erva-mate são fontes fixas que consomem madeira na forma de lenha, principalmente de *Eucalyptus* e de bracatinga. Entretanto, foi possível verificar que para esses processos, além de madeira, muitas fontes fixas ainda utilizam GLP como combustível. Os secadores e os sapecadores fazem parte do ciclo de cancheamento da erva-mate, enquanto que a torrefação faz parte do ciclo de beneficiamento do produto. Os sapecadores são equipamentos considerados simples e os secadores podem ser de esteiras ou giratórios (MACCARI JUNIOR, 2005). A erva-mate é o principal produto florestal não madeireiro por ordem de receita gerada no Estado do Paraná e a sua produção está presente em 151 municípios do Estado, com concentração na região sul (PARANÁ. Departamento de Economia Rural (DERAL), 2014).

Os secadores de *chips* (cepilho), identificados no presente trabalho, são fontes fixas de grande porte. Eles fazem parte do processo de produção de painéis particulados e OSB e podem ser de vários tipos sendo o de tambor rotativo o mais comum. De acordo com Smith (2004), aproximadamente 65% do pó de lixamento gerado durante a produção de painéis é usado como biocombustível em secadores de *chips*, entretanto, não foi possível confirmar se esta é a principal forma de

consumo nas fontes fixas localizadas no Estado do Paraná, pois apenas duas fontes fixas deste processo declararam consumir pó de madeira, as demais declararam consumir derivados de madeira, de forma genérica.

5.2 EMISSÕES ATMOSFÉRICAS PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ

5.2.1 Emissões atmosféricas totais

Com base no levantamento de dados referente às fontes fixas em operação no Estado do Paraná em fevereiro de 2015, as emissões atmosféricas totais estimadas, provenientes do consumo de madeira como biocombustível, considerando a instalação ou não de equipamentos de controle de poluição, são apresentadas na TABELA 7.

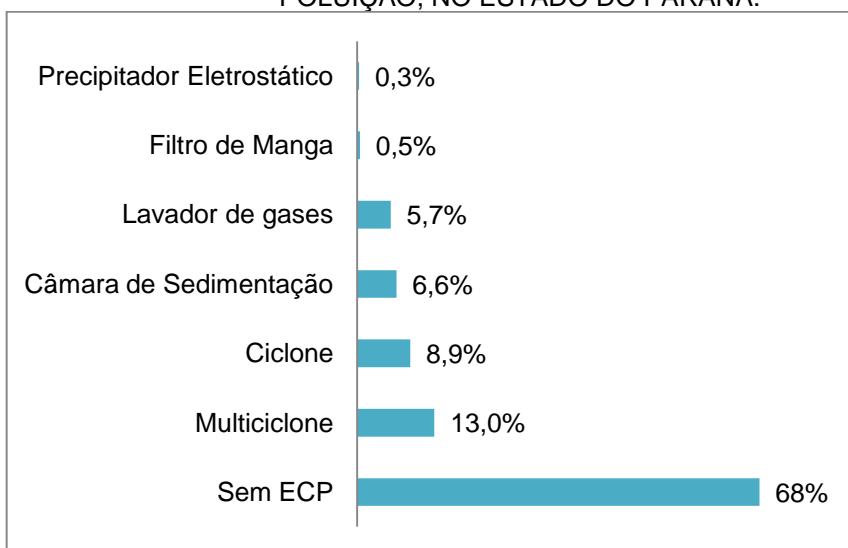
TABELA 7 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS TOTAIS PROVENIENTES DE FONTES FIXAS NO ESTADO DO PARANÁ COM E SEM EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR REFERENTES À FEVEREIRO DE 2015.

EQUIPAMENTO DE CONTROLE DE POLUIÇÃO	EMISSÕES ATMOSFÉRICAS			
	MP (ton.ano ⁻¹)	NO _x (ton.ano ⁻¹)	SO _x (ton.ano ⁻¹)	CO (ton.ano ⁻¹)
Sem ECP	53098	15603	2913	69694
Com ECP	25921	15603	2755	69694
Taxa de Redução	51%	0%	5%	0%

Comparando as emissões atmosféricas estimadas provenientes de fontes fixas de combustão, sem o uso de equipamentos de controle de poluição (ECP), com as emissões estimadas a partir de fontes fixas que possuem algum tipo de ECP instalado, é possível identificar uma redução de 51% nas emissões estaduais de material particulado, e 5% nas emissões de SO_x. Esse resultado evidencia uma maior preocupação com as emissões de material particulado (MP) em detrimento aos poluentes gasosos decorrentes da combustão do biocombustível madeira, pois a redução nas emissões é resultado direto do tipo de equipamento de controle de poluição instalado em cada fonte fixa. Não houve redução nas estimativas referentes às emissões de NO_x e CO porque não foram identificados equipamentos de mitigação para estes poluentes nas fontes fixas estudadas.

Conforme apresentado na FIGURA 3, é possível verificar que 68% das fontes fixas licenciadas, localizadas no Estado do Paraná, não possuem instalado nenhum equipamento de controle de poluição do ar. Isso revela um potencial de mitigação ainda maior a ser explorado, pois as taxas de redução de emissão dos poluentes poderiam ser igualmente maiores. A porcentagem de fontes fixas que possuem algum tipo de ECP somam 32%, pois diversas unidades possuem mais de um equipamento instalado no mesmo processo de combustão. A escolha de um equipamento, ou então, a combinação destes, deve levar em consideração fatores técnicos e econômicos, de acordo com as características do processo de combustão, como a fonte fixa emissora, a legislação a ser cumprida, a concentração dos poluentes e a eficiência na remoção destes, além de fatores de segurança como a explosividade (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

FIGURA 3 – PERFIL DAS FONTES FIXAS LICENCIADAS QUE CONSOMEM MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL, QUANTO AO USO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO, NO ESTADO DO PARANÁ.



Das fontes fixas que possuem algum tipo de ECP instalado, 29% possuem coletores mecânicos e/ou câmara de sedimentação, equipamentos menos eficientes, porém, com custos de instalação mais baixos quando comparados aos demais, e que necessitam de estruturas mais simples para o seu funcionamento. Os coletores mecânicos geralmente aparecem em maior quantidade, pois além de serem utilizados sozinhos, eles também são combinados a outros equipamentos para aumentar a eficiência na redução de poluentes nos processos de combustão (WAKELIN; BEAUCHEMIN; TAMPIER, 2008).

Os lavadores de gases (5,7% do total) podem ser utilizados, em geral, para controlar tanto poluentes gasosos como material particulado. São mais eficientes do que os multiciclones, principalmente para filtrar material particulado com tamanho abaixo de 1 μm , porém, apresentam um custo operacional elevado e a necessidade de tratamento de efluentes líquidos decorrentes do seu funcionamento (LISBOA; SCHIRMER, 2007; WAKELIN; BEAUCHEMIN; TAMPIER, 2008).

O filtro de manga, apesar das vantagens que apresenta, como a alta eficiência no controle de poluição e a possibilidade de adaptação, conforme o processo de combustão utilizado, representou apenas 0,5% entre os ECP's instalados. Foi verificado que dos sete filtros de manga instalados (TABELA 8), dois possuem também instalados lavadores de gases, e um possui também um multiciclone. A baixa porcentagem na sua utilização, em fontes fixas que consomem madeira como biocombustível, está relacionada ao risco de incêndios gerados pela emissão de partículas incandescentes, sendo recomendada a instalação de outro tipo de ECP para a remoção destas partículas. Esse ECP é indicado para processos que consomem biocombustíveis secos ou padrões de emissão muito rigorosos (NUSSBAUMER, 2010). Lora (2000) sugere, em estudo sobre caldeiras alimentadas a bagaço de cana, a utilização de fontes fixas com maior eficiência de combustão, como caldeiras de leito fluidizado, pois assim o arraste de partículas incandescentes seria minimizado, diminuindo o risco de incêndio. O autor sugere também limitar a temperatura de operação e a relação ar/pano, conforme parâmetros adotados em caldeiras a biomassa em operação nos Estados Unidos.

O precipitador eletrostático é o equipamento menos utilizado como controle de poluição e está presente em apenas cinco fontes fixas licenciadas no Estado do Paraná (TABELA 8) que declararam consumir madeira como biocombustível (0,3% do total). Apesar da alta eficiência em controlar as emissões de material particulado, e do baixo custo operacional, é um equipamento que necessita de um alto investimento e de uma grande estrutura para a sua instalação, por isso, este tipo de ECP é mais utilizado por indústrias de papel e celulose, de cimentos e química, cuja regulamentação costuma ser mais rigorosa (LISBOA; SCHIRMER, 2007).

Na TABELA 8 é possível visualizar as informações desagregadas por processos referentes aos equipamentos de controle de poluição. Em valores absolutos, a grande maioria dos ECP's está instalada em caldeiras, sendo que os processos que consomem lenha, biomassa diversa e cavaco, são os responsáveis

por 65% das fontes fixas licenciadas que possuem algum tipo de ECP. Os secadores de grãos correspondem a 10%, e as caldeiras a resíduos de madeira, correspondem a 8%. Os demais processos somam 16%, exceto no caso do forno de pirólise e do secador de alimentos, pois não foram identificados ECP's em nenhuma das fontes fixas destes processos.

TABELA 8 – NÚMERO DE EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR EM FONTES FIXAS LICENCIADAS, POR PROCESSOS, NO ESTADO DO PARANÁ.

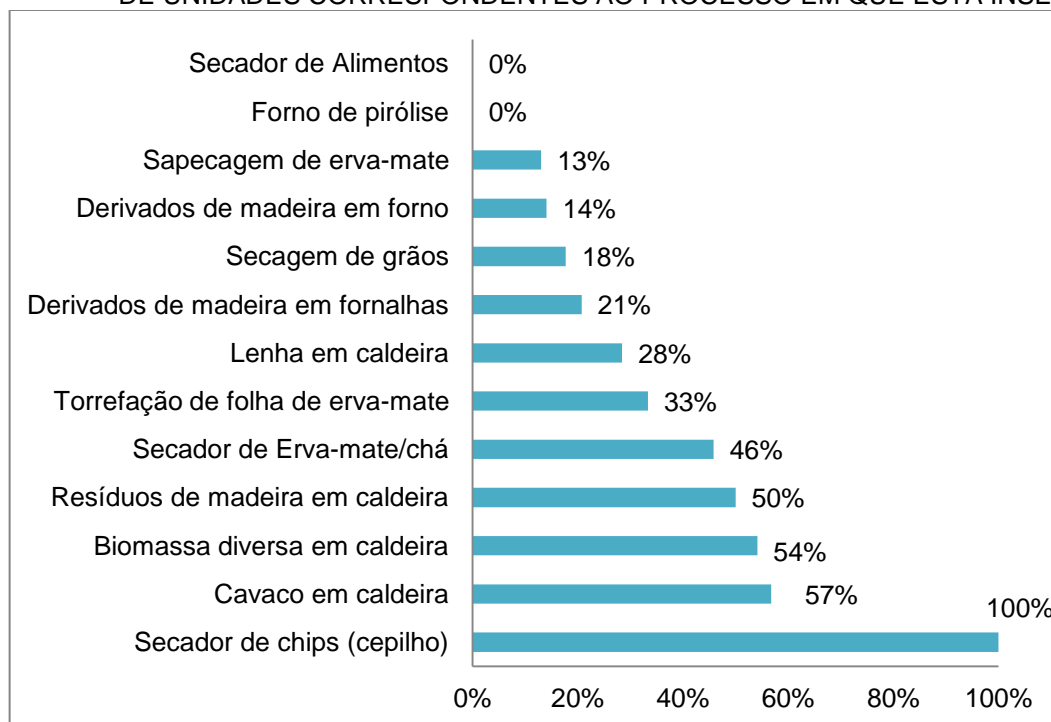
PROCESSO	EQUIPAMENTOS DE CONTROLE					
	CS	CIC	MULT	FM	ESP	LAV
Combustão de biomassa diversa em caldeira	8	20	48	2	1	28
Combustão de cavaco em caldeira	8	16	66	0	0	9
Combustão de derivados de madeira em fornalhas	17	1	2	0	1	1
Combustão de derivados de madeira em forno	18	2	2	0	0	1
Combustão de lenha em caldeira	24	33	45	1	0	28
Combustão de resíduos de madeira em caldeira	9	6	11	1	1	15
Forno de pirólise	0	0	0	0	0	0
Sapecagem de erva-mate	2	1	0	0	0	0
Secador de Alimentos	0	0	0	0	0	0
Secador de <i>chips</i> (cepilho)	1	11	6	0	1	0
Secador de Erva-mate/chá	3	8	0	0	0	0
Secagem de grãos	5	30	8	3	1	0
Torrefação de folha de erva-mate	1	1	0	0	0	0
TOTAL	96	129	188	7	5	82

NOTAS – CS: Câmara de Sedimentação; CIC: Ciclone; MULT: Multiciclone; FM: Filtro de Manga; ESP: Precipitador Eletrostático e LAV: Lavador.

Em valores relativos (FIGURA 4), o único processo que possui 100% das fontes fixas equipadas com controles de poluição do ar é o de secadores de *chips* ou cepilhos. Este processo está inserido na atividade de fabricação de placas de aglomerado, de MDP ou de MDF, e a ele se aplica padrões de emissão específicos para material particulado e substâncias gasosas orgânicas (VOC), conforme dispõe o Art. 48, da Resolução n.º 016/2014-SEMA (PARANÁ, 2014a), isto porque os secadores são uma importante fonte de emissões VOC, pois os componentes presentes na madeira são liberados com a evaporação da água (MILOTA, 2000). Os padrões de emissão de material particulado, impostos a esse processo, são mais rigorosos que os padrões especificados no Art. 22 da mesma resolução para equipamentos que gerem calor ou eletricidade utilizando madeira como

biocombustível. Entretanto, não há a previsão de padrões de emissão de CO, SO_x, NO_x e CO₂, porém, no caso de secadores de *chips*, que possuem queima direta, haverá a emissão desses poluentes gasosos, como aponta o estudo realizado pela USEPA (2002).

FIGURA 4 – PORCENTAGEM DE FONTES FIXAS, NO ESTADO DO PARANÁ, QUE POSSUEM EQUIPAMENTOS DE CONTROLE DE POLUIÇÃO DO AR EM RELAÇÃO AO TOTAL DE UNIDADES CORRESPONDENTES AO PROCESSO EM QUE ESTÁ INSERIDA.



Ainda, de acordo com a FIGURA 4, as fontes fixas de combustão que utilizam exclusivamente a madeira como biocombustível, na forma de fornos, fornalhas e caldeiras, possuem entre 14% e 57% do seu total de unidades equipadas com controles de poluição do ar. Para estas fontes fixas, os padrões de emissão variam conforme o tamanho da fonte fixa, expressa na forma da potência térmica nominal (MW) e o ano de instalação da fonte. Não há padrão de emissão de NO_x para as fontes fixas que possuem potência térmica nominal abaixo de 10 MW (PARANÁ, 2014a). As fontes fixas de combustão em caldeiras a cavaco são as que possuem a porcentagem mais alta de unidades equipadas com ECP's, provavelmente por serem fontes com data de instalação mais recente, e com padrões de emissões mais rigorosos do que os das fontes fixas que utilizam lenha como biocombustível. O mesmo pode ser atribuído às fontes fixas de combustão em caldeiras a biomassa diversa e resíduos de madeira.

As fontes fixas na forma de forno de pirólise, sapecagem de erva-mate, secador de erva-mate/chá e torrefação de folha de erva-mate se enquadram, a princípio, no Art. 22, de forma genérica, porque são processos que podem utilizar diversos tipos de combustíveis e não apenas madeira. Então, de acordo com as características de funcionamento específicas da fonte fixa licenciadas, o inciso correspondente ao combustível consumido será aplicado.

Os processos de secagem de grãos e de alimentos contam com padrões de qualidade do ar impostos para emissão de material particulado. O processo de secagem de grãos segue o padrão imposto no Art. 46, da Resolução n.º 016/2014-SEMA (PARANÁ, 2014a), entretanto fica evidente uma maior preocupação quanto à emissão de material particulado desprendido dos grãos, durante o processo de secagem, e não do material particulado proveniente da queima do combustível na fornalha, que fornece energia térmica para o processo. Foi verificado que a porcentagem de fontes fixas que possuem ECP destinado à combustão é baixa, como no caso dos secadores de grãos, e inexistente no caso dos secadores de alimentos. Porém, quando observado o número de fontes fixas que possuem ECP instalado para a captura de material particulado desprendido dos grãos, esses valores aumentam, sendo muito utilizados os filtros de tela como controle.

Além do uso de equipamentos de controle de poluição do ar nas fontes fixas poluentes, é importante salientar que a qualidade da madeira utilizada como biocombustível, a instalação de fontes fixas mais eficientes, além da potência e local de instalação, são fatores que contribuem para o controle da poluição do ar. Também é necessário conhecer o potencial contaminante de resíduos florestais e madeireiros, como biocombustível, para aplicação dos padrões de qualidade do ar específicos.

5.2.2 Emissões atmosféricas por poluente

Os resultados das emissões atmosféricas estimadas, provenientes do consumo de madeira como biocombustível, no Estado do Paraná, de material particulado (MP), óxidos de Nitrogênio (NO_x), óxidos de Enxofre (SO_x) e monóxido de carbono (CO), em toneladas, estão sumarizados por tipo de processo nas TABELAS 9 a 12.

De maneira geral, para todos os poluentes estudados, o processo que apresentou o maior potencial poluidor do ar, em valor absoluto de emissões, foi o processo de combustão de cavaco em caldeira, isso porque, esse resultado é diretamente proporcional ao consumo de biocombustível deste processo, que também foi o maior entre todos os processos estudados (TABELA 6). Entretanto, o processo que apresentou o maior potencial poluidor, em valores médios de emissões por fonte fixa, para todos os poluentes, foi o secador de *chips*, fonte fixa instalada na indústria de painel. As médias apresentadas para este processo também são o resultado do consumo de madeira para energia, pois apesar de serem apenas 18 fontes fixas identificadas durante o levantamento dos dados para este trabalho, o consumo atribuído para cada uma foi bastante elevado.

De acordo com o coeficiente de variação referente às médias de emissões de cada processo, por poluente, é possível afirmar que há uma grande heterogeneidade no que diz respeito às taxas de emissões, visto que cada processo é influenciado por uma série de fatores inerentes ao contexto técnico, econômico e geográfico em que estão inseridos. Este resultado corrobora a decisão de manter no presente trabalho todos os processos, de forma a abranger todo o universo que envolve o consumo de madeira como biocombustível no Estado do Paraná.

Material Particulado (MP)

As emissões anuais, do poluente material particulado foram estimadas em, aproximadamente, 25921 ton.ano⁻¹ (TABELA 9), segunda maior concentração entre os poluentes estudados. De acordo com o Inventário Estadual de Emissões Atmosféricas de Poluentes MP, CO, NO_x e SO_x, do Estado do Paraná (GRAUER, 2013), este valor representa 46% do total de 56505 ton.ano⁻¹ de MP emitidos por todas as fontes fixas no Estado, considerando todos os tipos de combustíveis utilizados.

TABELA 9 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS ANUAIS DE MATERIAL PARTICULADO (MP) PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ EM FONTES FIXAS.

PROCESSO	MP (ton.ano ⁻¹)	EMIÇÃO MÉDIA (ton.ano ⁻¹)	EMIÇÕES TOTAIS
Combustão de lenha em caldeira	3154,97	7,24	12,17%
Secagem de grãos	605,32	2,28	2,34%
Combustão de biomassa diversa em caldeira	5725,90	31,63	22,09%
Combustão de cavaco em caldeira	11417,20	73,66	44,05%
Combustão de derivados de madeira em forno	1193,69	8,01	4,61%
Combustão de derivados de madeira em fornalhas	398,26	3,76	1,54%
Combustão de resíduos de madeira em caldeira	1213,25	15,96	4,68%
Secador de Erva-mate/chá	24,87	1,04	0,10%
Sapecagem de erva-mate	24,87	1,08	0,10%
Secador de <i>chips</i> (cepilho)	2142,00	119,00	8,26%
Secador de Alimentos	6,55	0,73	0,03%
Forno de pirólise	11,54	2,31	0,04%
Torrefação de folha de erva-mate	0,75	0,25	0,003%
TOTAL	25920,54	17,88	100%
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO	164,72%	175,05%	164,72%

O material particulado proveniente da combustão de biomassa apresenta um grande potencial tóxico e cancerígeno (NUSSBAUMER, 2010). Esse tipo de emissão, originário de fontes fixas de combustão de biomassa, consiste em cinzas do biocombustível e de orgânicos não queimados como os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAPs), as dioxinas e os furanos (GRASS; JENKINS, 1994). As cascas costumam emitir altos valores de material particulado por conta da sua composição, onde 70% do seu peso é composto por umidade, areia e outros materiais não combustíveis. Entretanto, resíduos de madeira limpos e secos, com umidade entre 2% a 20%, emitem níveis relativamente baixos de material particulado, desde que queimados adequadamente (USEPA, 2001).

Pesquisas sobre os efeitos na saúde do material particulado tem mostrado que a composição dessas emissões é tão importante quanto o tamanho dos particulados emitidos (BERC, 2011). O tamanho das partículas provenientes de combustões eficientes da madeira, mas sem equipamentos de controle de poluição do ar, é composto em 90% ou mais, por partículas inferiores a 10 µm de diâmetro (PM₁₀) e, portanto, sendo inaláveis. E 75% é composto por partículas inferiores a 2,5

μm de diâmetro ($\text{PM}_{2,5}$) capazes de penetrar profundamente nos pulmões (NUSSBAUMER, 2003; WAKELIN; BEAUCHEMIN; TAMPIER, 2008). Os mesmos autores afirmam que o perfil do material particulado emitido por fontes fixas de combustão da madeira consideradas pequenas é bastante similar ao material particulado emitido por fontes fixas maiores.

Entretanto, segundo Nussbaumer (2003), há diferença no perfil das emissões de material particulado provenientes da combustão da madeira, de acordo com o tipo de tecnologia empregada na fonte fixa de combustão, e que a composição das cinzas possui forte influência na formação do particulado. A composição do material particulado em caldeiras com leito fluidizado tende a se apresentar como partículas finas, já em equipamentos de combustão com grelha fixa, as partículas tendem a apresentar um aumento no diâmetro médio das mesmas, ou seja, as emissões provenientes de fontes fixas de combustão modernas e de alta eficiência não são apenas mais baixas, quando comparadas a fontes fixas menos eficientes, mas também apresentam diâmetros menores (NUSSBAUMER, 2003; WAKELIN; BEAUCHEMIN; TAMPIER, 2008).

Sippula et al. (2007), comparando as emissões de material particulado provenientes de fontes fixas geradoras de calor, relataram que as emissões de material particulado total medidas antes de passarem por ECP's foram maiores nas fontes fixas de combustão que utilizam madeira do que as que utilizavam óleo combustível pesado (OCP). Porém, foi constatado que, após as emissões passarem pelo precipitador eletrostático, as concentrações de material particulado provenientes da combustão de madeira estavam no mesmo nível ou mesmo em níveis mais baixos quando comparadas as emissões provenientes da combustão de OCP.

Além do uso de ECP's, a qualidade da madeira utilizada como biocombustível é um fator importante para o controle das emissões de material particulado. Nas fontes fixas que utilizam cavaco, o teor de umidade e o teor de minerais, podem afetar essas emissões, sendo mais indicado consumir cavacos secos e "limpos" do que cavacos "sujos", que geram mais cinzas, por conta da maior presença de cascas, folhas e material contaminante do solo, como areia ou terra (BERC, 2011). Ainda, de acordo com o estudo acima, o local de estocagem e o manuseio da madeira consumida para energia, pode impactar nas emissões, pois o

material estocado a céu aberto pode ser contaminado por pedras e sujeiras não presentes inicialmente no material a ser consumido como biocombustível.

Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

O resultado total estimado para NO_x, encontrado na TABELA 10, representou 35% das emissões totais paranaenses de NO_x provenientes de fontes fixas, que foram de 44376 ton.ano⁻¹ (GRAUER, 2013). A quantidade anual estimada de emissões de NO_x, provenientes da combustão de madeira, é 40% menor do que a quantidade estimada de material particulado, e pouco superior a um quinto da quantidade estimada de CO. De acordo com o levantamento de dados realizado, não foram identificados equipamentos de controle de poluição do ar para absorção deste poluente, salvo o caso de quatro fontes fixas que declararam possuir pré-aquecimento do ar, antes da combustão.

TABELA 10 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS ANUAIS DE NO_x PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ EM FONTES FIXAS.

PROCESSO	NO _x (ton.ano ⁻¹)	EMISSÃO MÉDIA (ton.ano ⁻¹)	EMISSÕES TOTAIS
Combustão de lenha em caldeira	2010,25	4,61	12,88%
Secagem de grãos	305,35	1,15	1,96%
Combustão de biomassa diversa em caldeira	3691,99	20,40	23,66%
Combustão de cavaco em caldeira	6740,93	43,49	43,20%
Combustão de derivados de madeira em forno	293,47	1,97	1,88%
Combustão de derivados de madeira em fornalhas	343,93	3,24	2,20%
Combustão de resíduos de madeira em caldeira	1049,93	13,81	6,73%
Secador de Erva-mate/chá	6,97	0,29	0,04%
Sapecação de erva-mate	6,37	0,28	0,04%
Secador de <i>chips</i> (cepilho)	1149,31	63,85	7,37%
Secador de Alimentos	1,57	0,17	0,01%
Forno de pirólise	2,76	0,55	0,02%
Torrefação de folha de erva-mate	0,29	0,10	0,002%
TOTAL	15603,13	10,76	100%
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO %	165,07	168,74	165,06

Nussbaumer (2003) relata que a emissão de NO_x deve ser reduzida na combustão da madeira devido a sua contribuição na formação de chuva ácida e do

smog fotoquímico, apesar da sua emissão estimada ser mais baixa quando comparada as emissões de material particulado e CO. De acordo com o mesmo autor, a combustão da biomassa em fornalhas costuma emitir níveis mais altos de material particulado e NO_x, quando comparado com fornalhas a gás natural e óleo combustível leve.

Em estudo realizado sobre a análise do ciclo de vida (ACV) da combustão da madeira, foi observado que 38,6% dos impactos ambientais provenientes de fornalhas automáticas, que utilizam tecnologias modernas, são atribuídos ao NO_x, 36,5% ao MP, 2% ao CO₂, e 22,9% refere-se aos outros poluentes (NUSSBAUMER, 2003).

Nos processos de combustão, o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂), sumarizados como NO_x podem ser formados a partir de três mecanismos. O NO_x térmico e o NO_x rápido são formados a partir do nitrogênio presente no ar a altas temperaturas; e o NO_x combustível pode ser formado a partir do nitrogênio contido no combustível. No caso da biomassa, em geral, o NO_x combustível é a maior fonte de emissões de NO_x, pois o térmico e o rápido não são considerados relevantes porque o poder calorífico inferior da madeira é mais baixo, com menores temperaturas de combustão, quando comparado aos dos combustíveis fósseis (SALZMANN; NUSSBAUMER, 2001; NUSSBAUMER, 2010).

De acordo com Wakelin, Beauchemin e Tampier (2008), o teor de umidade do biocombustível influencia as emissões de NO_x, variando de 303 mg.m⁻³ para madeira úmida até 674 mg.m⁻³, para madeira seca. Também o sistema de combustão escolhido influencia nas emissões deste poluente, conforme observou Nussbaumer (2010), que fontes fixas que utilizam leito fluidizado emitem menos NO_x do que outros sistemas de combustão, pois operam com temperaturas relativamente baixas, entre 900° e 1000°C, o que limita a formação de NO_x térmico.

A temperatura da fornalha e a relação ar/combustível, ou excesso de ar, são os parâmetros que definem os métodos de controle das emissões de NO_x (PRIMO et al., 2005). Os métodos controle durante a combustão, também conhecidos como primários, de emissão de NO_x permitem uma redução de até 50% nas emissões provenientes da combustão da madeira com baixo teor de nitrogênio, e de até 80% para biocombustíveis com alto teor de nitrogênio (NUSSBAUMER, 2010).

O controle primário consiste na combustão por etapas, onde o ar secundário é inserido após a zona principal de combustão da fornalha e na recirculação de

gases. Como controle pós-combustão, ou secundário, há a redução não catalítica seletiva (SNCR) e a redução catalítica seletiva (SCR). Para fontes fixas não industriais, ou então consideradas de pequeno porte, os métodos SNCR e SCR não são indicados por conta do gerenciamento necessário dos resíduos químicos e dos efluentes destes métodos (WAKELIN; BEAUCHEMIN; TAMPIER, 2008).

Nussbaumer (2010) também recomenda, preferencialmente, o uso dos métodos de controle de NO_x primários, caso esses sejam suficientes para alcançar a redução necessária das emissões, pois os métodos de controles secundários geram concentrações significativas de ácido isociânico (HNCO), óxido nitroso (N₂O), amônia (NH₃) e cianeto de hidrogênio (HCN). Sartor et al. (2014), completam que os métodos secundários não são economicamente viáveis, na maioria dos casos, recomendando o uso dos métodos de controle primário.

Óxido de Enxofre (SO_x)

Na TABELA 11 é apresentada a quantidade anual estimada de SO_x proveniente do consumo de madeira como biocombustível, em fontes fixas.

TABELA 11 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS ANUAIS DE SO_x PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ EM FONTES FIXAS.

PROCESSO	SO _x (ton.ano ⁻¹)	EMISSÃO MÉDIA (ton.ano ⁻¹)	EMISSÕES TOTAIS
Combustão de lenha em caldeira	350,38	0,80	12,72%
Secagem de grãos	57,00	0,22	2,07%
Combustão de biomassa diversa em caldeira	616,31	3,41	22,37%
Combustão de cavaco em caldeira	1209,07	7,80	43,89%
Combustão de derivados de madeira em forno	54,78	0,37	1,99%
Combustão de derivados de madeira em fornalhas	64,05	0,60	2,33%
Combustão de resíduos de madeira em caldeira	185,04	2,43	6,72%
Secador de Erva-mate/chá	1,30	0,05	0,05%
Sapecagem de erva-mate	1,30	0,06	0,05%
Secador de <i>chips</i> (cepilho)	214,54	11,92	7,79%
Secador de Alimentos	0,29	0,03	0,01%
Forno de pirólise	0,52	0,10	0,02%
Torrefação de folha de erva-mate	0,05	0,02	0,002%
TOTAL	2754,53	1,90	100%
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO %	165,25	171,79	165,25

A quantidade total de emissões de SO_x representou apenas 6% do total de emissões deste poluente no Estado do Paraná, de 44570 toneladas anuais (GRAUER, 2013). A baixa emissão de SO_x , na combustão da madeira é resultado da baixa concentração do elemento enxofre na composição do biocombustível, considerada insignificante, quando comparada à concentração deste elemento em combustíveis fósseis, grandes fontes emissoras deste poluente.

O SO_x é o resultado da oxidação completa do enxofre contido no combustível e é emitido na forma de SO_2 e SO_3 . Porém, o enxofre contido na composição do combustível não é convertido totalmente em SO_x , porque uma fração significativa ficará contida nas cinzas, e uma fração menor será emitida na forma de um sal (K_2SO_4) ou H_2S , em baixas temperaturas. Grass e Jenkins (1994) afirmam que as emissões de SO_x provenientes da combustão da madeira como biocombustível costumam ser ignoradas pelos órgãos ambientais reguladores, conforme também foi percebido no presente trabalho, pois a Resolução n.º 016/2014- SEMA não define padrões de emissões para este poluente.

Há diversos métodos para remover o SO_x dos gases de combustão, porém para concentrações abaixo de 1000ppm, o mais comum é o lavador de gases com água contendo partículas de calcário, conforme sugerido por Grass e Jenkins (1994), Van Loo e Koppejan (2008) e Chyang et al. (2010). Neste método, é recomendado que o material particulado seja removido previamente dos gases de combustão para então passar pelo lavador de gases, sendo possível absorver não apenas o SO_x , mas também o NO_x e o HCl . Contudo, o seu uso não é muito comum em fontes fixas pequenas por ser considerado um equipamento caro, sendo instalado em larga escala em caldeiras de leito fluidizado, alimentada a carvão mineral (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008; WAKELIN; BEAUCHEMIN; TAMPIER, 2008).

Monóxido de Carbono (CO)

Na TABELA 12 é apresentada a quantidade anual estimada de CO, proveniente do consumo de madeira como biocombustível em fontes fixas. O CO apresentou a maior emissão entre os poluentes do ar estudados, sendo que o valor estimado foi, aproximadamente, 2,5 vezes maior do que a quantidade estimada de material particulado. Este valor representou 44% das emissões totais de CO no

Estado do Paraná (157791 ton.ano⁻¹), de acordo com os dados apresentados por Grauer (2013).

TABELA 12 – EMISSÕES ATMOSFÉRICAS ANUAIS DE CO PROVENIENTES DO CONSUMO DE MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL NO ESTADO DO PARANÁ EM FONTES FIXAS.

PROCESSO	CO (ton.ano ⁻¹)	EMIÇÃO MÉDIA (ton.ano ⁻¹)	EMIÇÕES TOTAIS
Combustão de lenha em caldeira	8979,11	20,59	12,88%
Secagem de grãos	1363,90	5,15	1,96%
Combustão de biomassa diversa em caldeira	16490,90	91,11	23,66%
Combustão de cavaco em caldeira	30109,49	194,25	43,20%
Combustão de derivados de madeira em forno	1310,85	8,80	1,88%
Combustão de derivados de madeira em fornalhas	1536,20	14,49	2,20%
Combustão de resíduos de madeira em caldeira	4689,67	61,71	6,73%
Secador de Erva-mate/chá	31,12	1,30	0,04%
Sapecação de erva-mate	31,12	1,35	0,04%
Secador de <i>chips</i> (cepilho)	5133,59	285,20	7,37%
Secador de Alimentos	7,01	0,78	0,01%
Forno de pirólise	12,35	2,47	0,02%
Torrefação de folha de erva-mate	1,31	0,44	0,002%
TOTAL	69693,97	48,06	100%
COEFICIENTE DE VARIAÇÃO %	165,06	168,70	165,06

A presença de CO entre os gases de combustão serve como um indicador de qualidade da combustão, pois pode ser considerado como evidência da ocorrência de uma combustão incompleta. A combustão dos compostos de carbono ocorre em duas fases. Primeiramente, o carbono é oxidado para CO para depois ser oxidado novamente até CO₂, quando a maior parte da energia contida no carbono é liberada (WAKELIN; BEAUCHEMIN; TAMPIER, 2008).

Lopes et al. (2003) explicam que o controle da combustão é importante porque visa assegurar que a mistura entre o comburente e o combustível seja realizada na dosagem e no tempo corretos, e na temperatura ideal, garantindo a queima completa do mesmo. Para os mesmos autores, porém, vários parâmetros podem levar a uma combustão incompleta, entre os principais: o excesso de ar e a temperatura de combustão. Wakelin, Beauchemin e Tampier (2008) complementam que além da falta de excesso de ar pode ocorrer o contato deficitário entre o

combustível e o ar e a redução da temperatura na zona de combustão, muito provavelmente, por conta do alto teor de umidade do biocombustível.

Quanto a melhor configuração da fonte fixa, mais uma vez, as fornalhas em leito fluidizado são as que emitem menos CO, quando comparadas as demais configurações de fontes fixas de combustão. Métodos de pós-combustão para controle de emissões de CO, não são utilizados em sistemas de energia movidos a biomassa (NUSSBAUMER, 2011).

Fontes fixas de combustão de madeira, consideradas de grande porte, geralmente tem mais opções de otimizar o processo de combustão do que fontes fixas consideradas de pequeno porte, assim, as emissões de CO costumam proporcionalmente ser mais baixas em fontes fixas de grande porte (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008).

5.3 EFICIÊNCIA ECOLÓGICA

Foram estabelecidos cenários para melhor avaliar o impacto ambiental do consumo de madeira como biocombustível, de modo a abranger todas as fontes fixas localizadas no Estado do Paraná e licenciadas pelo IAP. Os cenários foram construídos considerando como valor fixo as concentrações das emissões totais estimadas dos poluentes do ar (MP, NO_x, SO_x e CO), e variando o valor da eficiência de conversão energética (η) dos processos, o poder calorífico inferior (PCI) do biocombustível madeira, e o coeficiente de dióxido de carbono equivalente (CO₂)_e.

Na TABELA 13 são apresentados os valores do coeficiente (CO₂)_e e do indicador de poluição, com e sem o ciclo de carbono, considerando diferentes poderes caloríficos inferiores.

TABELA 13 – VALORES DO COEFICIENTE DE DIÓXIDO DE CARBONO EQUIVALENTE (CO₂)_e E INDICADORES DE POLUIÇÃO (Πg), COM E SEM O CICLO DE CARBONO (CC) DA MADEIRA COMO BIOCMBUSTÍVEL, PARA DISTINTOS PODERES CALORÍFICOS INFERIORES (PCI).

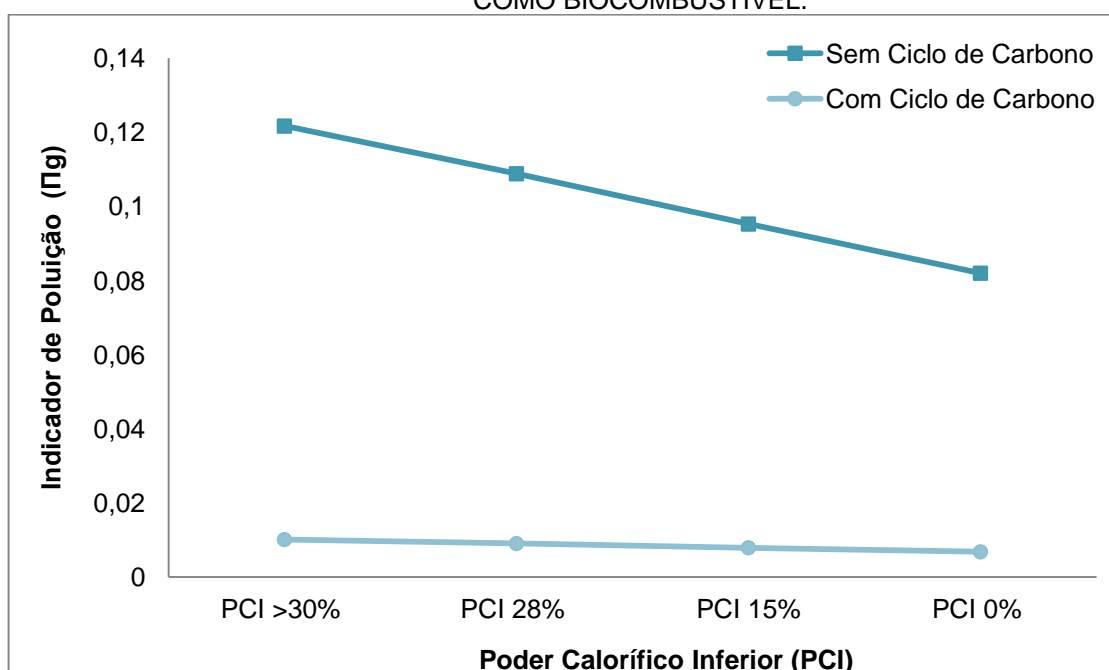
EMISSÕES TOTAIS (ET)	(CO ₂) _e (kg.kg _{comb} ⁻¹)	PCI >30%	PCI 28%	PCI 15%	PCI 0%
		Πg	Πg	Πg	Πg
ET sem CC	1,57897	0,12165	0,10881	0,09523	0,08198
ET com CC	0,13157	0,01014	0,00907	0,00794	0,00683

Comparando os valores do coeficiente de $(CO_2)_e$, com e sem o ciclo de carbono (TABELA 13), é possível verificar que este é predominante composto pela quantidade de CO_2 emitido durante o processo de combustão, uma vez que é emitido em quantidade muito superior ao material particulado, NO_x e SO_x . Quando o ciclo de carbono da madeira utilizada como biocombustível é considerado, e as emissões de CO_2 são nulas, o valor do coeficiente de $(CO_2)_e$ diminui drasticamente representando menos de 10% do valor do $(CO_2)_e$ sem o ciclo de carbono.

Na mesma tabela, os valores do indicador de poluição variaram com o poder calorífico inferior e com o ciclo de carbono. De maneira geral, os indicadores de poluição que consideraram o ciclo de carbono apresentaram melhores resultados do que os indicadores que não o consideraram. Os indicadores que utilizaram o maior poder calorífico inferior ($PCI_{0\%}$), também apresentaram os melhores resultados, pois quanto menor o valor apresentado pelo indicador de poluição melhor é o combustível do ponto de vista ambiental.

Na FIGURA 5 é possível verificar como o ciclo de carbono influencia no resultado do indicador de poluição. A diferença entre a série que considerou as emissões de CO_2 no cálculo do coeficiente $(CO_2)_e$, e a série que não considerou o CO_2 nas suas emissões, demonstra que a emissão específica de dióxido de carbono, proporcionalmente, é muito maior do que a dos demais poluentes.

FIGURA 5 – INFLUÊNCIA DO CICLO DE CARBONO NO INDICADOR DE POLUIÇÃO DA MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL.



A presença do CO₂ também parece exercer uma maior influencia conforme há a variação no poder calorífico inferior do indicador de poluição, uma vez que a série sem o ciclo de carbono apresentou uma reta com inclinação maior do que a da série com o ciclo de carbono. Quando as emissões de CO₂ são consideradas nulas, os poluentes que mais impactam o indicador de poluição são o NO_x e o material particulado. O SO_x teve um baixo impacto neste indicador por ser pouco representativo na composição química da combustão da madeira.

A decisão de considerar ou não o ciclo de carbono da madeira, no presente trabalho, surge a partir da falta de consenso sobre o assunto. Para Van Loo e Koppejan (2008), a madeira só será uma fonte neutra de CO₂, se for capaz de atingir baixos níveis de emissões provenientes da combustão incompletas, além de não utilizar combustíveis fósseis na colheita e transporte da madeira que é utilizada como biocombustível. Para tanto, os mesmos autores sugerem a realização da análise do ciclo de vida (ACV) da madeira que é consumida como biocombustível. Sedjo (2013) relatou que para vários autores, as emissões de CO₂ provenientes da madeira geralmente não são consideradas por fazerem parte do ciclo de carbono da biosfera, e por não aumentarem o valor de carbono em circulação. Porém, há o consenso sobre a origem da madeira que deve ser proveniente de florestas com manejo sustentável.

Diversos estudos sobre a análise do ciclo de vida da madeira, de maneira geral, concluem que a madeira como biocombustível gera menos emissões do que os combustíveis fósseis (FOCK; CHRISTIANSEN, 2001; BAUER, 2008; MAHALLE, 2013). De acordo com dados publicados pela BERC (2008), ao se converter um sistema de combustão a gás ou a óleo, para madeira, há uma redução entre 75% e 90% nas emissões de CO₂. Se a madeira consumida como biocombustível for proveniente de resíduos há a redução na emissão de metano, gás de efeito estufa mais poluente que o CO₂, e que seria lançado para a atmosfera, caso os resíduos ficassem sob a ação do tempo em pilhas e se decompondo.

Na TABELA 14 são apresentados os resultados da eficiência ecológica das fontes fixas, conforme a eficiência de conversão de energia dos processos de combustão.

TABELA 14 – EFICIÊNCIA ECOLÓGICA DE FONTES FIXAS QUE CONSOMEM MADEIRA COMO BIOCOMBUSTÍVEL, PARA DISTINTOS PODERES CALORÍFICOS INFERIORES (PCI).

EMISSIONES TOTAIS (ET)	η	PCI _{>30%}	PCI _{28%}	PCI _{15%}	PCI _{0%}
ET sem CC	20%	0,7887	0,8049	0,8232	0,8424
	40%	0,8758	0,8868	0,8989	0,9112
	60%	0,9120	0,9202	0,9292	0,9382
ET com CC	20%	0,9759	0,9784	0,9810	0,9836
	40%	0,9878	0,9891	0,9905	0,9918
	60%	0,9919	0,9928	0,9937	0,9946

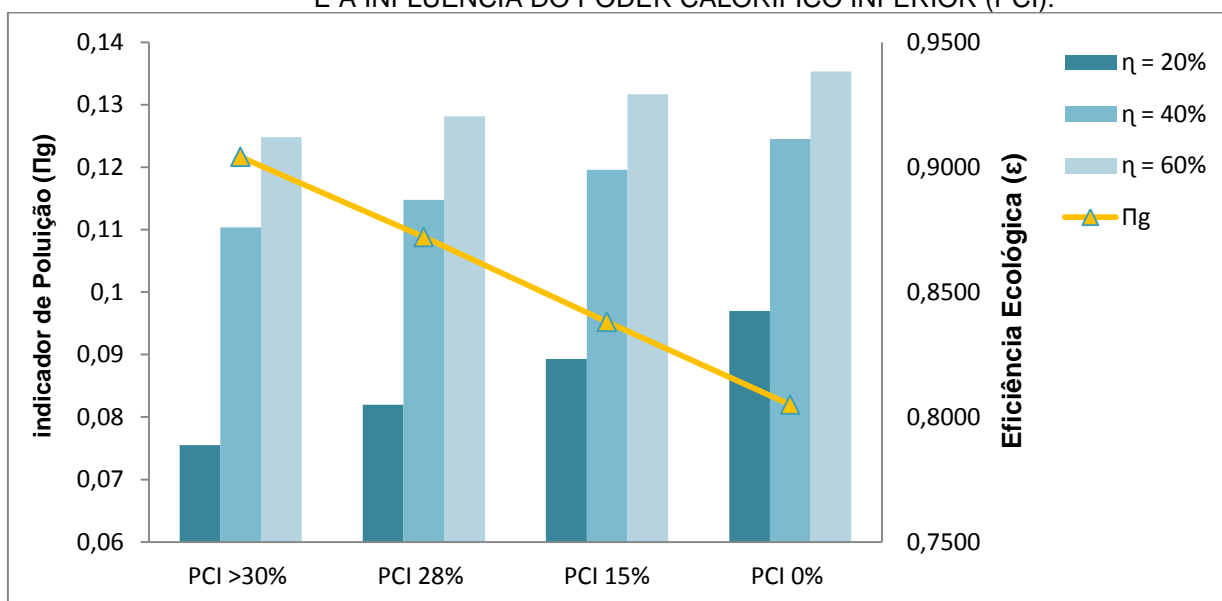
Na tabela acima é possível verificar que a eficiência ecológica varia com o aumento da eficiência de conversão do processo de combustão. De acordo com os valores apresentados, a melhor eficiência ecológica (99,46%) foi obtida no sistema de combustão que considera como biocombustível madeira 100% proveniente de florestas plantadas e com manejo sustentável, completamente seca (PCI _{0%}), e em processo de conversão térmica com eficiência de 60%. O pior cenário estudado foi o que apresentou a menor eficiência ecológica (78,87%), isto considerando como biocombustível madeira proveniente de florestas sem indicativos de sustentabilidade, por exemplo, de desmatamento, com teor de umidade acima de 30%, e equipamento de combustão pouco eficiente, com 20%. Porém, o menor valor encontrado para ϵ , encontra-se acima do valor crítico aceitável de eficiência ecológica ($\epsilon = 0,5$), conforme adotado por Villela (2007).

A eficiência ecológica encontrada para outros tipos de combustíveis foi menor do que a encontrada para a madeira no presente trabalho. Lora e Salomon (2005) chegaram ao valor de $\epsilon = 0,877$ para carvão mineral, considerando $\eta = 40\%$, e $\epsilon = 0,974$ e $0,996$ para cana-de-açúcar, outra fonte renovável, com $\eta = 25\%$ e 70% , respectivamente, considerando o ciclo de carbono da matéria-prima. A eficiência ecológica dos combustíveis fósseis costuma ser mais baixa, porque apesar de apresentarem uma eficiência de conversão térmica maior, as fontes fósseis costumam ser mais poluidoras do que os biocombustíveis, como é o caso do carvão mineral que possui um alto teor de cinzas gerado na sua combustão. Coronado et al. (2010), encontraram eficiências ecológicas para o combustível gás natural entre 85% e 90% ($\eta = 25\%$) e entre 90% e 95% ($\eta = 40\%$). O gás natural é conhecido por

ser o combustível gasoso menos poluente entre os fósseis e com valores para ϵ próximos ou até superiores aos dos biocombustíveis. Entretanto o caráter não renovável desta fonte de energia deve ser levado em consideração quando considerado os termos ambientais e sustentáveis.

Na FIGURA 6 é possível visualizar como o poder calorífico inferior influencia no indicador de poluição e na eficiência ecológica. A variação no PCI, considerado nos cálculos do indicador de poluição (Πg), foi estabelecida com o intuito de avaliar o efeito da umidade no impacto ambiental do biocombustível madeira. O valor do PCI é inversamente proporcional ao valor do indicador de poluição e, este por sua vez, é inversamente proporcional à eficiência ecológica. Sendo assim, notou-se que em todos os cenários comparados, quanto maior o PCI, menor o indicador de poluição e melhor a eficiência ecológica do biocombustível. Também é possível verificar a relação diretamente proporcional entre a eficiência de conversão energética de um processo de combustão e a eficiência ecológica do biocombustível.

FIGURA 6 – RELAÇÃO ENTRE O INDICADOR DE POLUIÇÃO (Πg) E A EFICIÊNCIA ECOLÓGICA E A INFLUÊNCIA DO PODER CALORÍFICO INFERIOR (PCI).



Com base nos resultados obtidos com a variação do poder calorífico inferior (PCI), é possível afirmar que o teor de umidade tem um papel relevante no que tange o impacto ambiental dos biocombustíveis. Isto porque, quanto maior o teor de umidade do material a ser consumido para a geração de energia, menor será o seu PCI e maior será o seu consumo. Altos teores de umidade no biocombustível

também dificultam que altas temperaturas sejam alcançadas dentro das câmaras de combustão. A madeira, por vezes necessita de uma temperatura superior a 850°C para que gere baixas quantidades de CO, caso contrário ocorrerá uma combustão incompleta resultando em altas emissões de CO (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008). O teor de umidade na madeira consumida como biocombustível possui uma grande variação. Resíduos provenientes da indústria madeireira podem ter 10% de umidade ou menos, enquanto que a madeira recém-cortada e os resíduos florestais podem conter 60%, ou mais, de umidade.

A eficiência de conversão energética também é um fator preponderante na redução dos impactos ambientais, pois quanto maior for a eficiência de conversão energética de uma fonte fixa, menor será a quantidade de biocombustível consumido, para gerar eletricidade e calor, resultando, por sua vez, em menores emissões atmosféricas. O tamanho e a forma do biocombustível, e a seleção da fonte fixa de combustão estão entre os fatores que influenciam na eficiência energética.

A madeira, geralmente, por ser um combustível sólido, apresenta uma menor eficiência na queima quando comparada aos combustíveis gasosos. Em fontes fixas de pequeno porte, o tamanho do biocombustível tem uma influência mais discreta, pois a madeira é consumida principalmente na forma de toras com casca e, por ter diversos tamanhos, há uma variação na área da superfície de contato do biocombustível com a chama. Já em fontes fixas de grande porte, com alimentação automática, o tamanho do biocombustível possui uma maior influência, sendo necessário o uso de picadores para reduzir o tamanho do material, transformando-o em cavacos e tornando o biocombustível mais homogêneo.

A eficiência das fontes fixas e dos sistemas de combustão são elementos-chave na conversão energética dos biocombustíveis (GRASS; JENKINS, 1994). Preferencialmente, os sistemas de conversão energética deveriam selecionar fontes fixas de alta eficiência e ser baseado nos valores de calor e/ou potência necessários (BERC, 2011). O teor de umidade do biocombustível a ser consumido, bem como os padrões de emissões de NO_x, também devem ser considerados durante a escolha da fonte fixa de combustão a ser instalada. Os processos de controle também devem ser programados para otimizar a combustão buscando a minimização das emissões e maximizar a eficiência térmica do processo de combustão.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os processos que possuem as maiores quantidades de fontes fixas que utilizam o biocombustível madeira no Estado do Paraná são: combustão de lenha em caldeira, secador de grãos, combustão de biomassa diversa em caldeira, combustão de cavaco em caldeira, combustão de derivados de madeira em forno e fornalhas e combustão de resíduos de madeira em caldeira.

Os processos que possuem as menores quantidades de fontes fixas que utilizam o biocombustível madeira no Estado do Paraná são: secador de erva-mate, sapecagem de erva-mate, secador de *chips* (cepilho), secador de alimentos, forno de pirólise e torrefação de folha de erva-mate.

A maioria das fontes fixas de combustão da madeira localizadas no Estado do Paraná consome exclusivamente lenha.

O consumo anual de madeira como biocombustível no Estado do Paraná é de 20,804 milhões de toneladas, e as principais formas de consumo são: lenha, cavacos e resíduos florestais e madeireiros, como a serragem.

O maior consumo de madeira como biocombustível, em toneladas anuais, ocorre na forma de cavacos.

As maiores concentrações estimadas, entre os poluentes estudados, foram as de monóxido de carbono (CO) e as de material particulado.

As menores concentrações estimadas, entre os poluentes estimados, foram as de óxido de nitrogênio (NO_x) e as de óxidos de enxofre (SO_x).

Não foram identificados equipamentos de controle de poluição do ar (ECP) em 68% das fontes fixas licenciadas no Estado do Paraná. Nas que possuem ECP, os mais utilizados são os coletores mecânicos e os lavadores de gases. Os precipitadores eletrostáticos e aos filtros de manga são os ECP's menos utilizados.

O aumento no número de fontes fixas com equipamentos de controle de poluição do ar reduziria a concentração das emissões atmosféricas provenientes da combustão da madeira como biocombustível.

Todas as fontes fixas em operação, que consomem a madeira como biocombustível, deveriam possuir algum tipo de equipamento de controle de poluição do ar instalado para a captação de material particulado.

O indicador de eficiência ecológica para o biocombustível madeira no Estado do Paraná variou entre 78,87% (sem ciclo de carbono) e 99,46% (com ciclo de carbono), valores mais baixo e mais alto, respectivamente.

O poder calorífico inferior influencia a eficiência ecológica do biocombustível madeira. Quanto maior o teor de umidade do biocombustível madeira, menor a eficiência ecológica do mesmo.

A eficiência de conversão energética do processo de combustão influencia diretamente na eficiência ecológica do biocombustível madeira.

A utilização de fontes fixas mais eficientes diminuiria a combustão incompleta e reduziria a concentração das emissões atmosféricas provenientes da combustão da madeira como biocombustível.

REFERÊNCIAS

ASSUNÇÃO, J. V.; HASEGAWA, P. T. **Geração Termelétrica com Turbinas a Gás Natural e seu Impacto na Qualidade do Ar**. Workshop: “Geração Termelétrica a Gás Natural”, promovido pelo IBAMA e PETROBRAS, Porto Alegre, RS. 2001.

BAUER, C. **Life Cycle Assessment of Fossil and Biomass Power Generation Chains**. Villigen: PSI, 2008.

BAZZO, E.; HILA, F.; OBA, R.; POSSAMAI, T. S. **Balço Energético de Santa Catarina: setor industrial: ano base 2006-2012**. Florianópolis: UFSC/LabCET, 2014.

BELL, R. A. de O. **Demanda de Lenha para secagem de grãos no Estado do Paraná**. 152 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BIOMASS ENERGY RESOURCE CENTER. **Carbon Dioxide & Biomass Energy**. 2008. Disponível em: < <https://goo.gl/gTBp8E>>. Acesso em: 25 abril 2016.

BIOMASS ENERGY RESOURCE CENTER. **Particulate matter emissions-control options for Wood Boiler Systems**. Montpelier, 2011. Disponível em: <http://www.biomasscenter.org/images/stories/FSE_PM_Emissions.pdf>. Acesso em: 10 maio 2016.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição**: República Federativa do Brasil. Brasília, DF: Senado Federal, 1988.

BRASIL. Decreto - lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a política nacional do meio ambiente, seus afins e mecanismo de formulação e aplicação, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**. Brasília, DF, 1981.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Fontes Fixas - Poluição Ambiental**. Disponível em: < <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/fontes-fixas> >. Acesso em: 15 dez. 2015b.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Padrões de Qualidade do Ar**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosfericos>>. Acesso em: 15 dez. 2015a.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **PNIA 2012 - Painele Nacional De Indicadores Ambientais. Referencial teórico, composição e síntese dos indicadores da versão-piloto**. Brasília: Equipe do Sistema Nacional de Informações sobre Meio Ambiente, 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Política Nacional sobre Mudança do Clima**. Disponível em: <<http://mma.gov.br/clima/politica-nacional-sobre-mudanca-do-clima>>. Acesso em: 20 abril 2016.

CANTO, J. L. do. **Colheita mecanizada de biomassa florestal para energia**. 121 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CAPELETTO, G. J. MOURA, G. H. Z. DE **Balanco Energético do Rio Grande do Sul 2015: ano base 2014**. Porto Alegre: Grupo CEEE / Secretaria de Minas e Energia do Rio Grande do Sul, 2015.

CÂRDU, M., BAICA, M. Regarding a new variant methodology to estimative globally the ecologic impact of thermopower plants. **Energy Conversion and Management**. v. 40, n. 14, p. 1569-1575, 1999b.

CÂRDU, M.; BAICA, M. Regarding a global methodology to estimative the energy-ecologic efficiency of thermopower plants. **Energy Conversion and Management**. v. 40, n. 1, p. 71-87, 1999a.

CAVALCANTI, P. M. P. S. **Modelo de Gestão da Qualidade do Ar - Abordagem Preventiva e Corretiva**. 252 f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

CHYANG, C.S., HAN, Y.L., WU, L.W., WAN, H.P., LEE, H.T., CHANG, Y. H. An investigation on pollutant emissions from co-firing of RDF and coal. **Waste Manage**. v.30, n.7. p. 1334–1340, 2010.

CLEMENTE, D. A. **Estudo de Impacto Ambiental das Fontes Industriais de Poluição do Ar no Município de Paulínia – S.P. Empregando Modelo ISCST3**. 179 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2000.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Inventário de emissões das fontes estacionárias do estado de São Paulo - Manual de Preenchimento**. São Paulo: CETESB, 2009.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Plano de redução de emissões de fontes estacionárias. Guia de melhor tecnologia prática disponível - fontes de combustão**. São Paulo, 2015.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Qualidade do ar no Estado de São Paulo 2012**. São Paulo: CETESB, 2013.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **29º Balanco Energético do Estado de Minas Gerais - BEEMG 2014: ano base 2013**. Belo Horizonte: Cemig, 2015.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **Balanco Energético do Paraná 2010 – Ano base 2009**. Curitiba: COPEL, 2011.

CORONADO RODRIGUEZ, C. J.; LEAL, E. M.; VILLELA I. A. de C.; SILVEIRA, J. L. Ecological efficiency in CHP: biodiesel case. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 5, p. 458–463, 2010.

COSTA, A. A. S. **Caracterização de Motor Aeronáutico utilizando Misturas de Gasolina de Aviação e Etanol: Aspectos Fluidodinâmicos, Termodinâmicos e Ecológicos**. 178f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

EISFELD, R. L.; NASCIMENTO, F.A.F. **Mapeamento dos Plantios Florestais do Estado do Paraná – Pinus e Eucalyptus**. Curitiba: Instituto de Florestas do Paraná, 2015.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2010: Ano base 2009**. Rio de Janeiro: EPE, 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro: EPE, 2015.

FELLENBERG, G. **Introdução aos Problemas da Poluição Ambiental**. 5a Ed. São Paulo: Editora Pedagógica e Universitária. 2007.

FERREIRA, M. C. C. **Consumo Doméstico de Biomassa Lenhosa e Emissões Atmosféricas na Cidade de Bragança**. 82 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental). Escola Superior Agrária de Bragança, Bragança, 2012.

FOCK, M.W.; CHRISTIANSEN, H.F. Life cycle assessment of procurement and conversion of biomass and fossil fuels - used for energy production in Denmark 1997. In: World conference on biomass for energy and industry, 1., 2000, Sevilla. **Proceedings of the conference held in Sevilla**, v. 1, 2001, p. 1105.

FONTES, A. A. **A Cadeia Produtiva da madeira pra Energia**. 134 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Programa de Pós Graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Forests and climate change – Instruments related to the united nations framework convention on climate change and their potential for sustainable forest management in Africa**. Rome, 2003.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energy, environment and development**. 2^a ed. London: Earthscan, 2010.

GRASS, S. W.; JENKINS, B. M. Biomass fueled fluidized bed combustion: Atmospheric emissions, emission control devices and environmental regulations. **Biomass and Bioenergy**, v. 6, n. 4, p 243-260, 1994.

GRAUER, A. **Inventário estadual de emissões atmosféricas de poluentes (MP, CO, NO_x, SO_x) e proposta para revisão e ampliação da rede de monitoramento da qualidade do ar do Estado do Paraná**. Curitiba: IAP, 2013.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M.; REIS, L. B. dos. Energia e meio ambiente. In: _____. **Poluição do ar e uso de energia**. 5a Ed. São Paulo: Cengage Learning, 2014.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Ibá 2015**. São Paulo, 2015.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Base de dados de fontes licenciadas no Estado do Paraná**. Curitiba, 2015. Em fase de elaboração.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisas agropecuárias**. v. 06, p. 86. Rio de Janeiro: IBGE, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Produção da extração vegetal e silvicultura 2014**. Coordenação de Agropecuária. v. 29, p. 56. Rio de Janeiro: IBGE, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE TECNOLOGIA. **Panorama da Indústria de Cerâmica Vermelha no Brasil**. Rio de Janeiro, 2012

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Paraná em números**. Disponível em: http://www.ipardes.gov.br/index.php?pg_conteudo=1&cod_conteudo=1>. Acesso em: 15 jan. 2016

INSTITUTO PARANAENSE DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Regiões Geográficas (Lei Estadual 15.825/08) - Paraná**. 2010. Disponível em: <http://www.ipardes.gov.br/pdf/mapas/base_fisica/mesorregioes_geograficas_base_2010.jpg>. Acesso em: 15 jan. 2016

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Stationary combustion. In: EGGLESTON, H.S., BUENDIA, L., MIWA, K., NGARA, T., TANABE, K. (Ed.). **IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Hayama: IGES, 2006.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Key Renewable Trends: excerpt from renewables information**. Paris, 2015.

LISBOA, H. de M.; SCHIRMER, W. N. Metodologia de controle da poluição atmosférica. In: **Controle da poluição atmosférica**. 1^a ed. Montreal. 2007.

LOPES, R. P.; OLIVEIRA FILHO, D.; DONZELES, S. M. L. Controle da combustão em fornalhas a lenha. In: **Encontro De Energia No Meio Rural**, Campinas, v 3, 2003.

LORA, E. E. S.; SALOMON, K. R. Estimate of ecological efficiency for thermal power plants in Brazil. **Energy Conversion and Management**, v. 46, n. 7–8, p. 1293–1303. 2005

LORA, E. S. **Controle da poluição do ar na indústria açucareira**. Itajubá: STAB, 2000.

MACCARI JUNIOR, A. **Análise do pré-processamento da erva-mate para chimarrão**. 199f. Tese (Doutorado em Tecnologia Pós Colheita). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas), Campinas, 2005.

MADALENA, L. C. de S.; OLIVEIRA, A. F. de, ROCHADELLI, R. **Lenha: o dendrocombustível na avicultura de corte**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, v. 2, p. 48-60, 2013.

MAHALLE, L. **Comparative life cycle assessment of pellet, natural gas, and heavy fuel oil as heat energy source**. Vancouver: FP Innovations, 2013.

MILOTA, R. **Emissions from wood drying –The Science and the Issues**, 2000. Disponível em: < <http://goo.gl/pbDCMb> >. Acesso em: 20 de maio 2016.

MIRANDA, M. A. da S. **Potencial da Biomassa Florestal para Produção de Energia Térmica Industrial**. 48f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Programa de Pós-graduação em Ciência Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

MOHAN, M.; BHATI, S.; GUNWANI, P.; MARAPPU, P. Emission Inventory of Air Pollutants and Trend Analysis Based on Various Regulatory Measures Over Megacity Delhi. In: BADILLA, G. L.; VALDEZ, B.; SCHORR, M. (Ed.). **Air Quality - New Perspective**. 2012.

NASCIMENTO, M. D do; BIAGGIONI, M. A. M.. Avaliação energética do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria seropédica. **Revista Energia na Agricultura**. Botucatu, v. 25, n.3, p.104-117, 2010.

NOGUEIRA, L.A. H.; LORA, E.S.; TROSSERO, M.A.; FRISK, T. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. 1ª ed, Editora Interciência, 2000.

NUSSBAUMER, T. Characterisation of particles from wood combustion with respect to health relevance and electrostatic precipitation. **Central European Biomass Conference**, 26th-29th January, 2011.

NUSSBAUMER, T. Combustion and Co-combustion of Biomass: Fundamentals, Technologies, and Primary Measures for Emission Reduction. **Energy & Fuels**, v. 17, n. 6, p. 1510-1521, 2003.

NUSSBAUMER, T. **Overview on Technologies for Biomass Combustion and Emission Levels of Particulate Matter**. Zürich, 2010.

PARANÁ. Departamento de Economia Rural. **Produtos Florestais - Erva-mate**. 2014. Relatório.

PARANÁ. Instituto ambiental do Paraná. Procedimento operacional padrão – POP n° 010, de julho de 2008. Dispõe sobre a produção de cavacos. **Instituto Ambiental do Paraná**. Curitiba, 2008.

PARANÁ. **Inventário de emissões GEE do Paraná**. Curitiba. 2014b.

PARANÁ. Secretário de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Resolução 016 (2014). **Diário Oficial do Estado**, Curitiba, PR, n. 9187, p. 48, 15 de abr. 2014a.

PEREIRA, J. C. D.; STURION, J. A.; HIGA, A. R.; HIGA, R. C. V.; SHIMIZU, J. Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, p. 113, 2000.

PIRES, D. O. **Inventário de emissões atmosféricas de fontes estacionárias e sua contribuição para a poluição do ar na região metropolitana do Rio de Janeiro**. 188 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

PRIMO, K. R.; SALOMON, K. R.; TEIXEIRA, F. N.; LORA, E. S. Estudo da dispersão atmosférica dos óxidos de nitrogênio (NO) emitidos durante a queima de bagaço em uma usina de açúcar. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 2, n. 1, p. 79-90, 2005.

QUIRINO, W. F.; VALE, A. T.; ANDRADE, A. P. A.; ABREU, V. L. S.; AZEVEDO, A. C. S. Poder calorífico da madeira e de resíduos ligno-celulósicos. **Biomassa & Energia**, v. 1, n. 2, p. 173-182, 2004.

SALZMANN, R.; NUSSBAUMER, T. Fuel Staging for NO_x Reduction in Biomass Combustion: Experiments and Modeling. **Energy Fuels**. v. 15, n. 3, p. 575–582, 2001.

SANTANA, E.; CUNHA, K. B. da; FERREIRA, A. L.; ZAMBONI, A. **Padrões de qualidade do ar: experiência comparada Brasil, EUA e União Européia**. São Paulo: Instituto de Energia e Meio Ambiente, 2012.

SANTOS, H. G.; BHERING, S. B.; BOGNOLA, I. A.; CÚRCIO, G. R.; MANZATTO, C. V.; CARVALHO JÚNIOR, W.; CHAGAS, C. S.; ÁGLIO, M. L. D e SOUZA, J. S.. Distribuição e Ocorrência dos Solos no Estado do Paraná. In: SANTOS, H. G. e BHERING, S. B. **Mapa de Solos do Estado do Paraná: Legenda Atualizada**. Rio de Janeiro, RJ, 2008. p. 51 – 74.

SARTOR, K.; RESTIVO, Y.; NGENDAKUMANA, P.; DEWALLEF, P. Prediction of SO_x and NO_x emissions from a medium size biomass boiler. **Biomass and Bioenergy**, v. 65, p. 91-100, 2014.

SÃO PAULO (ESTADO). Secretaria de Energia. **Balanço Energético do Estado de São Paulo 2015: Ano Base 2014**. São Paulo: Secretaria de Energia, 2015.

SEDJO, R. A. Comparative Life Cycle Assessments: Carbon Neutrality and Wood Biomass Energy. **Discussion Paper**, v. RFF DP 13-11, 2013.

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

SILVEIRA, L. U. da. **Poluição atmosférica em região limítrofe dentro da cidade de Curitiba**. 97f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, Curitiba, 2010.

SIPPULA, O.; HOKKINEN, J.; PUUSTINEN, H.; YLI-PIRILÄ, P.I; JOKINIEMI, J. **Fine Particle Emissions from Biomass and Heavy Fuel Oil Combustion without Effective Filtration (BIOPOR)**. Finland: VTT Technical Research Centre of Finland, 2007.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA. **Queda no desmatamento não derruba emissões**. 2015. Disponível em: < <https://goo.gl/FvQWRf> >. Acesso em: 28 maio 2016.

SMITH, D. C. The generation and utilization of residuals from composite panel products. **Forest Products Journal**, v. 54, n.2, p. 8-17, 2004.

STCP Engenharia de Projetos Ltda. **Oportunidades para florestas energéticas na geração de energia no Brasil**. Curitiba:STCP, 2015. Relatório Final.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016

UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE. **Updated Handbook for the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution and its Protocols**. Geneva: United Nations Publication, 2015.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Compilation of air pollutant emission factors (AP-42) Volume 1, Fifth Edition**, US Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC, 1995.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Compilation of air pollutant emission factors (AP-42). Section 1.6 Wood Residue Combustion In Boilers**. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards, U.S, Research Triangle Park, 2001.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Compilation of air pollutant emission factors (AP-42). Section 10.6.3 Medium Density Fiberboard Manufacturing**. Environmental Protection Agency. Office of Air Quality Planning and Standards, U.S, Research Triangle Park, 2002.

VAN LOO, S.; KOPPEJAN, J. **The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing**. London: Earthscan, (2008).

VILLELA, I. A. de. **Desenvolvimento de um modelo termoeconômico que considera os impactos ambientais**. 149 f. Tese (Doutorado em Transmissão e Conversão de Energia) – Universidade Estadual Paulista. Guaratinguetá. 2007.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. 1st.ed. Curitiba: UFPR, 2001.

WAKELIN, T.; BEAUCHEMIN, P. A.; TAMPIER, M. **Emissions from Wood-Fired Combustion Equipment**. North Vancouver: Envirochem Services Inc, 2008.

ANEXO
PORTARIA Nº001, DE 09 DE JANEIRO DE 2008

O Diretor Presidente do Instituto Ambiental do Paraná – IAP, nomeado pelo Decreto nº 077, de 12 de fevereiro de 2007, no uso das atribuições que lhe são conferidas pela Lei Estadual nº 10.066, de 27 de julho de 1992, com as alterações trazidas pelas Leis nº 11.352, de 13 de fevereiro de 1996 e nº 13.425, de 07 de janeiro de 2002 e de acordo com o seu Regulamento, aprovado pelo Decreto nº 1.502, de 04 de agosto de 1992, com alterações posteriores, RESOLVE:

Art.1º - Aprovar e determinar o cumprimento da Instrução Normativa nº 01/2008 DEPAM/IAP, referentes às diretrizes para apresentação de relatórios de automonitoramento de emissões atmosféricas conforme anexo, abaixo integrante desta Portaria.

Art. 2º - Esta Portaria entrará em vigor na data de sua publicação, ficando em consequência revogadas as demais disposições em contrário.

Vitor Hugo Ribeiro Burko

Diretor Presidente do Instituto Ambiental do Paraná – IAP.

ANEXO DA PORTARIA Nº 001/2008/IAP/GP

Os relatórios de Automonitoramento de Emissões Atmosféricas, deverão ser elaborados por técnico habilitado e apresentados para análise do IAP, em **02 (duas) vias**, acompanhados da respectiva **Anotação de Responsabilidade Técnica – ART, Certificado de Responsabilidade Técnica ou documento similar**, contendo a descrição precisa da atividade e do tipo de serviço prestado, conforme dispõe a **Resolução 054/06-SEMA**.

Para empreendimentos de porte grande ou excepcional, os relatórios deverão atender a todos os itens especificados a seguir.

Para empreendimentos de porte pequeno ou médio, os relatórios serão simplificados, na forma do item IV.

O porte do empreendimento deve ser conforme determina a Lei Estadual nº 10.233 de dezembro de 1992:

Porte do Empreendimento	Parâmetros		
	Área Construída (m ²)	Investimento Total (UPF/PR)	Número de Empregados
Pequeno	Até 2.000	de 2.000 até 8.000	até 50
Médio	de 2.000 à 10.000	de 8.000 até 80.000	de 50 até 100
Grande	de 10.000 à 40.000	de 80.000 até 800.000	de 100 até 1.000
Excepcional	acima de 40.000	acima de 800.000	acima de 1.000

EMPREENDIMENTOS DE PORTE GRANDE OU EXCEPCIONAL

A frequência de encaminhamento dos Relatórios de Automonitoramento deve ser de acordo com o estabelecido a partir do Programa de Automonitoramento apresentado e aprovado, conforme o artigo 66-a da Resolução 054/06-SEMA.

Os relatórios parciais, referentes às medições realizadas no período, devem ser mantidos na empresa, à disposição do IAP para consulta a qualquer tempo.

Os Relatórios de Automonitoramento de Emissões Atmosféricas, devem ser compostos de três seções:

- I- Resumo
- II- Relato de Desempenho
- III- Relatórios de medições

I. RESUMO

INFORMAÇÕES CADASTRAIS

- O resumo das informações cadastrais deverá ser apresentado conforme o **QUADRO 01**.

QUADRO 01 - EMPREENDEDOR

Razão social	Nome da indústria/atividade
CNPJ	Número do CNPJ da unidade avaliada
Número de funcionários	Número de funcionários efetivos
Endereço	Endereço completo da fonte de emissões atmosféricas
CEP	CEP da fonte de emissões atmosféricas
Cidade/Estado	
Coordenadas geográficas UTM norte e leste	Coordenadas da fonte de emissões atmosféricas
Telefone	Telefone da empresa, para contato com o responsável pelo automonitoramento
Fax	Fax da indústria/atividade
E-mail	E-mail do responsável pela gestão atmosférica da indústria/atividade
Homepage	Da indústria/atividade
Representante da empresa	Pessoa juridicamente responsável pela unidade industrial/atividade
Responsável pelo automonitoramento	Deve ser uma pessoa da empresa que opera a fonte e não da empresa contratada para fazer a medição
Produção anual	Relacionar os produtos e respectivas quantidades anuais
Matérias primas	Relacionar as matéria primas utilizadas e suas quantidades anuais
Combustíveis utilizados	Relacionar os tipos e respectivas quantidades anuais
Porte do empreendimento	Classificação de acordo com o artigo 65 da resolução 054/06
Frequência de apresentação de relatórios de automonitoramento	De acordo com o programa de automonitoramento
Observações	Campo destinado para observações julgadas importantes, tais como se a produção é sazonal

INFORMAÇÕES SOBRE O PROCESSAMENTO INDUSTRIAL

DESCRIÇÃO DA ATIVIDADE

- Breve descrição do processo produtivo da indústria, destacando os processos geradores de emissões atmosféricas.
- Croqui do processo produtivo, identificando os pontos de emissão atmosférica e respectivos poluentes.

IDENTIFICAÇÃO DOS PROCESSOS QUE APRESENTAM EMISSÕES ATMOSFÉRICAS

- Cada processo, fonte de emissões atmosféricas, deve ser caracterizado através de um formulário, conforme o **QUADRO 02**.

QUADRO 02 - PROCESSO

Razão social	Nome da indústria/atividade	
CNPJ	Número do CNPJ da unidade avaliada	
Identificação do processo	Nome, código e/ou marca, que identifica o processo e o distingue de outros(deverá ser sempre o mesmo). Ex: caldeira fogotubular A1.	
Tipo de fonte	Fugitiva ou pontual	
Comentário sobre o processo	Resumo do processo.	
Enquadramento do processo	Artigo da resolução 054/06 que determina os padrões de emissão ou de condicionamento	
Padrões de emissão ou de condicionamento	Relacionar os padrões de emissão ou de condicionamento a serem atendidos ou limites, mais restritivos, estabelecidos na licença. Incluir concentração referencial de oxigênio quando couber.	
Produção típica ou condição típica de operação	Condição de operação da fonte geradora de emissão que prevalece na maioria das horas operadas.	
Frequência de amostragem	De acordo com o estabelecido no artigo específico ou no artigo 68 da resolução 054/06-SEMA	
Altura da chaminé	Altura em metros, a partir do solo	
Diâmetro da chaminé	Diâmetro em metros	
Consumo de combustível	Tipo e quantidade anual de combustível, quando couber	
Potência térmica nominal	De acordo com a definição no artigo 2º - XXXII, da resolução 054/06-SEMA.	
Horas de operação semanais	Horas trabalhadas na semana, referentes ao processo monitorado/avaliado.	
Horas de operação anuais	Horas trabalhadas durante o ano, referentes ao processo monitorado/avaliado.	
Equipamento de remoção	<input type="checkbox"/> câmara de sedimentação	
	<input type="checkbox"/> ciclone	
	<input type="checkbox"/> multiciclone	nº de ciclones
	<input type="checkbox"/> filtro manga	nº de mangas
	<input type="checkbox"/> precipitador eletrostático	
	<input type="checkbox"/> lavador	Tipo de lavador
	<input type="checkbox"/> outros	
Observações	Campo destinado para observações julgadas importantes, que não se encaixem nos campos anteriores. Ex: condições do entorno, distâncias utilizadas para enquadramento de fontes nos artigos 43 e 44.	

INFORMAÇÕES SOBRE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS - MONITORAMENTO

- Para cada monitoramento ou medição, os resultados devem ser resumidos segundo o **QUADRO 03**.

- Para cada período de monitoramento contínuo, além do **QUADRO 03**, deve ser preenchido o formulário de acordo com o **QUADRO 04**
- Para cada campanha de monitoramento no entorno, os resultados devem ser resumidos segundo o **QUADRO 05**.

QUADRO 03 – MONITORAMENTO

Razão social	Nome da indústria/atividade					
CNPJ	Número do CNPJ da unidade avaliada					
Nome do processo	Nome, código e/ou marca, que identifica o processo e o distingue de outros(deverá ser sempre o mesmo). Ex: caldeira fogotubular A1.					
Produção típica ou condição típica de operação	Condição de operação da fonte geradora de emissão que prevalece na maioria das horas operadas.					
MEDIÇÃO						
Tipo de monitoramento	Indicar se é monitoramento contínuo ou descontínuo					
Data da medição	Data da realização da medição ou data final no caso de monitoramento contínuo					
Responsável pela medição	Nome do técnico responsável pela medição					
Local da medição	Descrição do ponto de amostragem, destacando o atendimento à norma pertinente					
Oxigênio referencial	De acordo com os artigos específicos da resolução 054/06, quando couber					
Vazão base seca (Nm³)						
Parâmetros monitorados	MP_{total}	SO_x	CO	NO_x	O₂ ref	Outros
Média das amostragens						
Início da medição						Duração da medição (min)
Final da medição						
Resultado corrigido para O₂ de ref.						
Padrão da resolução 054/06 (mg/Nm³)						
Atendimento ao padrão (sim ou não)						
Emissão média por hora (kg/h)						
Emissão anual (ton/ano)						
Observações	Condições de operação durante a amostragem e outras informações pertinentes					

Obs: todos os campos devem ser preenchidos. Quando a informação não for aplicável, preencher com a expressão NA.

QUADRO 04 – MONITORAMENTO CONTÍNUO

Razão social	Nome da indústria/atividade				
CNPJ	Número do CNPJ da unidade avaliada				
Nome do processo	Ex: incinerador de resíduos				
Detalhe	código e/ou marca, que identifica o processo e o distingue de outros Ex: caldeira fogotubular A1.				
Produção típica ou condição típica de operação	Condição de operação da fonte geradora de emissão que prevalece na maioria das horas operadas.				
Período	Período de realização do monitoramento (ex: de 01/06/06 a 01/06/07)				
Número de dias operados					
	Padrão (mg/Nm ³)	n° médias diárias até 100% padrão	n° médias diárias de 100% até 130% padrão	n° médias diárias acima de 130% padrão	Disponibilidade do analisador (%)
MP-total					
SO_x					
CO					
NO_x					

Responsável pelo preenchimento deste formulário	
Componentes adicionais e justificativa para períodos acima do padrão	

Obs: todos os campos devem ser preenchidos. Quando a informação não for aplicável, preencher com a expressão NA.

QUADRO 05 – MONITORAMENTO NO ENTORNO

Razão social	Nome da indústria/atividade				
CNPJ	Número do CNPJ da unidade avaliada				
Cidade					
Responsável pelo automonitoramento	Deve ser uma pessoa da empresa que opera as fonte e não da empresa contratada para fazer a medição				
Responsável pelo monitoramento no entorno	Pessoa da empresa contratada para a medição				
Responsável pelo preenchimento desta ficha					
Local da medição	UTM norte e leste				
Local da medição em relação à indústria	Se o local está a norte, leste,....., da indústria				
Distância para as fontes internas	Distância em metros do local da medição				
Distância para fontes externas	Distância em metros do local da medição				
Distância para residências	Distância em metros do local da medição				
Poluente monitorado	PTS ou PI ou SOx ou outro				
MEDIÇÃO					
	Data início	mg/Nm ³	Direção do vento	Velocidade do vento	Chuva (sim ou não)
1° dia					
2° dia					
3° dia					
4° dia					
5° dia					
6° dia					
7° dia					
	Média aritmética		xxxxxxxxxxxxxxxx	xxxxxxxxxxxxxxxx	Xxxxxxxxxxxxxxxxx
Observações					
Condições de operação durante o período de amostragem e outras informações pertinentes					

Obs: todos os campos devem ser preenchidos. Quando a informação não for aplicável, preencher com a expressão NA.

II. RELATO DE DESEMPENHO

INTERPRETAÇÃO E AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

- Apresentar os resultados obtidos durante o período, desde o último relatório, em forma de tabela ou gráfico, que demonstrem a evolução do desempenho de cada processo quanto às emissões atmosféricas;
- Relatar as condições operacionais dos processos avaliados para cada monitoramento realizado;
- Relatar e avaliar episódios excepcionais que justifiquem resultados excepcionais obtidos, quando pertinente;
- Descrever a situação de manutenção das fontes e equipamentos de controle de emissões;
- Comentar o desempenho no período, justificando os resultados obtidos e informando todas as ações tomadas para a melhoria de desempenho;
- Relacionar melhorias necessárias, identificando medidas a serem adotadas e seu cronograma de implementação;

PLANO DE CORREÇÃO

- Em caso de não-conformidades, apresentar plano de correção, contendo todas as medidas a serem tomadas para o atendimento aos padrões estabelecidos e seu respectivo cronograma de implantação.

III. RELATÓRIOS DE MONITORAMENTO/ MEDIÇÃO INFORMAÇÕES MÍNIMAS

Os relatórios de medições de emissões atmosféricas devem apresentar as seguintes informações:

- Informações sobre o empreendimento, conforme QUADRO 01;
- Identificação dos processos, conforme QUADRO 02;
- Resultados das análises das emissões, conforme QUADRO 03 para monitoramento descontínuo;
- Resultados das análises das emissões, conforme QUADRO 04 para monitoramento contínuo;
- Metodologia de amostragem e análise, indicando as normas e metodologias empregadas para a determinação de cada poluente, de acordo com as constantes do anexo da resolução 054/06-SEMA;
- Condições de amostragem fora do previsto pela norma devem ser comentadas e justificadas;
- Descrição detalhada do ponto de amostragem, inclusive da estrutura necessária para a realização da amostragem e/ou determinação direta de poluentes;
- No caso de monitoramento no entorno:
- Resultados das análises das emissões, conforme QUADRO 05 para monitoramento no entorno;
- Desenho com detalhamento das distâncias entre o equipamento de monitoramento e fontes dos processos avaliados, de outras fontes interferentes, indicação da direção do vento predominante e nos dias de amostragem;
- Interpretação dos resultados do monitoramento no entorno, em relação às condições operacionais, localização do equipamento de amostragem, condições climáticas e fontes interferentes;
- Profissional habilitado pelo seu conselho de classe, com a apresentação de Anotação de Responsabilidade Técnica – ART, Certificado de Atividade Técnica, ou documento similar, onde contendo a descrição precisa da atividade e do tipo de serviço prestado;
- Certificado de calibração do equipamento, dentro da validade (um ano);
- Planilhas de campo, conforme orientações abaixo:

ORIENTAÇÕES PARA A REALIZAÇÃO E REGISTRO DAS MEDIÇÕES

2.1. DETERMINAÇÃO DE GASES ON-LINE

- Para a medição de gases on-line, utilizar o formulário abaixo;
- Preferencialmente deve ser utilizada a planilha eletrônica, que pode ser obtida junto à sede do IAP;
- As colunas I e J se referem às temperaturas na chaminé e no ambiente respectivamente;
- A duração da medição não deve ser inferior a dez minutos;
- O intervalo de tempo entre as medições deve ser constante, por exemplo 1 minuto;
- Para cada ponto medido, deve ser anexada uma cópia do extrato da impressora do analisador de gases;

- A correção para as condições referenciais de oxigênio, para obtenção do resultado final, deve ser realizada a partir das médias das medições instantâneas de oxigênio e dos poluentes.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	n°	Data	Hora	O ₂ , ref.[%]	% O ₂	ppm CO	ppm NO	ppm SO ₂	°C chaminé	°C ambiente
2	1									
3	2									
4	3									
5	4									
6	5									
7	6									
8	7									
9	8									
10	9									
11	10									
12	11									
13	12									
14	13									
15	14									
16	15									

2.2. OUTROS POLUENTES POR DETERMINAÇÃO DESCONTÍNUA

- As amostragens devem ser representativas, considerando as variações típicas do processo;
- Devem ser feitas três amostragens por medição, informando os resultados individuais de cada uma e a sua média aritmética, admitido o descarte de um dos resultados, se discrepante;
- a condição de operação durante a amostragem deve ser aquela que predomina na maioria do tempo operado (condição típica) e devidamente documentada;
- a medição de O₂ para a correção para condições referenciais deve ser feita no mesmo local e ao mesmo tempo da amostragem para outros poluentes.
- Para a determinação de material particulado, adicionalmente:
 - Preferencialmente, deverá ser utilizada a planilha eletrônica que pode ser obtida junto à sede do IAP;
 - devem ser apresentadas as leituras (temperatura, pressão, velocidade, volume, duração) **para cada posição** da sonda na formatação prevista pela norma que o equipamento atende;
 - deve ser apresentada uma folha de pesagem **para cada filtro** utilizado;
- **Para cada medição** deve ser elaborado um folha de resultados contendo:
 - temperatura média na chaminé
 - temperatura média do gasômetro (se aplicável)
 - volume do gás medido
 - umidade do gás
 - velocidade média dos gases
 - média do valor deltaH do orifício do gasômetro (caso aplicável)
 - vazão pela chaminé (cond. normais, base seca)
 - concentração de material particulado em mg/Nm³, base seca (deve ser citada a norma usada para o cálculo da concentração ou informada a fórmula)
 - avaliação da condição isocinética;

2.3. MONITORAMENTO CONTÍNUO

- Planilhas mensais, apresentando as concentrações diárias dos poluentes e respectivas médias;
- Apresentar a disponibilidade do equipamento de monitoramento para efeito de atendimento à condição de monitoramento contínuo;
- Informar sobre a validação das médias diárias, considerando o critério de 75% de tempo de operação diária;
- Relatar dados descartados e sua justificativa;
- Demonstrar a condição de atendimento ao padrão de emissão.

EMPREENDIMENTOS DE PORTE PEQUENO OU MÉDIO

Empreendimentos de porte pequeno ou médio devem encaminhar seus Relatórios de Automonitoramento de Emissões Atmosféricas Simplificados como parte integrante dos processos de Renovação de Licença de Operação, Renovação de Licença Simplificada ou Renovação do Certificado de Isenção de Licenciamento.

Os relatórios parciais, referentes às medições realizadas no período, devem ser mantidos na empresa, à disposição do IAP para consulta a qualquer tempo.

Os Relatórios de Automonitoramento de Emissões Atmosféricas Simplificados, devem compostos de duas seções:

I- Relato de desempenho no período, fazendo referência às medidas adotadas para o controle das emissões atmosféricas e sua eficácia, incluindo o controle em equipamentos de combustão.

II- Relatórios de medições de acordo com as diretrizes constantes da seção

III. RELATÓRIOS DE MONITORAMENTO/ MEDIÇÃO para relatórios de automonitoramento completo